

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Литвиненко Ярослав Володимирович

УДК 681.518.3+004.94+519.6

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СЕГМЕНТНОЇ ТА РИТМІЧНОЇ
СТРУКТУР ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЇ
ОБРОБКИ ДАНИХ

01.05.02 - Математичне моделювання та обчислювальні методи
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання чужих ідей, результатів і текстів мають посилання на відповідне джерело _____

Науковий консультант
Лупенко Сергій Анатолійович
доктор технічних наук,
професор

АНОТАЦІЯ

Литвиненко Я.В. Методи ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів в системах цифрової обробки даних. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – «Математичне моделювання і обчислювальні методи» (з технічних наук). – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми, що полягає у розвитку теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів у напрямку створення нових методів ідентифікації їх сегментних та ритмічних структур, що підвищують точність їх опрацювання й комп'ютерного моделювання в автоматизованих системах цифрової обробки даних.

З огляду на факт наявності повторюваної структури циклічних сигналів, зумовленої послідовним розгортанням у часі чи просторі циклічних явищ і процесів, створено методологію побудови методів сегментації різних циклічних сигналів моделями яких є циклічні функції. Розроблена на основі створеної методології система методів сегментації циклічних сигналів дозволяє проводити ідентифікацію їх сегментних (сегментної циклічної чи сегментної зонної) структур при їх автоматизованому опрацюванні в комп'ютерних системах цифрової обробки даних.

Відомості про ідентифіковану сегментну структуру дозволяють проводити ідентифікацію їх ритмічної (ритмічної циклічної чи ритмічної зонної) структури циклічних сигналів. У випадку визначення змінного ритму циклічного сигналу проводити оцінювання його дискретної ритмічної структури, а у випадку постійного – оцінювання значення періоду, що у цілому розширило математичний апарат обчислювальних методів опрацювання циклічних сигналів.

Удосконалено метод ідентифікації ритмічної структури за рахунок використання методів змішаної інтерполяції квадратичним чи кубічним сплайном

на сегментах-циклах чи сегментах-зонах, що дозволило підвищити точність оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів у порівнянні з відомим методом її ідентифікації на основі кусково-лінійної інтерполяції.

Розроблено метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічних сигналів, який містить як свої складові метод визначення додаткових елементів ритмічної структури та метод визначення оптимального полінома на відповідному сегменті. Врахування більшої кількості елементів ритмічної структури дозволило вибрати вид оптимального поліному серед лінійного, квадратичного та кубічного та вибрати метод оцінювання ритмічної структури на відповідному сегменті серед відомого (на основі кусково-лінійної інтерполяції) та розроблених у роботі методів (на основі квадратичного чи кубічного сплайнів), що дало змогу адаптивно її оцінювати та підвищити точність ідентифікації ритмічної структури циклічних сигналів. У наслідок цього зросла точність опрацювання циклічних сигналів за допомогою методів дискретизації, статистичного оцінювання та комп'ютерного моделювання, на основі математичних моделей, у вигляді циклічних функцій, у порівнянні з відомим методом оцінювання ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції.

На основі урахування розроблених у роботі методів сегментації (ідентифікації сегментних структур) та методів оцінювання ритмічних структур циклічних сигналів створено метод верифікації моделей циклічних сигналів в основу якого покладено перевірку гіпотези про належність досліджуваного сигналу до класу циклічних. Це дозволило адекватно та коректно застосовувати розроблені у дисертаційній роботі методи опрацювання циклічних сигналів.

В роботі обґрунтовано математичну модель і методи статистичного опрацювання процесу рельєфних утворень на поверхні металів викликаних механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливом на неї у вигляді циклічного випадкового процесу. Це дозволило використовувати нові діагностичні ознаки у вигляді коефіцієнтів розкладу нормованих статистичних оцінок у задачах технічного діагностування стану поверхні металів й розширити апарат опрацювання й комп'ютерного моделювання процесів рельєфних утворень на

основі стохастичного підходу.

На основі розроблених у роботі методології сегментації циклічних сигналів та побудованих методів ідентифікації їх сегментних структур, методів ідентифікації ритмічних структур циклічних сигналів створено комплекс комп'ютерних програм для автоматизованого опрацювання зареєстрованих циклічних сигналів і проведення комп'ютерних моделюючих експериментів. Розроблений комплекс програм може бути використано у вигляді складових спеціалізованого програмного забезпечення в системах цифрової обробки даних у медицині при проведенні діагностики за кардіосигналами різної фізичної природи (електричної, магнітної, механічної, акустичної та іншої), в механіці при технічному діагностуванні стану поверхні металів за зареєстрованими процесами рельєфних утворень на поверхні металів викликаними механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливом на неї та в економіці при побудові прогнозу під час аналізу економічних циклічних процесів. Проведене опрацювання реальних та змодельованих тестових циклічних сигналів розробленими та відомими методами підтвердило ефективність створених у роботі методів сегментації (ідентифікації сегментних структур) та методів оцінювання ритмічних структур у порівнянні з відомими методами. Здійснено документальне підтвердження впровадження отриманих результатів у медичну практику.

Розроблені математичні засоби ідентифікації сегментних та оцінювання ритмічних структур, які підвищують точність у цілому, методів опрацювання, зокрема методів дискретизації, статистичного опрацювання й комп'ютерного моделювання циклічних сигналів, придатні для використання як складові спеціалізованого програмного забезпечення в програмно-апаратних системах цифрового опрацювання (діагностики чи прогнозування) різних реальних циклічних сигналів та як складові в системах їх комп'ютерного моделювання при використанні під час тестування нових діагностичних чи прогностичних систем, а також у науково-експериментальних дослідженнях.

Основний зміст дисертаційної роботи складається з шести розділів.

У першому розділі на основі огляду літературних джерел проведено аналіз

існуючих систем цифрової обробки циклічних сигналів різної фізичної природи та структури, їх математичних моделей з точки зору адекватності та методів опрацювання, зокрема методів сегментації, стосовно точності, достовірності та інформативності отриманих на їх основі діагностичних чи прогностичних ознак. Які використовуються в системах діагностики: в медицині – під час діагностики стану серця людини; в механіці – під час аналізу процесів рельєфних утворень на поверхні металів та в системах прогнозу, циклічних економічних процесів – під час їх аналізу та прогнозування. Наведено науково-технічні проблеми, зокрема проблему ідентифікації сегментних та ритмічних структур циклічних сигналів, що виникає під час їх автоматизованого опрацювання в системах цифрової обробки. Враховуючи проведений огляд та порівняльний аналіз, математичних моделей обґрунтована – модель у вигляді циклічної функції. Сформульовані вимоги до методів сегментації (ідентифікації сегментних структур) та методів ідентифікації ритмічних структур, які і визначають напрямок досліджень дисертаційної роботи.

У другому розділі, вибравши напрямок наукового дослідження, розглянуто основні поняття: сегмента, циклу та зони, які формують концептуальну модель циклічних сигналів. Враховуючи зазначені поняття, обґрунтовано узагальнену сегментну структуру циклічних сигналів, яка лежить в основі розробленої методології їх сегментації. Згідно з обґрунтованою математичною моделлю циклічних сигналів, в роботі, наведено дві сегментних структури: сегментна циклічна та сегментна зонна. Наведено основні математичні співвідношення для них. Враховуючи абстрактну циклічну функцію із сегментною структурою, побудовано таксономічне дерево класів моделей циклічних функцій, для яких розроблено методи сегментації (ідентифікації сегментних структур). Враховуючи описані сегментні структури та характеристики циклічних функцій, які є математичними моделями циклічних сигналів конкретизовано постановку завдання сегментації для двох типів сегментних структур.

У третьому розділі враховуючи постановку завдання сегментації циклічних сигналів описано її вирішення шляхом розробленої методології сегментації циклічних сигналів, моделями яких є циклічні функції. Описано узагальнений

підхід до сегментації абстрактної циклічної функції, яка є узагальненою моделлю циклічного сигналу із сегментною структурою. На основі розробленої методології створено систему методів сегментації циклічних сигналів, які, власне, дозволяють проводити ідентифікацію їх сегментних структур, із урахуванням двох підходів – детермінованого та стохастичного, залежно від вибраної математичної моделі. Для розроблених методів сегментації детермінованих циклічних сигналів та випадкових циклічних сигналів дискретного аргументу, проведено оцінювання їх точності. Наведено результати застосування розроблених методів ідентифікації сегментних структур у різних галузях: медицині, механіці, економіці, а саме результати сегментації циклічних кардіосигналів, циклічних механічних процесів рельєфних утворень поверхні металів, що виникають під механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливом на неї та циклічних економічних процесів.

У четвертому розділі розроблено методи ідентифікації ритмічних структур циклічних сигналів. Описано математичне забезпечення розроблених методів її оцінювання за допомогою методів змішаної інтерполяції кусково-квадратичної та кусково-лінійної функції; інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної функції; інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції. Описано розроблений метод оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів (відліків) та метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічних сигналів. Проведено оцінювання точності розроблених методів та її аналіз.

У п'ятому розділі на основі проведених експериментів встановлено факт підвищення точності при опрацюванні циклічних сигналів, зокрема методами дискретизації, статистичної обробки та їх комп'ютерного моделювання за рахунок використання в них оцінених ритмічних структур циклічних сигналів розробленими методами. Наведено приклади результатів застосування методів статистичного опрацювання до циклічних сигналів у медицині, механіці та економіці. Наведено також результати комп'ютерного моделювання циклічних сигналів з урахуванням різних оцінених ритмічних структур та інформації, отриманої методами їх статистичного опрацювання. Розроблено метод

верифікації моделей досліджуваних сигналів на належність їх до класу циклічних (верифікація циклічності).

У шостому розділі проведено апробацію теоретичних положень та прикладних результатів даного дисертаційного дослідження в системах цифрової обробки даних у різних сферах за кардіосигналами, процесами рельєфних утворень на поверхні металів та економічними циклічними процесами. Обґрунтовано інформативні ознаки, які можуть бути використані при побудові нових систем цифрової обробки, зокрема, систем діагностики за зареєстрованими циклічними кардіосигналами чи процесами рельєфних утворень на поверхні металів. Наведено математичні співвідношення для визначення інформативних ознак (діагностичних чи прогностичних) та їх аналіз під час кардіодіагностики, технічного діагностування стану поверхні металів та аналізу й прогнозування економічних циклів. Розроблено комплекс комп'ютерних програм для автоматизованого опрацювання циклічних сигналів, який реалізує розроблені у дисертаційній роботі методи.

Ключові слова: циклічні сигнали, математичне моделювання, методи сегментації, ідентифікація сегментної структури, оцінювання ритмічної структури, методи статистичного опрацювання, комп'ютерне моделювання.

ANNOTATION

Lytvynenko I.V. Methods of identification of segment and rhythmic structures of cyclic signals in systems of digital data processing. – Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

The dissertation for a scientific degree of Doctor of Technical Sciences on specialty 01.05.02 – «Mathematical modeling and computation methods». – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2019.

The dissertation is dedicated to solving an important scientific problem of the development of the theory of modeling and processing of cyclic signals in the area of creating new methods for identifying their segment and rhythm structures, which

increase the accuracy of their processing and computer modeling in automated digital data processing systems.

Considering the fact that the structure of cyclic signals is repetitive which is due to sequential expansion in time or space of cyclic occurrences and processes, a methodology for creating methods of segmentation of different cyclic signals, the models of which are cyclic functions is created. The system of methods of segmentation of cyclic signals, developed on the basis of this methodology allows identifying the segment structure (segment cyclic or segment zone structure) of cyclic signals during their automated processing in computer digital data processing systems.

Details about the identified segment structure allow the identification of the rhythm structure (rhythm cyclic or rhythm zone structure) of cyclic signals. The obtained information allows, in the case of determining the variable rhythm of a cyclic signal, to evaluate its discrete rhythm structure, and in the case of a constant rhythm - to estimate the value of the period. This possibility, in general, has expanded the mathematical apparatus of computational methods for processing cyclic signals.

Improvements have been set for the method of identification of the rhythm structure by using mixed interpolation methods with a quadratic or cubic spline on segment-cycles or segment-zones. This has allowed improving the accuracy and reliability of the evaluation of the rhythm structure of cyclic signals in comparison with the known method of identification of the rhythm structure on the basis of piecewise linear interpolation.

There was developed a method of adaptive identification of the rhythm structure of cyclic signals, which includes as its components - method of determining additional elements of the rhythm structure and the method of determining the optimal polynomial in the corresponding segment. By including a greater number of elements of the rhythm structure, has allowed choosing type of the optimal polynomial among the linear, quadratic and cubic and also allowed to choose the method of evaluation of the rhythm structure on the corresponding segment among the known (on the basis of piecewise linear interpolation) and the methods, developed in the work, (based on the quadratic or cubic spline). Such an adaptive approach allowed to increase the accuracy and

reliability of the identification of the rhythm structure of cyclic signals. As a result, it was possible to improve the accuracy of processing cyclic signals, in particular, with the help of methods of discretization, statistical estimation and computer simulation on the basis of mathematical models in the form of cyclic functions, in comparison to the known method of evaluating the rhythm structure on the basis of piecewise linear interpolation.

Based on the developed in this work methods of segmentation (identification of segment structures) and methods of evaluation of rhythm structures of cyclic signals, a method was developed for verifying the methods of cyclic signals. The method is based on the hypothesis testing about the belonging of the investigated signal to the class of cyclic signals. This allowed for the accurate and correct application of the methods of processing cyclic signals developed in the work.

The mathematical model and methods of statistical development of the surface formation process on the metal's outer layer, caused by the effect of mechanical or laser shock-wave force on it, in a form of a cyclic random process, were described in this work. This allowed using new diagnostic features in the form of decomposition coefficients of normed statistical estimates in the tasks related to technical diagnostics of the state of the metals' surface and, to extend the apparatus of processing and computer simulation of surface formation processes on the basis of a stochastic approach.

On the basis of the established in this work - methodology of the segmentation of cyclic signals and the developed methods of identification of their segment structure, methods of identification of rhythm structures of cyclic signals there was created a complex of computer programs for the automated processing of registered cyclic signals and computer simulation experiments. The developed complex of programs can be used as components of the specialized software in the systems of digital processing of data in medicine during the diagnostics of cardiac signals of different physical nature (electrical, magnetic, mechanical, acoustic and other); in mechanics during the technical diagnostics of the surface of metals for registered formation processes on the metals' outer layer, caused by the effect of mechanical or laser shock-wave force on it; and in

economics when constructing a forecast during the analysis of economic cyclic processes. There was conducted an analysis of actual and simulated test cyclic signals by developed and already known methods. This research confirmed the effectiveness of the created methods of segmentation (identification of segment structures) and methods of evaluating the rhythm structure in comparison with the already known methods. The confirmation of the implementation of the obtained results in medical practices has been documented in this work.

There were developed mathematical means of segment identification and evaluation of rhythm structures that in general increase the accuracy of the processing methods, in particular, such methods as discretization, statistical processing and computer simulation of cyclic signals. Such means are suitable for use as components of specialized software for digital processing systems (diagnostics or prognosis) of different actual cyclic signals and as components in computer simulation systems of such signals, used when testing newly created diagnostic or prognostic systems. The results of this study can be also used in scientific and experimental research.

The main content of the dissertation consists of six sections.

The first section of the dissertation provides, on the basis of literature sources, an analysis of existing systems of digital processing of cyclic signals of different physical nature and structure; their mathematical models in terms of sufficiency and processing methods, in particular segmentation methods, regarding accuracy, reliability and informativeness of the diagnostic or prognostic features obtained on their basis. These are used in diagnostic systems: in medicine - during the diagnosis of a human heart condition; in mechanics - during the analysis of surface formation processes on the metals' outer layer and in and in forecasting systems, cyclic economic processes - during the time of their analysis and forecasting. Scientific and technical problems are indicated, particularly the problem of identifying segment and rhythm structures of cyclic signals which appeared during their automated execution in digital processing systems. Considering the conducted review and the comparative analysis of the mathematical models, a model in the form of cyclic function was substantiated. There were formulated requirements for methods of segmentation (identification of segment

structures) and methods of identification of rhythm structures that determine the direction of research of this dissertation.

The second section of this dissertation, after establishing the direction of the scientific research, describes the basic concepts: segment, cycle, and zones which form the conceptual model of cyclic signals. Taking into consideration the mentioned concepts, the generalized segment structure of cyclic signals which underlies the developed methodology for their segmentation is presented. In accordance with the considered mathematical model of cyclic signals, this paper presents two segment structures: segment cyclic and segment zone. The basic mathematical correlations are described for them as well. Taking into account an abstract cyclic function with a segment structure, a taxonomic tree of classes of models of cyclic functions was constructed, for which methods of segmentation (identification of segmental structures) have been developed. Considering the described segment structures and characteristics of cyclic functions, which are mathematical models of cyclic signals, the formulation of the segmentation problem for two types of segment structures was specified.

In the third section of this dissertation, taking into account the identification of the problem of segmentation of cyclic signals, a solution to this problem is defined by the developed methodology of segmentation of cyclic signals, whose models are cyclic functions. A generalized approach was specified on the segmentation of an abstract cyclic function, which is a generalized model of a cyclic signal with a segment structure. On the basis of the developed methodology, there was created a system of methods of segmentation of cyclic signals (which allow identifying the segment structure of these signals) that take into account two approaches - deterministic and stochastic, depending on the chosen mathematical model. For the developed methods of segmentation of deterministic cyclic signals and random cyclic signals of discrete argument, there was conducted an evaluation of their preciseness. Results are provided of the application of the developed methods of identification of segment structures in different fields: medicine, mechanics, economics. Particularly the realists are for segmentation of cyclic cardio-signals; cyclic mechanical processes of surface

formations occurring on the outer layer of metals under the mechanical or laser shock-wave force on it; and cyclic economic processes.

The fourth section of the dissertation describes the developed methods for identifying the rhythm structure of cyclic signals. The mathematical securement is described for the developed methods of its evaluation with the use of mixed interpolation methods: piecewise-quadratic and piecewise-linear functions; interpolation by a quadratic spline and piecewise linear function; interpolation by cubic spline and piecewise linear function. The section also describes a developed method for evaluating the rhythm structure by the means of defining its additional elements (countdowns) and the method of adaptive identification of the rhythm structure of cyclic signals. The evaluation of the accuracy of the developed methods and its analysis was carried out.

In the fifth section, on the basis of the conducted experiments, there was defined the fact that during the processing of cyclic signals accuracy increases with the use of discretization methods, statistical processing and their computer simulation. This is possible through the use in them (cyclic signals) the evaluated rhythm structures by the developed methods. Examples are mentioned in this section of applying methods of statistical processing for cyclic signals in medicine, mechanics, and economics. The results of digital modeling of cyclic signals taking into account various evaluated rhythm structures and information obtained with the use of methods of statistical processing are provided. There was also developed a method for verifying the models of the investigated signals for their belonging to the class of cyclic signals (verification of cyclicity).

The sixth and final section of this dissertation describes the conducted approbation of theoretical provisions and the usability of the obtained results of the research in systems of digital data processing in different fields through cardio-signals, processes of surface formations on the outer layer of metals and cyclic economic processes. The section substantiates informative features that can be used in the creation of new systems of digital processing, particularly systems of diagnostics on the basis of registered cyclic cardio signals or the processes of surface formations on the outer layer of metals. Mathematical interrelations for the determination of informative features

(diagnostic and prognostic) and their analysis during cardio diagnostics, technical diagnostics of the surface condition of metals, and analysis and prediction of economic cycles are described. The section specifies the established complex of digital programs for the automated processing of cyclic signals, which executes the developed methods mentioned in this dissertation.

Key words: cyclic signals, mathematical modeling, methods of segmentation, identification of the segment structure, evaluation of the rhythm structure, methods of statistical processing, computer simulation.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Публікації, які відображають основні наукові результати дисертації

1. Литвиненко Я., Лупенко С., Студена Ю. Методи статистичної обробки сигналів серця на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу із зонною часовою структурою. Вісник Тернопільського державного технічного університету. Тернопіль, 2006. № 4 (11). С. 189–200. (Google Scholar).

2. Лупенко С. А., Литвиненко Я. В., Сверстюк А. С. Статистичний сумісний аналіз кардіосигналів на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. *Електроніка та системи управління. Національний авіаційний університет*. Київ, 2008. № 4 (18). С. 22–29. (Google Scholar).

3. Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Сверстюк А. С. Програмний комплекс для обробки та моделювання синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням моделей та методів теорії циклічних функціональних відношень. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2009. № 5. С. 80–87. (Google Scholar).

4. Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Дем'янчук Н. Р., Сверстюк А. С. Імітаційне моделювання синхронно зареєстрованих сигналів серця на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів у задачах кардіодіагностики. *Електроніка та системи управління. Національний авіаційний університет*. Київ, 2009. № 4 (22). С. 141–148. (Google Scholar).

5. Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Сверстюк А. С. Діагностичні ознаки в комп'ютерних системах діагностики функціонального стану серцево-судинної системи людини. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2010. № 1. С. 182–188. (Google Scholar).

6. Загородна Н. В., Литвиненко Я. В., Фриз М. Є. Розробка методу короткотермінового прогнозу добового газоспоживання в опалювальний період на основі регресійного аналізу. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. Тернопіль, 2010. №4 (15). С. 130–140. (Google Scholar).

7. Горкуненко А.Б., Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Дем'янчук Н. Р. Імітаційне моделювання взаємопов'язаних економічних процесів на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. *Електроніка та системи управління. Національний авіаційний університет*. Київ, 2011. № 2 (28). С. 133–141. (Google Scholar).

8. Maruschak P.O., Panin S.V., Ignatovich S.R., Zakiev I.M., Konovalenko I.V., Lytvynenko I.V., Sergeev V.P. Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2012. Vol. 57. P. 43–48. (Scopus).

9. Горкуненко А., Литвиненко Я., Козак Р., Лупенко С., Нікольський Ю. Інформаційна технологія прогнозування циклічних економічних процесів. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. Тернопіль, 2012. №1 (65). С. 143–153. (Google Scholar).

10. Analysis of Multiple Cracking of Nanocoating as a Cyclic Random Process / I.V. Lytvynenko, S.A. Lupenko, and P.O. Marushchak. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2013, Vol. 49, No. 2, pp. 164-170. (Scopus).

11. Processing and modeling of ordered relief at the surface of heat-resistant steels after laser irradiation as a cyclic random process / I.V. Lytvynenko, P.O. Maruschak, S.A. Lupenko. *Automatic Control and Computer Science*, 2014, Vol. 48, No. 1, pp. 1-9. (Scopus).

12. Analysis of the State of the Modified Nanotitanium Surface with the Use of the Mathematical Model of a Cyclic Random Process / I.V. Lytvynenko, P.O.

Marushchak. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, Vol. 51, No. 3, pp. 254-263. (Scopus).

13. Lytvynenko I., Maruschak P., Lupenko S., Panin S. Segmentation and Statistical Processing of Geometric and Spatial Data on Self-Organized Surface Relief of Statically Deformed Aluminum Alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 770, pp. 288-293. (Google Scholar).

14. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Lupenko S.A., Popovych P.V. Modeling of the Ordered Surface Topography of Statically Deformed Aluminum Alloy *Materials Science*, 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 113-122. (Scopus).

15. Луцик Н.С., Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Зозуля А.М. Програмний комплекс для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю. *Журнал Вінницького національного технічного університету «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія»*. Вінниця, 2016. №1 (35). С. 13-22. (Google Scholar).

16. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Lupenko S.A., Hats Yu. I, Menou A., Panin S.V. Software for segmentation, statistical analysis and modeling of surface ordered structures. *Proceedings of the 10th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures*. AIP Publishing, 2016, Vol. 1785, No.1, pp. 030012-1-030012-7. (Scopus).

17. Lytvynenko I.V. The problem of segmentation of the cyclic random process with a segmental structure and the approaches to its solving. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing*. 2016, Vol. 3, No. 1, pp. 30-37. (Google Scholar).

18. Lytvynenko I.V. Method of the quadratic interpolation of the discrete rhythm function of the cyclical signal with a defined segment structure. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. 2016, Vol. 84, No. 4, pp. 131-138. (Index Copernicus, Google Scholar).

19. Lytvynenko I.V., Lupenko S.A., Maruschak P.O., Panin S.V., Hats Yu.I. Diagnostic features of relief formations on the nanostructured titanium VT1-0 surface after laser shock-wave treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and*

Engineering. 2017, pp. 1-6. (Scopus).

20. Литвиненко Я.В. Метод інтерполяції кубічним сплайном дискретної функції ритму циклічного сигналу із визначеною сегментною структурою. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький, 2017. № 3. С. 105–112. (Index Copernicus, Google Scholar).

21. Lytvynenko I.V. Method of segmentation of determined cyclic signals for the problems related to their processing and modeling. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. 2017, Vol. 88, No. 4, pp. 153-169. (Index Copernicus, Google Scholar).

22. Lytvynenko I., Maruschak P., Prentkovskis O., Soroachak A. Modelling Kinetics of Dynamic Crack Propagation in a Gas Mains Pipe as Cyclic Random Process. *International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication*, 2017, Springer, pp. 262-269. (Google Scholar).

23. Lytvynenko I.V. The method of segmentation of stochastic cyclic signals for the problems of their processing and modeling. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing*. 2017, Vol. 4, No. 2, pp. 93-103. (Google Scholar).

24. Литвиненко Я.В., Марущак П.О. Застосування адитивної математичної моделі циклічного випадкового процесу і детермінованої функції тренду для аналізу руйнування газопроводу. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018, № 1 (54). С. 95-104. (Google Scholar).

25. Литвиненко Я.В. Загородна Н.В., Окіпний І.Б., Осухівська Г.М. Метод верифікації циклічності (Оцінювання досліджуваного сигналу на приналежність до циклічних сигналів). *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницький. 2018, № 4 (263). С. 214–221. (Index Copernicus, Google Scholar).

26. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Panin S.V., Soroachak A.P. Analysis of Fracture Characteristic of a Gas Main Pipe on the Basis of the Additive Mathematical Model of the Cyclic Random Process and Polynomial Function. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, Vol. 115, No. 1, pp. 012047. (Scopus)

27. Lytvynenko I.V. Method of evaluating the rhythm structure of a cyclic signal

through defining the additional countdowns of the discrete function of rhythm. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing*. 2018, Vol. 5, No. 1, pp. 32-38. (Google Scholar).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

28. Литвиненко Я., Лупенко С., Студена Ю. Статистичні методи обробки кардіосигналів на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу. Матеріали десятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 17-18 травня 2006 р. Тернопіль, 2006. С. 76.

29. Литвиненко Я., Лупенко С., Сверстюк А., Студена Ю. Підходи до моделювання сигналів серця на ЕОМ з використанням циклічних випадкових процесів. Матеріали одинадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 16-17 травня 2007 р. Тернопіль, 2007. С. 86.

30. Лупенко С., Литвиненко Я., А. Сверстюк. Сумісна статистична обробка синхронно зареєстрованих кардіосигналів на базі їх моделі у вигляді циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. Матеріали дванадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 14-15 травня 2008 р. Тернопіль, 2008. С. 111.

31. Литвиненко Я., Лупенко С. Підходи до сегментації циклічного випадкового процесу із зонною часовою структурою. Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 13-14 травня 2009 р. Тернопіль, 2009. С. 123.

32. Лупенко С., Литвиненко Я., Сверстюк А. Статистичне оцінювання взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів у системах автоматизованої кардіодіагностики. Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 13-14 травня 2009 р. Тернопіль, 2009. С. 98.

33. Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Сверстюк А. С. Діагностичні ознаки в

системах автоматизованої діагностики функціонального стану серцево-судинної системи за сукупністю синхронно зареєстрованих кардіосигналів. *“Kluczowe aspekty naukowej dzialalnosci – 2010”* : матеріали V міжнародної науково-практичної конференції, м. Перемишль, 7-15 січня 2010 р. Перемишль, 2010. №16. С. 11–15.

34. Литвиненко Я.В. Сегментація циклічного випадкового процесу із зонною часовою структурою та оцінка його функції ритму. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. ТНТУ, м. Тернопіль, 19-21 травня 2010 р. Тернопіль, 2010. С. 274.

35. Литвиненко Я.В. Огляд методів пошуку «розладки» випадкових процесів. Матеріали чотирнадцятої наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 27-28 жовтня 2010 р. Тернопіль, 2010. С. 21.

36. Коваль В., Литвиненко Я., Яскілка В. Застосування методів статистичної обробки циклічних випадкових процесів в задачах аналізу циклів сонячної активності. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей першої наук.-техн. конф. м. Тернопіль, 20 травня 2011 р. Тернопіль, 2011. С. 17.

37. Литвиненко Я., Марущак П. Аналіз деформування розломно-блокових систем з використанням стохастичних методів обробки циклічних випадкових процесів. Збірник тез доповідей XV наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 14-15 грудня 2011 р. Тернопіль, 2011. С. 128.

38. Lynvynenko I. Approaches to the evaluation of the rhythm function of cyclic signals and processes. *Problems of decision making under uncertainties*, (PDMU-2012) : XIX International Conference, Mukachevo, April 23-27, 2012. Mukachevo, Ukraine 2012. P. 146.

39. Lynvynenko I., Maruschak P. Use of stochastic methods for treatment of cyclic random processes of multiple cracking. *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science*, (TCSET-2012) : XI International Conference, Lviv–Slavske, February 21-24, 2012. Lviv–Slavske, Ukraine 2012. P. 59.

(Scopus)

40. Maruschak P., Okipnyi I., Poberezhny L., Lytvynenko I. Assessment of damageability of a surface with multiple defects. *Materials and Metallurgy*, (SHMD-2012) : 10-th International Symposium of Croatian Metallurgical Society, Shibenk, June 17-21, 2012. Shibenk, Croatia 2012. P. 401.

41. Lytvynenko I., Maruschak P., Menou A. Using mathematical model of cyclic random process for diagnostics of nanotitanium surface condition after high-energy treatment. Proc. of International Symposium on Operational Research and Applications, (ISORAP-2013), May 8-10. 2013. Marrakech, Morocco 2013. P. 678-684.

42. Lytvynenko I., Maruschak P. Simulation of the process of self-organization of modified nanotitan surface using a mathematical apparatus for processing cyclic functions. *Problems of decision making under uncertainties*, (PDMU-2013) : XXI International Conference, Skhidnytsia, May 13-17, 2013. Skhidnytsia, Ukraine 2013. P. 160-161.

43. Литвиненко Я., Яскілка В. Програмне забезпечення для сегментації детермінованих циклічних функцій в задачах цифрової обробки даних. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей III науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 24 квітня 2013 р. Тернопіль, 2013. С. 28.

44. Гац Ю., Литвиненко Я. Використання математичної моделі циклічного випадкового процесу в задачах аналізу поверхневих шарів сучасних матеріалів. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування* : тези доповідей II всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 9-10 червня 2015 р. Тернопіль, 2015. С. 7-8.

45. Василик Є., Литвиненко Я. Математична модель циклів сонячної активності. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування* : тези доповідей II всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 9-10 червня 2015 р. Тернопіль, 2015. С. 5-7.

46. Луцик Н., Литвиненко Я. Програмний комплекс для аналізу серцевого ритму на базі математичної моделі у вигляді умовного циклічного випадкового процесу. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування* :

тези доповідей II всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 9-10 червня 2015 р. Тернопіль, 2015. С. 12-14.

47. Lytvynenko I.V., Marushak P.O., Lupenko S.A., Hats Yu.I., Menou A. Software tools for the analysis of the self-organizing material surface after deformation for the problems of its sementation and statistical processing. Proc. of International Symposium Aircraft materials, (АСМА-2016). May 11-13. 2016. Agadir, Morocco 2016. P. 138-139.

48. Гац Ю., Литвиненко Я. Обґрунтування вибору діагностичних ознак рельєфних утворень на поверхні нанотитану, сформованих внаслідок лазерної ударно-хвильової обробки. Матеріали ХІХ наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 18-19 травня 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 5-6.

49. Василик Є., Литвиненко Я. Математична модель циклів сонячної активності для задачі їх статистичної обробки. Матеріали ХІХ наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 18-19 травня 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 4.

50. Литвиненко Я., Литвиненко Т. Метод вилучення тренду з електрокардіосигналу в системах автоматизованої кардіодіагностики. *Актуальні задачі сучасних технологій* : матеріали V міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 17-18 листопада 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 64.

51. Литвиненко Я., Марущак П., Лавренюк Т. Сегментація циклічних сигналів в задачах цифрової обробки даних: детермінований підхід. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування* : тези доповідей III всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 8-9 червня 2017 р. Тернопіль, 2017. С. 155-157.

52. Литвиненко Я.В., Марущак П.О., Побережний Л.Я., Баран Д.Я. Аналіз кінетики динамічного поширення тріщини в трубі магістрального газопроводу як циклічного випадкового процесу. *Нафтогазова енергетика 2017* : матеріали VI

Міжнародної науково-технічної конференції Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 380-382.

53. Литвиненко Я.В., Марущак П. О. Застосування адитивної математичної моделі циклічного випадкового процесу і поліноміальної функції для виявлення закономірностей динамічного руйнування магістрального газопроводу. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах*, (ВКДТС-2017) : матеріали IV міжнародної наукової конференції, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, 31 жовтня-2 листопада 2017 р. Вінниця, 2017. С. 167-169.

54. Horkunenko A., Lytvynenko I., Sverstyuk A., Lupenko S. Software complex for modeling and processing of synchronously registered cardiosignals. Projekt interdyscyplinarny projektem XXI wieku, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biala, 2017. T. 2. P. 126-130.

55. Габ'ян Л., Петришин Ю., Литвиненко Я. Використання методів попередньої обробки біомедичних даних в задачах телемедицини. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей V науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 1-2 лютого 2018 р. Тернопіль, 2018. С. 25.

56. Габ'ян Л., Петришин Ю., Литвиненко Я. Сучасні технології в телемедицині. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей V науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 1-2 лютого 2018 р. Тернопіль, 2018. С. 45.

57. Литвиненко Я. Основи методології сегментації циклічних сигналів. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій* : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя. м. Тернопіль, 23-24 травня 2018 р. Тернопіль, 2018. С. 211-212.

Публікації, які додатково відображають результати дисертації

58. Свідоцтво № 31682 Україна. Комп'ютерна програма “Статистична

обробка циклічних сигналів серця” (СОЦСС) / А.С. Сверстюк, С. А. Лупенко, Я. В. Литвиненко; заявл. 05.11.09 ; опубл. 20.01.10.

59. Свідоцтво № 38822 Україна. Комп'ютерна програма “Моделювання циклічних економічних процесів” (МЦЕП) / А.Б. Горкуненко, С. А. Лупенко, Я. В. Литвиненко; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11.

60. Свідоцтво № 38823 Україна. Комп'ютерна програма “Статистична обробка циклічних економічних процесів” (СОЦЕП) / А. Б. Горкуненко, С. А. Лупенко, Я. В. Литвиненко; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11.

61. Свідоцтво № 59323 Україна. Комп'ютерна програма “Аналіз серцевого ритму з підвищеною інформативністю” / Я.В. Литвиненко, С.А. Лупенко, Н.С. Луцик; заявл. 19.02.2015; опубл. 16.04.2015.

62. Свідоцтво № 65753 Україна. Комп'ютерна програма “Статистична обробка та моделювання циклічних сигналів рельєфоутворення, оцінка похибок моделювання” / Я.В. Литвиненко, П.О. Марущак, Є.В. Тиш; заявл. 28.03.2016; опубл. 31.05.2016.

63. Свідоцтво № 68541 Україна. Комп'ютерна програма “Сегментація детермінованих циклічних функцій” / Я.В. Литвиненко; заявл. 8.09.2016; опубл. 8.11.2016.

64. Свідоцтво № 79103 Україна. Комп'ютерна програма “Сегментація випадкових циклічних функцій” / Я.В. Литвиненко; заявл. 8.05.2018; опубл. 16.05.2018.

ЗМІСТ

Перелік основних умовних позначень, символів і скорочень.....	33
Вступ (актуальність теми).....	39
Розділ 1. Математичні моделі та методи опрацювання циклічних сигналів у системах їх цифрової обробки (огляд літературних джерел).....	49
1.1. Циклічні сигнали в системах цифрової обробки даних та процес ідентифікації їх сегментних структур (об'єкт дослідження).....	49
1.1.1. Циклічні кардіосигнали. Комп'ютерні системи діагностики функціонального стану серцево-судинної системи людини.....	51
1.1.1.1 Електрокардіосигнал. Автоматизовані комп'ютерні електрокардіо-діагностичні системи, існуючі методи дослідження електрокардіосигналів та діагностичні ознаки.....	51
1.1.1.2 Математичні моделі, які використовуються в автоматизованих, комп'ютерних системах цифрової обробки кардіосигналів.....	66
1.1.2. Циклічні процеси рельєфних утворень на поверхні металів викликані механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливом на неї, їх математичні моделі. Комп'ютерні системи дослідження й технічного діагностування стану поверхні металів.....	60
1.1.3. Циклічні економічні процеси, їх математичні моделі. Комп'ютерні системи автоматизованого аналізу та прогнозу циклічних економічних процесів..	62
1.1.4. Циклічні сигнали електро-, газо-, нафто-, водоспоживання, їх математичні моделі. Комп'ютерні системи аналізу та прогнозу електро-, газо-, нафто-, водоспоживання.....	65
1.1.5. Узагальнена структурна схема автоматизованих комп'ютерних, систем діагностики та прогнозування за циклічними сигналами.....	68
1.2. Недоліки (науково-технічні проблеми) в автоматизованих, комп'ютерних, системах цифрової обробки та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів.....	73

1.3. Вимоги висунуті до математичної моделі циклічних сигналів.....	74
1.4. Відомі математичні моделі циклічних сигналів та можливості їх використання для вирішення проблеми ідентифікації їх сегментної структури.....	76
1.4.1. Детерміновані математичні моделі циклічних сигналів.....	77
1.4.2. Стохастичні математичні моделі циклічних сигналів.....	79
1.5. Постановка проблеми ідентифікації сегментної структури з урахуванням вибраної математичної моделі циклічних сигналів.....	88
1.6. Вимоги до розробляємих методів сегментації циклічних сигналів.....	93
1.7. Відомі методи сегментації циклічних сигналів.....	94
1.7.1. Методи сегментації циклічних сигналів (детермінований підхід).....	94
1.7.2. Методи сегментації циклічних сигналів (стохастичний підхід).....	102
1.7.3. Методи, які використовуються для розпізнавання (ідентифікації, класифікації,) виділених сегментів сегментів циклічного сигналу та методи аналізу його ритму.....	102
1.8. Висновки до першого розділу.....	108

Розділ 2. Сегментні структури циклічних сигналів. Постановка завдання сегментації циклічних сигналів.....

2.1. Концептуальна модель циклічних сигналів із сегментною структурою.....	111
2.2. Узагальнена сегментна структура циклічних сигналів. Основні математичні співвідношення для сегментних структур циклічних сигналів.....	116
2.2.1. Сегментна циклічна структура циклічних сигналів.....	118
2.2.2. Сегментна зонна структура циклічних сигналів.....	120
2.3. Узагальнена ритмічна структура циклічних сигналів. Основні математичні співвідношення для ритмічних структур циклічних сигналів.....	125
2.4. Таксономія класів моделей циклічних функцій із сегментною структурою.....	141

2.5. Постановка завдання сегментації циклічних сигналів із сегментною структурою.....	144
2.6. Висновки до другого розділу.....	147

Розділ 3. Методологія сегментації циклічних сигналів. Методи ідентифікації сегментних структур циклічних сигналів. Оцінювання точності розроблених методів сегментації.....

3.1. Методологія сегментації циклічних сигналів.....	150
3.2. Метод сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є абстрактна циклічна функція із сегментною структурою.....	156
3.3. Метод сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу із відомою (ідентифікованою) сегментною структурою.....	158
3.3.1. Метод сегментації циклічного сигналу з урахуванням відомої (ідентифікованої) сегментної циклічної структури.....	159
3.3.2. Метод сегментації циклічного сигналу з урахуванням відомої (ідентифікованої) сегментної зонної структури.....	163
3.4. Метод сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу та детермінована циклічна інтервальна функція дискретного аргументу із сегментною структурою.....	171
3.4.1. Результати застосування методу сегментації циклічних сигналів, моделями якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу та детермінована циклічна інтервальна функція дискретного аргументу із сегментною структурою, оцінювання точності методу їх сегментації.....	180
3.5. Метод сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є циклічний випадковий процес дискретного аргументу з сегментною структурою.....	185

3.5.1. Результати застосування методу сегментації циклічних сигналів, моделями яких є циклічні випадкові процеси із сегментною структурою, оцінювання точності методу їх сегментації.....	194
3.6. Модифікація блоку оцінювання сегментної структури циклічних сигналів, моделями яких є циклічні випадкові процеси із сегментною структурою, оцінювання похибок методу їх сегментації.....	199
3.7. Підхід до розпізнавання сегментів-зон, отриманих на основі методів сегментації циклічних сигналів.....	208
3.8. Приклади результатів застосування розроблених методів сегментації циклічних сигналів у різних галузях.....	209
3.8.1. Результати сегментації циклічних кардіосигналів (у медицині).....	209
3.8.2. Результати сегментації циклічних процесів рельєфних утворень на поверхні металів (у механіці).....	211
3.8.3. Результати сегментації циклічних економічних процесів (у економіці).....	211
3.9. Висновки до третього розділу.....	213

Розділ 4. Методи оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів.

Аналіз точності розроблених методів оцінювання ритмічних структур.....	215
4.1. Постановка задачі оцінювання ритмічної структури циклічного сигналу....	215
4.2. Метод оцінювання ритмічної структури за допомогою змішаної інтерполяції: кусково-квадратичної та кусково-лінійної.....	217
4.2.1. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній циклічній структурі.....	219
4.2.2. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній зонній структурі	223
4.3. Метод оцінювання ритмічної структури за допомогою змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної.....	230
4.3.1. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній циклічній структурі.....	230

4.3.2. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній зонній структурі.....	233
4.4. Метод оцінювання ритмічної структури за допомогою змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної.....	236
4.4.1. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній циклічній структурі.....	236
4.4.2. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній зонній структурі.....	240
4.5. Методом оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів (відліків).....	244
4.5.1. Оцінювання ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній циклічній структурі.....	248
4.5.2. Оцінювання ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній зонній структурі.....	249
4.6. Метод оцінювання оптимального полінома на сегменті в межах відліків сегментної структури.....	256
4.6.1. Оцінювання оптимального полінома, що описує ритмічну структуру в межах відліків ідентифікованої сегментної циклічної структури.....	257
4.6.2. Оцінювання оптимального полінома, що описує ритмічну структуру в межах відліків ідентифікованої сегментної зонної структури.....	259
4.7. Метод оцінювання ритмічної структури шляхом адаптивної її ідентифікації.....	265
4.8. Порівняльний аналіз точності відомого та розроблених методів оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів.....	268
4.9. Висновки до четвертого розділу.....	278
Розділ 5. Методи статистичного опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів із урахуванням оціненої ритмічної структури.....	281

5.1. Дискретизація циклічних сигналів у системах цифрового опрацювання з урахуванням їх оціненої ритмічної структури.....	281
5.1.1. Похибки передискретизації циклічних сигналів з урахуванням оцінених їх ритмічних структур.....	285
5.2. Методи статистичного опрацювання циклічних сигналів із урахуванням оцінених їх ритмічних структур.....	289
5.2.1. Оцінки імовірнісних характеристик циклічних сигналів із урахуванням різних ритмічних структур.....	291
5.3. Методи статистичного опрацювання сумісних ймовірнісних характеристик вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів із урахуванням різних ритмічних структур.....	293
5.4. Результати застосування методів статистичного опрацювання циклічних сигналів з урахуванням оцінених ритмічних структур у різних галузях.....	295
5.4.1. Результати статистичного опрацювання циклічних кардіосигналів (у медицині).....	295
5.4.2. Результати статистичного опрацювання циклічних процесів рельєфних утворень на поверхні металів (у механіці).....	297
5.4.3. Результати статистичного опрацювання циклічних економічних процесів (в економіці).....	300
5.5. Комп'ютерне моделювання циклічних сигналів із урахуванням їх оцінених ритмічних структур.....	302
5.5.1. Результати комп'ютерного моделювання циклічних кардіосигналів (у медицині).....	306
5.5.2. Результати комп'ютерного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень на поверхні металів (у механіці).....	307
5.5.3. Результати комп'ютерного моделювання циклічних економічних процесів (в економіці).....	309

5.5.4. Оцінювання точності методу комп'ютерного моделювання циклічних сигналів із урахуванням різних ритмічних структур. Похибки комп'ютерного моделювання циклічних сигналів.....	310
5.6. Метод перевірки статистичної гіпотези про належність досліджуваного сигналу до класу циклічних (метод верифікації циклічності).....	312
5.7. Висновки до п'ятого розділу.....	324
Розділ 6. Діагностичні та прогностичні ознаки в системах цифрової обробки даних. Комплекс комп'ютерних програм для опрацювання й комп'ютерного моделювання циклічних сигналів.....	326
6.1. Інформативні ознаки в системах обробки циклічних сигналів.....	326
6.1.1. Діагностичні ознаки в системах цифрової діагностики стану серця людини за електрокардіосигналами (у медицині).....	332
6.1.1.1. Діагностичні ознаки у вигляді перших двох коефіцієнтів розкладу оцінки математичного сподівання електрокардіосигналу у ряд Чебишева.....	333
6.1.1.2. Діагностичні ознаки у вигляді перших п'ятидесяти коефіцієнтів розкладу сумісних імовірнісних характеристик кореляційної функції та коваріаційної функції електрокардіосигналу у тригонометричні ряди.....	337
6.1.2. Діагностичні ознаки в системах цифрової діагностики стану поверхні металу за процесами рельєфних утворень, що виникають під силовим чи енергетичним впливом на неї (у механіці).....	340
6.1.3. Прогностичні ознаки в системах опрацювання циклічних економічних процесів (в економіці).....	344
6.2. Комплекс комп'ютерних програм для опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів.....	354
6.3. Висновки до шостого розділу.....	362
Висновки.....	365

Список використаних джерел.....	368
Додаток А. Системи відбору (системи відведень) та діагностичні зони електрокардіосигналу. Фрагменти електрокардіосигналів, які відповідають певним патологіям. Відомості про циклічні кардіосигнали, зокрема, магнітокардіосигнал, реокардіосигнал, фонокардіосигнал, синхронно зареєстровані кардіосигнали (полікардіосигнали) в автоматизованих комп'ютерних магнітокардіодіагностичних системах, існуючі методи їх дослідження та діагностичні ознаки.....	416
Додаток Б. Технологія дослідження стану поверхні металів.....	431
Додаток В. Відомі математичні моделі циклічних сигналів та явищ. Таблиця порівняння властивостей математичних моделей циклічних сигналів.....	438
Додаток Д. Відомі методи сегментації циклічних сигналів. Таблиця порівняння методів сегментації в системах цифрового опрацювання циклічних сигналів.....	479
Додаток Е. Аналіз науково-технічної області моделювання та опрацювання циклічних сигналів з позиції вживаних термінів та понять.....	532
Додаток Ж. Абстрактні циклічні функції з сегментною структурою як моделі циклічних сигналів.....	540
Додаток З. Деякі відомі підкласи випадкових процесів із циклічними ймовірнісними характеристиками.....	562
Додаток И. Приклади результатів сегментації різних циклічних сигналів розробленими методами.....	567
Додаток К. Аналітичні залежності для визначення коефіцієнтів у методі квадратичної інтерполяції на сегментах.....	571
Додаток Л. Основні відомості про передискретизацію циклічних сигналів.....	574
Додаток М. Основні відомості про статистичне опрацювання циклічних сигналів.....	580

Додаток Н. Застосування коефіцієнтів розкладу в різних базисах, як діагностичних ознак. Відомості про поліноми дискретного аргументу Чебишева, Кравчука та Лагера	590
Додаток П. Розклади одновимірних та двовимірних оцінок статистичних характеристик циклічних сигналів.....	596
Додаток Р. Фрагмент програми для сегментації детермінованих циклічних сигналів.....	613
Додаток С. Фрагмент програми для сегментації стохастичних циклічних сигналів.....	618
Додаток Т. Фрагмент програми для оцінювання ритмічної структури циклічного сигналу.....	624
Додаток У. Фрагмент програми для статистичного опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів.....	630
Додаток Ф. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	635
Додаток Х. Свідоцтва про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми.....	650
Додаток Ц. Акти впроваджень.....	657

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

A, A_k	– множина значень атрибуту, множини значень атрибутів, $p(\cdot) \in \mathbf{A}, p_k(\cdot) \in \mathbf{A}_k$
D_c	– множина відліків моментів часу чи просторових відліків, які відповідають межам сегментів-циклів (сегментна циклічна структура), $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$
D_z	– множина відліків моментів часу чи просторових відліків, які відповідають межам сегментів-зон (сегментна зонна структура), $\mathbf{D}_z = \{t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$
N	– множина натуральних чисел
R	– множина дійсних чисел
Z	– множина цілих чисел
Ω	– множина елементарних подій
Ψ	– область значень циклічної функції – моделі циклічного сигналу, лінійний простір, детермінований підхід ($\Psi = \mathbf{R}$), випадковий підхід ($\Psi = \mathbf{L}_2(\Omega, \mathbf{P})$)
D	– дискретна область визначення циклічної функції – моделі циклічного сигналу
W	– область визначення циклічної функції – моделі циклічного сигналу, неперервний сигнал ($\mathbf{W} = \mathbf{R}$), дискретний сигнал ($\mathbf{W} = \mathbf{D}$)
W_i	– області визначення <i>i</i> -го сегмента-циклу циклічної функції – моделі циклічного сигналу, $i = \overline{1, C}$, якщо $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, то $\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1}), i = \overline{1, C}$, якщо $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, то $\mathbf{W}_i = \{t_{i,l}, i = \overline{1, C}, l = \overline{1, L}\}$
W_j	– області визначення <i>j</i> -го сегмента-зони циклічної функції – моделі циклічного сигналу, $j = \overline{1, Z}$ в <i>i</i> -му сегменті-циклу,

якщо $\mathbf{W}=\mathbf{R}$, то $\mathbf{W}_j = [t_{j-1}, t_j)$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$, якщо $\mathbf{W}=\mathbf{D}$,
то $\mathbf{W}_{j,l} = \{t_{j,l}, l = \overline{1, L_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$

- $\mathbf{W}_w^c = \{\mathbf{W}_i \subset \mathbf{W}\}$ – розбиття області визначення \mathbf{W} на ізоморфні відносно порядку та атрибуту множини областей визначення i -х сегментів-циклів
- $\mathbf{W}_w^z = \{\mathbf{W}_j \subset \mathbf{W}\}$ – розбиття області визначення \mathbf{W} на ізоморфні відносно порядку та атрибуту множини областей визначення j -х сегментів-зон в i -х сегментах-циклах
- C – кількість сегментів-циклів циклічної функції – моделі циклічного сигналу
- f – позначення циклічного функціонального відношення (циклічної функції)
- $F(t), F(t_k)$ – загальне позначення неперервної чи дискретної циклічної функції, абстрактної циклічної функції – моделі циклічного сигналу, $F(t) \in \Psi$, $t \in \mathbf{W}$, $F(t_k) \in \Psi$, $t_k \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$, $k = \overline{1, K}$
- $f_d(t)$ – детермінований циклічний сигнал неперервного аргументу (модель – детермінована циклічна числова функція), $f_d(t) \in \mathbf{R}$, $t \in \mathbf{W}$
- $f_d(t_k)$ – детермінований циклічний сигнал дискретного аргументу (модель – детермінована циклічна числова функція), $f_d(t_k) \in \mathbf{R}$, $t_k \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$, $k = \overline{1, K}$
- i – номер сегмента-циклу, $i = \overline{1, C}$
- j – номер сегмента-зони у сегменті-циклі, $j = \overline{1, Z}$
- K – кількість дискретних відліків досліджуваного циклічного сигналу, $k = \overline{1, K}$
- L – кількість дискретних відліків на сегменті-циклі циклічного сигналу

L_j	– кількість дискретних відліків на j -му сегменті-зоні циклічного сигналу
$p(\cdot), p_k(\cdot)$	– загальне позначення атрибуту, множини атрибутів
T	– значення періоду циклічної функції – моделі циклічного сигналу, $T = const > 0$, (стабільний ритм), $n \cdot T$ – величина кратного періоду $n \in \mathbf{N}$
$T(t, n)$	– неперервна функція ритму циклічної функції – моделі циклічного сигналу, $t \in \mathbf{W}$, $n \in \mathbf{Z}$, (змінний ритм), при обчисленнях, в роботі, $n = 1$, $T(t, n) \neq n \cdot T$
$\hat{T}_i(t, 1)$	– множина інтерполяційних сегментів функції ритму для випадку ідентифікованої ритмічної циклічної структури, $i = \overline{1, C}$, $t \in \mathbf{W}$
$\hat{T}_j(t, 1)$	– множина інтерполяційних сегментів функції ритму для випадку ідентифікованої ритмічної зонної структури, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$, $t \in \mathbf{W}$
$\hat{T}(t_i, 1)$	– дискретна ритмічна циклічна структура для випадку ідентифікованої сегментної циклічної структури, $i = \overline{1, C}$, $t_i \in \mathbf{W}$
$\hat{T}(t_j, 1)$	– дискретна ритмічна зонна структура для випадку ідентифікованої сегментної зонної структури, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$, $t_j \in \mathbf{W}$
t	– відлік моменту часу неперервного циклічного сигналу, $t \in \mathbf{W}$
\hat{t}_i	– відлік моменту часу, що відповідає межі i -го сегмента-циклу
Z	– кількість сегментів-зон у кожному сегменті-циклі циклічної функції – моделі циклічного сигналу
$\xi(\omega, t)$	– випадковий (стохастичний) циклічний процес (сигнал),

- неперервного аргументу $\xi(\omega, t) \in \mathbf{L}_2(\Omega, \mathbf{P})$, $\omega \in \Omega$, $t \in \mathbf{W}$
- $\xi(\omega, t_k)$ – циклічний випадковий процес дискретного аргументу (модель стохастичного циклічного сигналу),
 $\xi(\omega, t_k) \in \mathbf{L}_2(\Omega, \mathbf{P})$, $\omega \in \Omega$, $t_k \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$, $k = \overline{1, K}$
- $\xi_\omega(t)$ – реалізація циклічного випадкового процесу неперервного аргументу (модель стохастичного циклічного сигналу), в роботі позначаються реалізації, переважно, кардіосигналів, $t \in \mathbf{W}$
- $\xi_\omega(t_k)$ – реалізація циклічного випадкового процесу дискретного аргументу (модель стохастичного циклічного сигналу), $t_k \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$, $k = \overline{1, K}$
- $h_\omega(l)$ – реалізація циклічного випадкового процесу рельєфних-утворень (переріз досліджуваної ділянки) на поверхні металу викликаних механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливом на неї, $l \in \mathbf{W}$
- $\gamma_\omega(t)$ – реалізація випадкового циклічного економічного процесу, $t \in \mathbf{W}$
- ω – елементарна подія
- $\hat{m}(t_k)$ – оцінка математичного сподівання циклічного випадкового процесу, дискретного аргументу
- $\hat{d}(t_k)$ – оцінка дисперсії циклічного випадкового процесу, дискретного аргументу
- $\hat{c}_\xi(t_1, t_2)$ – оцінка коваріаційної функції циклічного випадкового процесу
- $\hat{\tilde{c}}_\xi(t_{k_1}, t_{k_2})$ – оцінка коваріаційної функції циклічного випадкового процесу, дискретного аргументу (в межах першого циклу)
- $\hat{\tilde{c}}_\xi(t_{k_1}, t_{k_2})$ – оцінка коваріаційної функції випадкового процесу, дискретного аргументу (поза межами першого циклу)
- $\hat{r}_\xi(t_1, t_2)$ – оцінка кореляційної функції циклічного випадкового

	процесу
$\hat{r}_{\xi}(t_{k_1}, t_{k_2})$	– оцінка кореляційної функції циклічного випадкового процесу, дискретного аргументу (в межах першого циклу)
$\tilde{r}_{\xi}(t_{k_1}, t_{k_2})$	– оцінка кореляційної функції циклічного випадкового процесу, дискретного аргументу (поза межами першого циклу)
$I_{w_i}(t)$	– індикаторна функція, яка враховує області визначення i -го сегмента-циклу циклічної функції – моделі циклічного сигналу
$I_{w_j}(t)$	– індикаторна функція, яка враховує області визначення j -го сегмента-зони на i -му сегменті-циклі циклічної функції – моделі циклічного сигналу
$F_1(x;t)$	– одновимірна функція розподілу
$F_1(x_1, x_2; t_1, t_2)$	– двовимірна функція розподілу
$F_k(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k)$	– багатовимірна функція розподілу
$f_k(u_1, \dots, u_k; t_1, \dots, t_k)$	– багатовимірна характеристична функція розподілу
$\mathbf{D}\{\}$	– оператор дисперсії
$\mathbf{M}\{\}$	– оператор математичного сподівання
$\mathbf{P}\{\}$	– ймовірність випадкової події $\{\}$
ЕКС	– електрокардіосигнал (електрокардіограма)
ЕОМ	– електронна обчислювальна машина
КС	– кардіосигнал
КСВП	– кусково-стаціонарний випадковий процес
ЛВП	– лінійний випадковий процес
ЛПВП	– лінійний періодичний випадковий процес
МКС	– магнітокардіосигнал (магнітокардіограма)
ПЗ	– програмне забезпечення
ПК	– персональний комп'ютер
ПКВП	– періодично корельований випадковий процес

ПРВП	– періодично розподілений випадковий процес
РКС	– реокардіосигнал (реограма)
СКС	– сфігмокардіосигнал (сфігмограма)
ФКС	– фонокардіосигнал (фонокардіограма)
ЦВП	– циклічний випадковий процес
ЦС	– циклічний сигнал
$\mathbf{A} \Leftrightarrow \mathbf{B}$	– бієктивне відображення множин \mathbf{A} та \mathbf{B}
$a \leftrightarrow b$	– бієктивна пов'язаність елементів $a \in \mathbf{A}$ та $b \in \mathbf{B}$ ($\mathbf{A} \Leftrightarrow \mathbf{B}$)

ВСТУП

Актуальність теми. Швидкий розвиток інформаційних технологій сприяє більшому їх застосуванню в системах автоматизованого контролю, діагностики та прогнозування функціонального стану біологічних і технічних об'єктів. Побудова таких системи здійснюється на основі засобів обчислювальної техніки, які здійснюють цифрову обробку (опрацювання) сигналів, зокрема циклічних. Алгоритми та методи опрацювання циклічних сигналів (ЦС) створюються на базі їх математичних моделей. Напрямок таких досліджень є пріоритетним у розвитку науки й техніки в Україні та закордоном. Актуальним є розроблення й застосування інформаційних та комунікаційних технологій (технологій та засобів математичного моделювання, які дозволяють будувати ефективні автоматизовані системи цифрової діагностики та прогнозування стану біологічних і технічних джерел циклічних сигналів), що підвищують точність і достовірність отриманих результатів у порівнянні з відомими аналогами. Зростання вимог до ефективності автоматизованих систем опрацювання циклічних сигналів спричиняє необхідність їх розвитку й удосконалення.

Системи автоматизованого контролю, діагностики та прогнозування за ЦС розробляли та удосконалювали зарубіжні й вітчизняні вчені. Розвитком математичного забезпечення (моделей та методів) займались: Амосов М.М., Файнзильберг Л.С. – методи опрацювання циклічних сигналів (кардіосигналів) у фазовому просторі [317–319]; Воробйов С.А. – математичні моделі у вигляді ієрархічного багаторівневого випадкового процесу [60–68]; Яворський І.М., Хард Г.Л., Гарднер В.А., Драган Я.П., Яворський Б.І., Юзефович Р.М. – моделі у вигляді циклостаціонарних (періодично-корельованих) та майже циклостаціонарних (майже періодично-корельованих) випадкових процесів [109–120, 339–341, 367–374, 389, 390]; Марченко Б.Г., Приймак М.В., Щербак Л.М. – моделі у вигляді лінійних періодичних випадкових процесів, процесів із незалежними періодичними приростами, періодичні білі шуми [208, 209, 218, 219, 227–231, 234–236]; Лупенко С.А. – моделі у вигляді абстрактних циклічних

функціональних відношень [194–213]; Дрейфус Л., Кайсерес К., Кокс Ж, Пінскер І.Ш., Пан Дж., Томпкінс В. Дж, Мерфі І.С., Рангарадж М.Р., Рангайян Р.М. – частотно-часові методи опрацювання циклічних сигналів [70, 71, 148, 149, 287, 440, 445]; Дубровін В.І., Твердохліб Ю.В., Талмон Дж. Л., Вітек М.Л., Сахамбі Дж. С. – методи з використанням вейвлет-перетворень [121–123, 450, 457, 459]; Дуда Р.О., Рангайян М.Р., Валужис А.К., Лосинксне Л.В – методи з використанням нейронних мереж та методи аналізу структури циклічних сигналів на основі статистичних чи лінгвістичних підходів [45, 46, 124, 287].

Побудова ефективних систем цифрової обробки циклічних сигналів, перш за все, вимагає розвитку їх математичних моделей, це уможливорює розроблення нових методів, алгоритмів та програмного забезпечення на їх основі. З появою нових математичних моделей з'явилася можливість враховувати низку важливих властивостей реальних циклічних сигналів технічних та біологічних об'єктів. Зокрема, враховувати їх постійний чи змінний ритм, наявність повторюваної структури циклів та складових цих циклів. При цьому зріс запит на розроблення ефективних обчислювальних методів, які ґрунтуються на нових математичних моделях, у тому числі й на побудову методів, які дозволяють проводити ідентифікацію структур та параметрів цих математичних моделей.

З проведеного огляду літературних джерел виявлено низку недоліків у типових автоматизованих системах цифрового опрацювання циклічних сигналів, які пов'язані з їх математичним забезпеченням: по-перше неврахуванням у багатьох математичних моделях ЦС, відповідно і в методах їх опрацювання, повторюваної структури як циклів, так і їх складових – зон циклічних сигналів, що обмежує їх використання й не дозволяє здійснювати ідентифікацію їхньої структури; по-друге відсутність узагальненого підходу до розроблення методів сегментації (ідентифікації сегментних структур) циклічних сигналів з єдиних позицій, враховуючи їхні спільні властивості, обмежує їх розбудову; по-третє врахування в математичних моделях, відповідно і в методах переважно стабільного ритму (математичні моделі та методи, які враховують період), обмежує їх використання та не дає можливості ідентифікувати наявність змінного

ритму у досліджуваному циклічному сигналі. Такі недоліки є наслідком недостатньої розбудови математичного забезпечення систем автоматизованого опрацювання циклічних сигналів, що не дає змоги підвищити точність їх аналізу, діагностування чи прогнозування в автоматизованих системах цифрової обробки реальних циклічних сигналів технічних та біологічних об'єктів. Такі аргументи вказують на необхідність та актуальність створення теоретичних засад побудови нових методів опрацювання циклічних сигналів, які дозволять вирішити існуючу науково-прикладну проблему, що полягає в ідентифікації їх сегментних і ритмічних структур.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження проведено в рамках науково-дослідних робіт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, зокрема таких наукових тем: “Математичне моделювання, методи обробки та імітації біометричних циклічних сигналів в інформаційних системах”, номер держреєстрації №0106U009380; “Розробка математичного та програмного забезпечення інформаційних систем діагностики та аутентифікації людини за циклічними біометричними сигналами”, номер держреєстрації №0112U002203; “Розробка нового методу технічного діагностування стану зварних швів магістральних газопроводів на основі статистичного аналізу їх структурної неоднорідності”, номер держреєстрації №0117U002245.

Вклад автора в першу наукову тему полягає в проведеному порівняльному аналізі математичних моделей та розробленні методів сегментації циклічних сигналів, а також програмних засобів їх комп'ютерного моделювання. Вклад автора у другу наукову тему полягає в розробленні математичних засад методології сегментації, статистичної обробки та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів серця в кардіодіагностичних системах, розроблення комплексу комп'ютерних програм для їх опрацювання та моделювання. Вклад автора у третю тему полягає в обґрунтуванні та застосуванні математичної моделі циклічного випадкового процесу й методів статистичного опрацювання, а також методів сегментації для задачі технічного діагностування стану поверхні металів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розвиток теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів у напрямку створення нових методів ідентифікації їх сегментних та ритмічних структур, що підвищить точність їх опрацювання та комп'ютерного моделювання в автоматизованих системах цифрової обробки даних.

Досягнення цієї мети вимагає розв'язання таких завдань:

1. Провести порівняльний аналіз існуючих математичних моделей, точки зору їх адекватності, методів обробки, зокрема методів сегментації та оцінювання ритму циклічних сигналів з точки зору їх точності, достовірності й можливості використання їх як основи математичного забезпечення відповідних систем цифрової обробки даних.

2. Розробити узагальнений теоретико-методологічний підхід до вирішення проблеми ідентифікації сегментної структури циклічних сигналів зі змінним чи постійним ритмом, що становить собою методологію їх сегментації як основи для побудови нових методів опрацювання циклічних сигналів у рамках детермінованого та стохастичного підходів до їх моделювання.

3. Розробити систему нових методів сегментації (ідентифікації сегментних структур) детермінованих та стохастичних циклічних сигналів, ґрунтуючись на розробленій методології.

4. Розробити метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічних сигналів, ґрунтуючись на попередньо розроблених методах сегментації детермінованих та стохастичних циклічних сигналів, що дасть змогу підвищити точність методів їх опрацювання та комп'ютерного моделювання.

5. Розробити метод верифікації математичних моделей циклічних сигналів на основі перевірки гіпотези про належність досліджуваного сигналу до класу циклічних, що дозволить коректно застосовувати розроблені у дисертаційній роботі методи ідентифікації сегментних та ритмічних структур.

6. Провести серію експериментів для встановлення фактів, які підтверджують підвищення точності методів опрацювання циклічних сигналів, зокрема дискретизації, статистичної обробки та комп'ютерного моделювання за

рахунок нових, розроблених у роботі методів ідентифікації сегментних і ритмічних структур.

7. Обґрунтувати математичну модель циклічного процесу рельєфних утворень на поверхні металів, викликаних механічним або лазерним ударно-хвильовим впливом на неї для задачі оцінювання її технічного стану у вигляді циклічного випадкового процесу із сегментною структурою.

8. Розробити та впровадити комплекс комп'ютерних програм для сегментації (ідентифікації сегментних структур), оцінювання ритмічних структур, статистичної обробки та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів у медицині, механіці та економіці, а саме, кардіосигналів різної фізичної природи, механічних процесів поверхні рельєфних утворень, економічних циклічних процесів, на основі яких провести апробацію розроблених у роботі методів та основних положень дисертаційного дослідження.

Об'єкт дослідження: процес ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів у системах цифрової обробки даних.

Предмет дослідження: математичні моделі (стохастичні, детерміновані), методи сегментації (ідентифікації сегментних структур), методи оцінювання ритмічних структур та методи комп'ютерного моделювання циклічних сигналів у системах цифрової обробки даних.

Методи дослідження: методи теорії циклічних функціональних відношень (циклічних функцій), методи теорії випадкових процесів, методи математичної статистики, методи функціонального аналізу, методи пошуку розладки випадкових процесів, методи інтерполяції функцій, метод найменших квадратів, методи розкладу функцій в ряди по ортогональних базисах, методи комп'ютерного моделювання сигналів і систем.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Уперше розроблено методологію сегментації циклічних сигналів, на основі теорії циклічних функціональних відношень, що дало змогу з єдиних теоретико-прикладних позицій побудувати низку нових методів ідентифікації сегментної та ритмічної структур детермінованих та стохастичних циклічних

сигналів у автоматизованих системах їх цифрового опрацювання.

2. Уперше розроблено систему нових, узгоджених між собою методів ідентифікації сегментних структур детермінованих і стохастичних циклічних сигналів завдяки розробленій методології, що дало змогу підвищити точність методів у порівнянні з відомими аналогами.

3. Удосконалено метод ідентифікації ритмічної структури циклічних сигналів завдяки врахуванню попередньо ідентифікованої сегментної структури з підвищеною точністю та за рахунок використання методів інтерполяції квадратичним чи кубічним сплайном, що дало змогу підвищити точність методів опрацювання, зокрема методів дискретизації, статистичної обробки та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів у порівнянні з відомим методом ідентифікації ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції.

4. Вперше розроблено метод адаптивної ідентифікації ритмічних структур циклічних сигналів завдяки використанню в його складі розроблених методів, зокрема методу визначення додаткових елементів ритмічної структури та методу визначення оптимального полінома на відповідному сегменті досліджуваного циклічного сигналу, що дало змогу підвищити точність ідентифікації ритмічної структури циклічних сигналів.

5. Вперше розроблено метод верифікації моделей циклічних сигналів, що дозволило коректно та адекватно застосовувати розроблені у дисертаційній роботі методи ідентифікації сегментних та ритмічних структур циклічних сигналів у автоматизованих системах кардіодіагностики, системах технічного діагностування стану поверхні металів та інформаційних системах аналізу й прогнозування циклічних економічних процесів.

6. Вперше обґрунтовано математичну модель, методи статистичного опрацювання та комп'ютерного моделювання процесу рельєфних утворень на поверхні металів, зумовленого механічним або лазерним ударно-хвильовим впливом на неї як циклічного випадкового процесу з сегментною структурою, що дало змогу підвищити точність їх технічного діагностування та комп'ютерного моделювання процесів рельєфних утворень.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені математичні засоби ідентифікації сегментних і ритмічних структур дозволяють підвищити точність методів статистичного опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів. Вони призначені для використання в ефективних автоматизованих системах цифрової обробки даних, зокрема в діагностичних та прогностичних комплексах як складові її спеціалізованого програмного забезпечення для проведення кардіодіагностики, технічного діагностування стану поверхні металів, аналізу та прогнозування економічних циклів. Також вони придатні для використання як складові в програмно-апаратних системах для проведення науково-експериментальних досліджень.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у вигляді комплексу комп'ютерних програм у цілому або його складових для проведення сегментації, оцінювання ритму, статистичного опрацювання, формування інформативних ознак та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів серця в діагностичних комплексах серії «CARDIO» спільного українсько-німецького ТОВ «МІДА» (м. Київ), у медичному центрі ТОВ «МЕВІЗ» (м. Тернопіль). Також результати впроваджені у вигляді комплексу комп'ютерних програм та його складових на кафедрах медичної інформатики й медичної фізики діагностичного та лікувального обладнання Тернопільського державного медичного університету імені І.Я. Горбачевського. Окремі комп'ютерні програми для аналізу та моделювання циклічних сигналів впроваджено в навчальний процес на кафедрах комп'ютерних наук, автоматизації технологічних процесів і виробництв та менеджменту у виробничій сфері Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. На впровадженій комплекс програм отримано сім свідоцтв про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які становлять основний зміст дисертації, автор отримав особисто. В наукових працях, опублікованих із співавторами, автору дисертації належать: у [48, 147, 163, 167, 213, 214] – розробка програмно-алгоритмічного забезпечення методів статистичного опрацювання циклічних сигналів із урахуванням їх спільної ритмічної структури;

у [192, 193, 203]] – програмно-алгоритмічне забезпечення методів сумісного статистичного опрацювання циклічних сигналів із урахуванням їх спільної ритмічної структури; у [168, 171, 177, 427] розробка програмно-алгоритмічних складових програмного комплексу, обґрунтування діагностичних ознак та проведення розкладів статистичних оцінок, отриманих із урахуванням функції ритму, циклічних сигналів у ряди Чебишева; у [92, 169, 175] – алгоритмічне забезпечення методів комп’ютерного моделювання циклічних сигналів із урахуванням їх спільної ритмічної структури; у [91, 126] – розробка теоретичних засад побудови методів прогнозування циклічних процесів; у [80, 81, 174, 348, 349, 413, 414, 416, 417, 422, 424, 428, 431, 430, 446] – обґрунтування математичної моделі, формування теоретичних засад опрацювання: сегментації, статистичного опрацювання та комп’ютерного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень на поверхні металів та обґрунтування їх діагностичних ознак; у [47] – обґрунтування математичної моделі циклів сонячної активності; у [418] – формулювання постановки проблеми сегментації циклічних сигналів та обґрунтування підходів до її вирішення; у [164, 419–421] – розробка математичного забезпечення методів оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів; у [176, 179, 415] – розробка методу сегментації детермінованих циклічних сигналів; у [170–173, 426] – розробка методів сегментації випадкових циклічних сигналів; у [180–182, 425] – розробка математичного забезпечення методу аналізу руйнування труби газопроводу із урахуванням трендової компоненти у вигляді поліноміальної функції; у [165] – розробка методу верифікації математичних моделей циклічних сигналів; у [166] – розробка основ побудови методів (методології) сегментації циклічних сигналів; у [74, 75, 178, 293–297, 387, 423] – розробка алгоритмічного та програмного забезпечення для опрацювання циклічних сигналів; у [298, 299] – розробка алгоритмічного та програмного забезпечення методів сегментації детермінованих і стохастичних циклічних сигналів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи апробовано на наукових конференціях Тернопільського державного технічного

університету імені І. Пулюя (м. Тернопіль, 2006–2009 р.), на V Міжнародній науково-практичній конференції «Kluczowe Aspekty Naukowej Dzialalnosci – 2010» (м. Перемишль, 2010), міжнародних науково-практичних конференціях «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя (м. Тернопіль, 2010, 2018), на науковій конференції «Природничі та інформаційні технології», ТНТУ-2010 (м. Тернопіль, 2010), на I, III, V науково-технічних конференціях «Інформаційні моделі, системи та технології» (м. Тернопіль, 2011, 2013, 2018), на XV, XIX наукових конференціях Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя (м. Тернопіль, 2011, 2016), на XIX Міжнародній конференції «International Conference Problems of Decision Making Under Uncertainties», PDMU-2012 (м. Мукачево, 2012), на XI Міжнародній конференції «International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science», TCSET-2012 (м. Львів-Славськ, 2012), на десятій Міжнародній конференції «International Symposium of Croatian Metallurgical Society», SHMD-2012, (с. Shibenk, Croatia, 2012), на Міжнародній конференції «International Symposium on Operational Research and Applications», ISORAP-2013 (с. Marrakech, Марокко, 2013), на XXI Міжнародній конференції «International Conference Problems of Decision Making Under Uncertainties», PDMU-2013 (м. Східниця, 2013), на II, III всеукраїнських науково-технічних конференціях «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» (м. Тернопіль, 2015, 2017), на Міжнародній конференції «International Symposium Aircraft Materials», АСМА-2016 (с. Agadir, Марокко, 2016), на V Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2016), на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика 2017» (м. Івано-Франківськ, 2017), на IV Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», ВКДТС-2017 (м. Вінниця, 2017), на Міжнародній конференції «Projekt interdyscyplarny projektem XXI wieku» (с. Bielsko-Biala, 2017). У цілому робота доповідалася та обговорювалася на: наукових семінарах кафедр комп'ютерних

наук, комп'ютерних систем та мереж Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя; науковому семінарі Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя; розширеному семінарі кафедри прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування й Навчально-наукового інституту автоматики, кібернетики та обчислювальної техніки (м. Рівне); науковому семінарі відділу моніторингу та оптимізації теплофізичних процесів Інституту технічної теплофізики НАН України (м. Київ); науковому семінарі лабораторії вібродіагностики Фізико-механічного інституту імені Г.В. Карпенка НАН України (м. Львів). На всіх зазначених семінарах робота отримала позитивну оцінку.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 64 наукових працях, із них 27 – у фахових наукових періодичних виданнях України та закордоном (6 – без співавторів), 9 наукових праць проіндексовані у міжнародній науково-метричній базі Scopus, 4 наукові праці – у науково-метричній базі Index Copernicus, 27 праць задовольняють вимоги МОН України щодо публікації результатів дисертаційних робіт у фахових наукових виданнях, 30 – матеріали наукових конференцій. Отримано 7 свідоцтв реєстрації авторського права на комп'ютерні програми.

РОЗДІЛ 1

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ОПРАЦЮВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ У СИСТЕМАХ ЇХ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ

(ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ)

У цьому розділі на основі огляду літературних джерел проведено аналіз існуючих систем цифрової обробки циклічних сигналів різної фізичної природи та структури, їх математичних моделей з точки зору адекватності та методів опрацювання, зокрема методів сегментації, стосовно точності, достовірності й інформативності отриманих на їх основі діагностичних чи прогностичних ознак. Які використовуються в системах діагностики: в медицині – під час діагностики стану серця людини; в механіці – під час аналізу процесів рельєфних утворень на поверхні металів та в системах прогнозу, циклічних економічних процесів – під час їх аналізу та прогнозування. Наведено науково-технічні проблеми, зокрема проблему ідентифікації сегментних та ритмічних структур циклічних сигналів, що виникає під час їх автоматизованого опрацювання в системах цифрової обробки. Враховуючи проведений огляд та порівняльний аналіз, математичних моделей обґрунтована – модель у вигляді циклічної функції. Сформульовані вимоги до методів сегментації (ідентифікації сегментних структур) та методів ідентифікації ритмічних структур, які і визначають напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Основні результати першого розділу опубліковано в роботах [47, 48, 74, 75, 126, 173, 178, 418, 430].

1.1. Циклічні сигнали в системах цифрової обробки даних та процес ідентифікації їх сегментних структур (об'єкт дослідження)

Існування різноманітних коливних явищ та циклічних сигналів у багатьох галузях науки й техніки зумовлює актуальність їх опрацювання, аналізу та моделювання. Наприклад, до циклічних явищ належить чергування пір року, дня і ночі, магнітні бурі, біоритми людини, самоорганізаційні процеси в структурі

поверхні металів викликаних механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливами на неї, робота серця людини, дихальний процес, астрономічні явища, різні процеси в економіці, а також багато інших [47, 48, 80, 147, 190, 418]. Циклічні сигнали, які реєструються відображають, як розгортається у часі або просторі циклічне явище чи процес, вони характеризуються ритмом і мають виражену повторювану циклічну структуру. Така структура відображає у часі чи просторі (поверхні металів) стадії (етапи) розгортання циклічного процесу чи явища і містить діагностичну інформацію про стан системи, яка формує такий циклічний сигнал [1]. Тому в багатьох задачах опрацювання циклічних сигналів першочерговою процедурою є їх розбиття на певні ділянки (фрагменти, сегменти) для їх «прицільного» дослідження та проведення об'єктивного, достовірного аналізу [1-3, 205]. Зокрема, ці задачі виникають під час опрацювання кардіосигналів (КС) у медицині при проведенні діагностики стану серця людини з метою отримання інформація про морфологічні та ритмічні характеристики циклічних сигналів, а також під час аналізу циклічних економічних процесів чи інших сигналів, які розгортаючись у часі відображають повторювану циклічну структуру. Сегментна структура циклічних сигналів, що при цьому визначається методами сегментації, є дуже різноманітна і відображає стадії (етапи) фазової роботи досліджуваної системи чи її підсистем [1-3, 50, 53, 70, 71]. Відомості про сегментну структуру дозволяють оцінювати ритм (ідентифікувати ритмічну структуру) циклічного сигналу [196, 205]. Тому, визначення циклічної структури, притаманної всім циклічним сигналам, а також визначення наявності в межах циклів їх складових сегментів, які несуть важливу діагностичну інформацію, оскільки відповідають стадіям роботи підсистем такої системи, та подальший процес ідентифікації такої сегментної структури та відповідної їй ритмічної структури і є об'єктом дослідження даної дисертаційної роботи. Вирішення проблеми ідентифікації сегментної та ритмічної структури ЦС дає можливість проводити точний, об'єктивний та достовірний їх аналіз в автоматизованих системах цифрової обробки.

Розглянемо циклічні сигнали в різних галузях науки, техніки та медицини,

методи їх опрацювання в автоматизованих системах цифрової обробки та діагностичні ознаки, які в них використовуються.

1.1.1. Циклічні кардіосигнали. Комп'ютерні системи діагностики функціонального стану серцево-судинної системи людини. Відомо, що під час роботи серце людини генерує сигнали різної фізичної природи (електричної, акустичної, магнітної та іншої) [1-3]. На сьогодні існує велика кількість різноманітних методів дослідження його функціонального стану, розроблено велику кількість діагностичних приладів та систем, які засновані на різних методах дослідження. До технічних пристроїв та систем, які реєструють та дозволяють досліджувати циклічні КС належать такі: електрокардіографи, векторкардіографи, магнетометри, фонокардіографи, балістокардіографи та багато інших [1-3, 15, 41, 50, 53, 70, 71, 93, 145, 148, 185, 264, 331, 332]. Серед великої кількості кардіосигналів, які реєструються сучасними діагностичними системами і досліджуються багатьма науковцями та лікарями в різних країнах світу, належить: електрокардіосигнал (ЕКС), векторкардіосигнал, магнітокардіосигнал (МКС), фонокардіосигнал (ФКС), реокардіосигнал (РКС), балістокардіосигнал та інші [1, 7, 12, 27, 102, 105, 148, 149, 222, 238, 268, 269, 329]. Найбільш дослідженим та високоінформативним сигналом з точки зору діагностики стану серця є електрокардіосигнал, він відображає електричну діяльність серця людини, а метод дослідження його стану став одним із стандартних (усталених) у медичних закладах.

Розглянемо методи дослідження стану серцево-судинної системи людини, а також діагностичні ознаки КС, що реєструються в системах цифрової обробки циклічних сигналів.

1.1.1.1. Електрокардіосигнал. Автоматизовані комп'ютерні електрокардіодіагностичні системи, існуючі методи дослідження електрокардіосигналів та діагностичні ознаки. Існує велика кількість діагностичних систем, які використовуються у кардіодіагностичній практиці. Серед відомих, сучасних систем слід назвати такі: «CARDIO», «CARDIOLAB+», «КАРДІО+», «ВАЛЕНТА ЕКГ», «КАРДІОЛАБ+ФОНО», «КАРДИОСЕНС АД»,

«ЮКАРД 100», «FUKUDA DENSHI CARDIMAX FX326», «FUKUDA DENSHI CARDIMAX FX-7102» та багато інших.

Побудова сучасної електрокардіодіагностичної апаратури, може бути подана, типовою структурною схемою. В такій структурній схемі аналоговий електрокардіосигнал, надходить з електродів, які розміщені на поверхні тіла пацієнта (від систем різних відведень, див. додаток А, підпункт А.1), у блок підсилення та перетворення (блок попереднього опрацювання), там він підсилюється, проходить попередню фільтрацію від завад та перетворюється у цифровий сигнал [185]. Цифровий електрокардіосигнал (ЕКС) надходить у блок опрацювання, в якості якого, як правило, використовується ЕОМ [1, 8, 31]. Після проведеного опрацювання, яке реалізується спеціалізованим програмним забезпеченням (ПЗ), на екрані монітора відображається інформація – зареєстрований ЕКС, виміряні його параметри (значення тривалостей сегментів, значення амплітуд сегментів та інші) й попередній діагностичний висновок про функціональний стан серця (сформований за допомогою програмних алгоритмів). Лікар-кардіолог за необхідності доповнює виданий такою системою діагностичний висновок [185].

Приклад типового циклічного електрокардіосигналу наведено на рисунку 1.1, пунктирними лініями зображено межі циклів серцевих скорочень (дрібніші сегменти в межах циклів позначені).

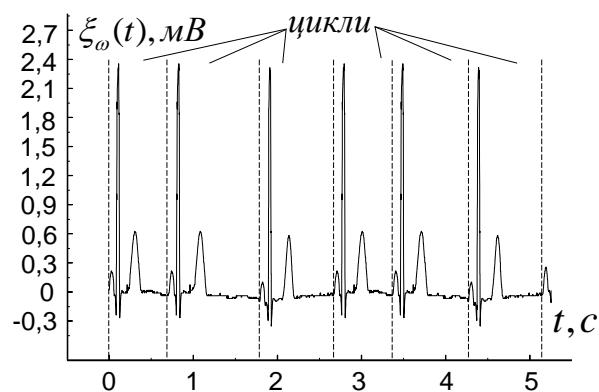


Рис. 1.1. Реалізація циклічного сигналу (електрокардіосигнал)

Розглянемо особливості структури циклічного електрокардіосигналу, які є

ключовими при проведенні автоматизованої діагностики. Відомо, що за тривалий період медичних досліджень лікарями-діагностами було встановлено межі амплітуд і тривалостей діагностичних сегментів (зон, ділянок, фрагментів ЕКС) для умовно здорової людини, тобто людини без явних серцевих захворювань [1, 292]. Ідеалізований електрокардіосигнал [1] та досліджені співвідношення тривалостей діагностичних зон наведено на рисунку 1.2.

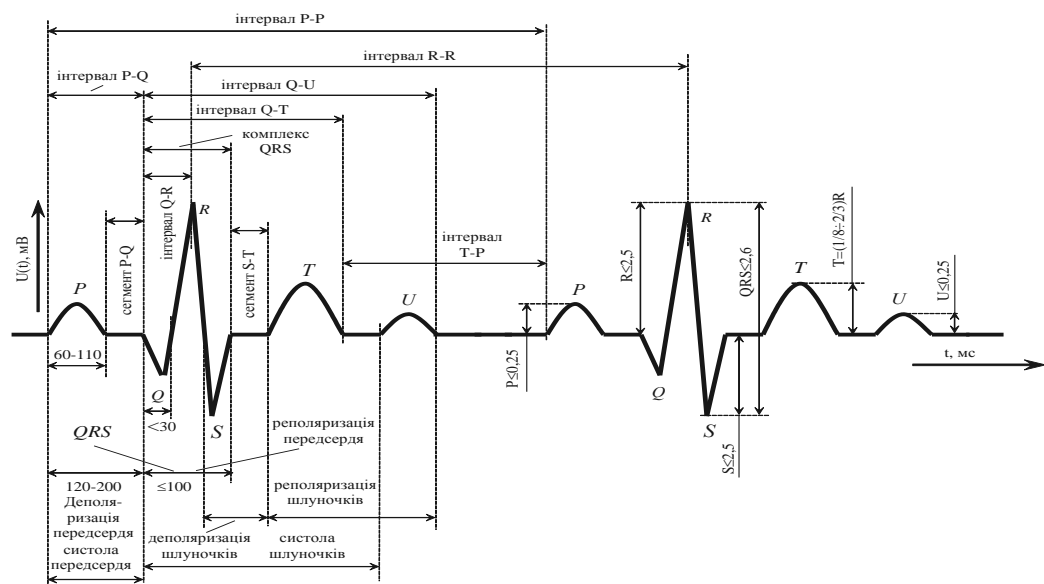


Рис. 1.2. Схематичне зображення ідеалізованого ЕКС з позначеннями меж амплітуд і тривалостей діагностичних сегментів (зон), [1]

Для лікарів-діагностів найбільш інформативною є ділянка електричної активності серця, яка відображає етапи (фази) скорочення серця і складається з діагностичних сегментів (зон), які розміщені в часі одна за одною [1]. Такі сегменти (зони) прийнято позначати, в лікарській практиці, літерами P, Q, R, S, T, U (позначення запропонував Ейнтховен), кожна зона характеризує електричну активність різних відділів серця [1, 185]. Додаткова інформація про діагностичні сегменти (зони) ЕКС наведено у додатку А., підпункт А.2.

Результатом проведення аналізу ЕКС є отримання даних: якісних та кількісних показників. При якісному оцінюванні проводиться інтерпретація форми (так званий морфологічний аналіз) при цьому виявляються QRS-комплекси

(зони Q, R, S) в усіх відведеннях за загальноприйнятими в лікарській практиці позначеннями: qRs, qR, RS, QS та іншими [1, 102, 177, 185, 329]. При кількісному оцінюванні проводиться вимірювання показників амплітуд і тривалостей виявлених сегментів (зубців, зон Q, R, S), обчислені коефіцієнтів: Q/R, R/S та інших [1, 177, 185, 268, 329].

При використанні детермінованого підходу, діагностичними ознаками є: кривизна ліній зубців, інтервали (тривалості) хвиль (зубців, зон) та комплексів, амплітуди зубців, площі під зубцями, кут нахилу хвилі P, QRS-комплексу та інші [1, 102, 135, 177, 185, 329]. При використанні стохастичного підходу коли застосовуються статистичних методи опрацювання ЕКС, діагностичними ознаками є усереднені значення відповідних характерних елементів ЕКС, що виміряні в кількох серцевих циклах, наприклад, тривалості зубців, комплексів тощо [185]. Крім цього, діагностичними ознаками при такому підході є середня тривалість R-R інтервалу, дисперсія R-R інтервалу, коефіцієнт асиметрії, ексцесу, коефіцієнт варіації, амплітуда моди та інші [69, 73, 177, 185, 186, 329].

Під час аналізу QRS комплексу, сегментів (зон) P, T обчислюють відповідні площі над та під ізопотенціальною лінією (ділянка сигналу, на якій різниця електричних потенціалів дорівнює нулю, див. рис. 1.2). Визначають швидкість зміни ЕКС у межах QRS-комплексу. Для цього використовують різницеві функції певних порядків. Швидкість зміни хвилі T обчислюють як відношення амплітуди хвилі до часу половини її тривалості. Перелічені діагностичні показники це не повний перелік різноманітних діагностичних ознак, які використовуються в сучасних автоматизованих кардіодіагностичних системах цифрової обробки циклічних сигналів [185].

На основі аналізу отриманих діагностичних ознак приймається заключний висновок (лікарем чи спеціалізованим програмними алгоритмами) про стан та роботу серця, який поділяють на дві частини, згідно робіт [20, 102, 105, 135, 148, 149, 177, 185, 268, 329]:

1. Перша частина діагностичного висновку (діагнозу) полягає у характеристиці морфологічних особливостей форми серцевих циклів ЕКС (даний

висновок формується методами морфоаналізу, контурного аналізу циклів ЕКС), і ставить своїм завданням опис стану робочої м'язової тканини серця. Морфоаналіз дозволяє виявляти: передній, задній та перетинковий інфаркти, гіпертрофію правого і лівого шлуночків, блокаду пучків Гіса, емфізему, порушення складу крові та інше [20, 102, 105, 135, 148, 185, 268, 329].

2. Друга частина діагностичного висновку полягає у характеристиці ритмічних особливостей ЕКС, тобто характеристиці ритму скорочення серця (даний висновок формується методами аналізу ритму), який отримується на визначенні розміщення та частоти збудження водіїв ритму серця і характеру поширення імпульсу збудження по спеціалізованій провідниковій системі. Аналіз ритму дозволяє виявляти: тремтіння передсердь, синусову тахікардію, брадикардію та аритмію, блокаду товарового плеча, атріовентрикулярну блокаду та інші порушення серцевого ритму [20, 102, 105, 135, 148, 185, 268, 329].

У додатку А, підпункт А.3 наведено фрагменти електрокардіосигналів, форма діагностичних сегментів (циклів та зон) яких відповідає певним патологіям.

Сучасні методи автоматизованої комп'ютерної діагностики в цифрових системах обробки циклічних сигналів зводяться до таких основних етапів [50, 185]:

- виділення (сегментація), базових, елементів ЕКС (діагностичних сегментів, циклів, зон);
- розпізнавання виділених сегментів ЕКС;
- визначення морфологічних та ритмічних діагностичних ознак на основі виділених сегментів;
- проведення діагностики за отриманими ознаками з використанням систем розпізнавання біомедичних образів.

Перший етап є дуже важливим, оскільки передбачає виділення сегментів-циклів (див. рис. 1.1). Також при цьому на кожному серцевому циклі виділяють ділянки сигналу, які репрезентують хвилі, зони, комплекси та інші графоелементи, які мають діагностичне значення. Від правильності визначення

меж сегментів (циклів та зон) значною мірою залежить остаточний результат діагностики. Слід зазначити, що в даній роботі не ставиться акцент на етап попередньої обробки (попереднього опрацювання) циклічних кардіосигналів, зокрема ЕКС (фільтрації, вилучення тренду тощо, [75, 178, 287]), оскільки методи, які використовуються на етапі попереднього опрацювання циклічних сигналів, є відомими й добре вивченими і тому не були метою розгляду даної дисертаційної роботи.

З проведеного огляду особливостей структури циклічного ЕКС слідує, що в такому сигналі суттєво змінюється форма, амплітуда та тривалості діагностичних сегментів (циклів та зон). Крім цього, не всі типові діагностичні сегменти (зони) можуть спостерігатись у кардіоциклі (в деяких випадках не явно виражена чи відсутня характерна для ЕКС зона R, або на одному циклі є їх декілька). Таким чином структура циклу ЕКС суттєво різниться, що характеризує певні патології. Такі особливості структури ЕКС ускладнюють побудову комп'ютерних алгоритмів його автоматизованого опрацювання, зокрема формує труднощі сегментації та подальшого аналізу сегментної структури.

У додатку А наведено огляд автоматизованих кардіодіагностичних систем та кардіосигналів (див. пункти А.4-А.7. додатка А), існуючі методи їх дослідження та діагностичні ознаки, зокрема розглянуті такі циклічні сигнали: магнітокардіосигнал, реокардіосигнал, фонокардіосигнал, синхронно зареєстровані кардіосигнали (полікардіосигнали).

1.1.1.2. Математичні моделі, які використовуються в автоматизованих комп'ютерних системах цифрової обробки кардіосигналів. Підсумовуючи огляд різних кардіосигналів та їх автоматизоване, комп'ютерне опрацювання в цифрових системах діагностики функціонального стану серцево-судинної системи людини відзначимо науковців, які займалися дослідженням, опрацюванням та моделюванням циклічних сигналів серця й внесли значний вклад у розвиток та створення математичного забезпечення (математичних моделей та методів їх опрацювання) в кардіодіагностичних системах. Серед іноземних науковців: Бол [222], Бергер [355], Фойт О. [365], Гарріс Ф. [385], Каплан Д. [399], Кауфман У.

[400], МакКьюзік В. [438], Талбот С. [438], Вебб Г. [438], Макфі [222], Агарвал [361], Дрейфус Л. [361, 71], Ботвінік Е. [361], Кайсерес Ц. [71], Кайсерес К. [139], Дж. Дрейфус [139], Кокс Ж. [148, 149], Нолл Ф. [149], Артур Р. [149]. Також науковців, які працювали, на теренах СНД: Ахутін В. [10], Богдановський Э. [10], Шкапин Б. [10], Белоусов В. [20], Баєвський Р.М. [13, 14], Баум О. [16], Дубровін Д. [16], Беркутов А.М. [24], Гуржин С. Г. [24], Дунаєв А.А. [24], Прошин Е.М. [24], Булигін В.П. [41], Васанов Т.Б. [41], Лобанов Д.А. [41], Пирвердієв Ч.А. [41], Смірнов В.Ю. [41], Федоров С.И. [41], Харатьян Е.И. [41], Чепайкін А.Г. [41], Воробйов С.А. [60–65], Воскресенський А.Д. [69], Габінський Я.Л. [73], Гуревич М.Б. [95], Клочков В.А. [145, 146], Маліновський Л.Г. [223], Перельмутова М.В. [263], Піпбергер Х. [264], Рагозін А.Н. [285, 286], Сидоренко Г.І. [304], Шакін В.В. [330, 331, 332], Чирейкін Л.В. [329], Шуригін Д.Я. [329], Лабутін В.К. [329]. Сучасні вітчизняні науковці – Драган Я.П. [110–120], Лупенко С.А. [196–206], Лозінська Є.В. [216–219], Млинко Б.Б. [243], Осухівська Г.М. [257, 258], Сверстюк А.С. [292, 258], Файнзильберг Л.С. [317–319], Федорів Р.Ф. [320], Щербак Л.М. [186, 190, 218, 219], Яворський Б.І. [111, 119], Яворський І.М. [113, 118], Яворська Є.Б. [342, 343] та ін.

За багато років наукових досліджень циклічних сигналів серця в побудованих комп'ютерних кардіодіагностичних системах було створено багато методів їх опрацювання та математичних моделей. Для побудови математичних моделей використовують два підходи – детермінований та стохастичний. В якості стохастичних математичних моделей використовують вектор випадкових величин, випадкові періодичні процеси, лінійні періодичні випадкові процеси, періодично корельовані випадкові процеси, циклічні випадкові процеси та інші. В якості детермінованих математичних моделей використовують детерміновані функції, які описують форму одного циклу, періодичні та майже періодичні функції й інші.

У роботах автора [186, 187, 189] та його кандидатській дисертації [185] побудовано стохастичну математичну модель циклічного електрокардіосигналу у вигляді випадкового процесу з періодичними ймовірнісними характеристиками.

Дана модель враховує стохастичність та повторювану циклічну структуру (зонно-часову структуру), проте не враховує особливості мінливості, змінності ритму ЕКС, оскільки в модель закладається інформація лише про постійність, періодичність його ритму, що унеможлиблює опрацювання ЕКС з патологіями, які проявляються у змінності ритму ЕКС (наприклад, аритмія, тахікардія, брадикардія). Тому дана модель обмежено описує ритмічну структуру електрокардіосигналу, а також не враховує стохастичних зв'язків між різними циклами електрокардіосигналу, оскільки в моделі припускається, що цикли в такій структурі стохастично незалежні. Крім цього, запропонована в роботі [185] математична модель не дає можливості проводити паралельне опрацювання синхронно зареєстрованих кардіосигналів іншої фізичної природи (відмінної від електричної), що зумовлено врахуванням в методах опрацювання та в математичній моделі специфічної структури, притаманної лише ЕКС. Тому власне вона виключає можливість одночасного статистичного опрацювання різних кардіосигналів.

Під час аналізу циклічних сигналів різної фізичної природи (на феноменологічному рівні), виявлено низку їх спільних особливостей. Спільність їх особливостей, полягає у наявності повторюваної циклічної структури та наявності складових сегментів в межах циклів такої структури, крім цього розгортаючись у часі циклічні сигнали характеризуються постійним чи змінним ритмом. Їх відмінності полягають у різноманітності їх форми (морфологічні особливості) навіть циклічних сигналів одного типу, у яких відсутні ознаки патологій (тобто сигнали в нормі). Крім цього різноманітна структура характерна для циклічних сигналів з патологічними ознаками, навіть якщо не враховувати присутність у них артефактів, зумовлених різними завадами (біологічного та технічного походження) [1, 287]. Тому при побудові нових математичних моделей в них має закладатись інформація про стохастичність таких циклічних сигналів, оскільки вони характеризуються суттєвою зміною форми, амплітуди й тривалості діагностичних сегментів та інформація про змінність чи постійність їх ритму. Врахування таких особливостей ускладнює побудову методів автоматизованого

опрацювання, зокрема методів сегментації внаслідок неврахування чи часткового врахування у відомих моделях і відповідно методах інформації про їх повторювану структуру, яка відображається на циклах та діагностичних сегментах-зонах. Крім цього, існування великої кількості різноманітних діагностичних ознак (виходячи з різних методів опрацювання циклічних сигналів) у різних автоматизованих діагностичних системах (наприклад, площі під фрагментами зубців, кривизна наростання хвилі та багато інших), які є відмінні від типових, уніфікованих, прийнятих у лікарській практиці діагностичних ознак при традиційному підході дослідження КС ускладнюють можливість використання таких систем при створенні об'єднаних мереж діагностичних комплексів у задачах телемедицини.

Опрацювання різних за фізичною природою циклічних кардіосигналів з єдиних позицій в рамках узгоджених моделей дозволить адекватно описувати циклічні сигнали, джерелом яких є один об'єкт – серце людини. При такому підході необхідно, щоб математична модель врахувала морфологічні характеристики та характеристики ритму різноманітних кардіосигналів. А розбудова методів опрацювання, які ґрунтуються на класі математичних моделей і які враховують ритмічні та морфологічні характеристики й параметри, дозволить підвищити точність методів та інформативність діагностичних ознак, що в цілому підвищить достовірність автоматизованої діагностики. Розбудова таких методів є актуальним завданням телемедицини, яка є новим, перспективним напрямком досліджень сучасної медицини. У ній поєднуються сучасні інформаційні технології з відомими методами автоматизованого аналізу та досліджень кардіосигналів різної фізичної природи.

Також під час огляду літературних джерел встановлено, що в різних областях медичних досліджень та наукових статтях не медичного, а технічного спрямування вживається різна термінологія одних і тих же самих понять. Наприклад, для різних циклічних сигналів вживають поняття: хвилі, зони, викиди, піки, графоелементи і т.п. Тому в роботі здійснено аналіз понятійно-термінологічної бази з метою виокремлення термінологічного апарату, який буде

вживатися в рамках даного дисертаційного дослідження, результати проведеного аналізу наведені у додатку Е.

1.1.2. Циклічні процеси рельєфних утворень на поверхні металів викликані механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливом на неї, їх математичні моделі. Комп'ютерні системи дослідження й технічного діагностування стану поверхні металів. Для дослідження стану поверхні металів, їх рельєфу та покриттів використовують пристрої, до яких належать профілометри, профілографи, наприклад: «Alpha-Step IQ», «TR-100», «NV-1800», «БВ-7669», «Профілограф-215» та інші. В останні роки зростає роль досліджень поверхні матеріалів тому, що для сучасної мікро- та оптоелектроніки характерне використання тонкоплівкової технології, переходів від мікро- до нанометрових розмірів окремих елементів. Активні області таких виробів формуються в дуже тонких шарах, властивості яких (механічні, хімічні, оптичні та інші) визначаються елементним складом, кристалічною структурою й шорсткістю меж (границь) поділу. Тому питання діагностики та контролю стану поверхні таких матеріалів є важливим для вирішення цього завдання. Також важливими та актуальними завданнями є дослідження стану поверхні металів для військово-промислового комплексу чи цивільного літакобудування. Тому методи дослідження стану поверхні металів повинні бути в міру можливості неруйнівними та дозволяти отримувати дані про структуру, шорсткість та іншу діагностичну інформацію про стан матеріалу чи його поверхню.

Найпоширеніші методи діагностики стану поверхні в загальному можна поділити на дві основні групи. До першої групи належать методи, в яких використовуються емісійні явища та розсіювання мікрочасток, полягають у зовнішньому впливові на поверхню за допомогою електричного поля або пучка мікрочасток (електрони, іони, X-промені та інші) та подальший аналіз відбитого вторинного сигналу [324]. До методів другої групи належать методи засновані на основі скануючої зондової мікроскопії, які діагностують поверхню за допомогою спеціальних зондів [80, 324, 431].

При аналізі сигналів рельєфних утворень використовують два підходи –

детермінований і стохастичний щодо вибору їх математичних моделей. При детермінованому підході використовують діагностичні ознаки, які характеризують кількісні показники шорсткості поверхні: середня лінія, середньоарифметична висота, середня різниця висот та інші параметри [324]. При стохастичному підході щодо математичної моделі використовують діагностичні ознаки, такі, як: середньоквадратична висота нерівностей, асиметрія, ексцес, гістограми висот, автокореляційна функція та інші [324].

Відомі роботи [259–262] в напрямку дослідження процесів рельєфних утворень при самоорганізації поверхні під впливами різних навантажень (механічних чи ударно-хвильових). Такі рельєфні утворення відображають процес самоорганізації фрагментів поверхні й мають структуру, яку можна розглядати як повторювану, циклічну. У додатку Б наведено додаткову інформацію стосовно дослідження сигналів рельєфних утворень, використовуючи даний підхід.

Приклад типового циклічного сигналу рельєфного утворення наведено на рисунку 1.3.

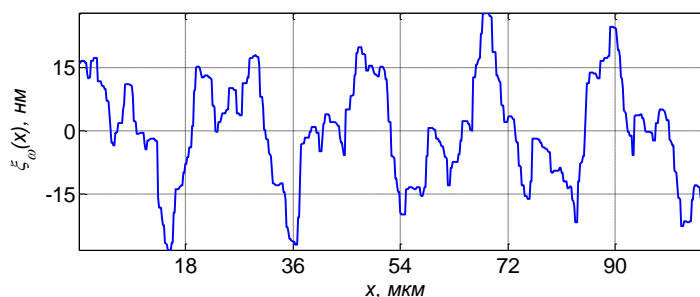


Рис. 1.3. Реалізація циклічного процесу рельєфних утворень (переріз рельєфу досліджуваного фрагмента поверхні), по осі абсцис – довжина відрізка, по осі ординат – висоти точок поверхні (профіль рельєфу поверхні)

Для дослідження циклічного процесу поверхні рельєфних утворень використовують методи оцінювання шорсткості. Відома значна кількість методів оцінювання шорсткості поверхні. Зокрема у праці [289] рельєфні утворення кількісно порівнювали за безрозмірним параметром, який визначали як відношення площі поверхні деформованого зразка до площі її горизонтальної

проекції. Такий підхід має чіткий фізичний зміст – чим більше значення шорсткості, тим більш розвинений рельєф утворено на поверхні. Крім того, цей параметр дозволяє порівнювати рельєфні утворення різного масштабу.

Слід зазначити, що мезоскопічний рельєф за значних пластичних деформацій формується у вигляді поздовжніх складок, орієнтованих перпендикулярно осі розтягу. Поверхня зразка з витягнутими зернами, навантаженими вздовж структури, набуває, на макрорівні, хвилеподібного (циклічного характеру) профілю [249]. За умов короткотермінового ударного навантажування у матеріалі відбувається процес самоорганізації структури, за якого виявляються нові фундаментальні властивості. Процес самоорганізації на даний час розглядають як послідовність незрівноважених фазових переходів. Переходи виникають при зміні одного або кількох керуючих (біфуркаційних) параметрів.

Значний вклад у розвиток досліджень у цьому напрямку внесли: Панін В.Е., Панін А.В., Романова В.А. [132], Марущак П.О. [430], Ігнатович С.Р. [391], Карускевич М.В. [392], Фодчук І.М. [324], Баловсяк С.В. [324], Kaoumi D. [398], Adamson J. [398], Wang J. [461], Guo C. [461] та інші.

Даний науковий підхід при циклічному розгляді процесу рельєфних утворень може бути розвинений за умови коректного математичного опису утворених на поверхні деформаційних морфологічних утворень. Проте, на жаль, роботи в даному напрямку є малочисельні й мають переважно феноменологічну спрямованість. Це пов'язано зі складністю достовірного виявлення форм структурних утворень. Тобто, в наслідок недостатньо розвинених методів сегментації для таких циклічних сигналів, немає можливості проводити їх автоматизоване опрацювання та моделювання геометричних параметрів утворених деформаційних структур [249].

Тому розроблення автоматизованих методів сегментації, які б дозволили виявити особливості сегментної структури поверхні матеріалів після деформаційних впливів на неї є актуальним.

1.1.3. Циклічні економічні процеси, їх математичні моделі. Комп'ютерні

системи автоматизованого аналізу та прогнозу циклічних економічних процесів. Наявність циклічної структури також характерна для багатьох економічних процесів, наприклад вона притаманна таким, які відображають індекси ділової активності різних галузей економіки: валовий національний продукт країни, сезонні індекси доходів підприємств і багато інших. Аналіз та прогнозування таких циклічних економічних даних має стратегічне значення для економічного розвитку країн, корпорацій та різних фірм.

Сучасні інформаційні технології активно застосовуються під час опрацювання циклічних економічних процесів. Використання яких, дозволяє проводити швидкий аналіз отриманих результатів та формувати прогноз циклічних економічних даних. До типових систем належать програмно-алгоритмічні комплекси, які є універсальними так спеціалізованими. Застосовуються такі комплекси для потреб опрацювання, аналізу, моделювання та прогнозування циклічних економічних даних. До них належать: «E Views», «MICRO TSP», «SPSS», «MATLAB», «RATS», «Micro TSP», «MATHEMATICA», «STADIA», «STATISTICA» та багато інших.

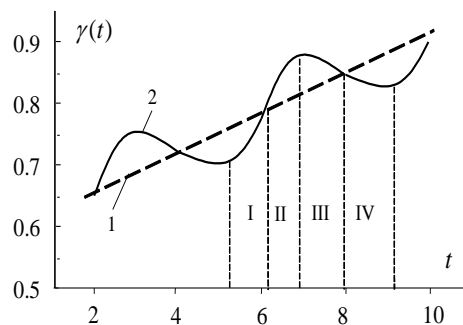


Рис. 1.4. Схематичне зображення економічного процесу: I – підйом, II – експансія, III – рецесія, IV – депресія; крива 1 – трендова компонента; 2 – циклічний економічний процес

Циклічний економічний процес складається з економічних циклів, у яких, у свою чергу, виділяють такі стадії як підйом, експансія, рецесія, депресія. Як приклад, на рисунку 1.4 схематично зображено економічний циклічний

процес [90].

При аналізі циклічних економічних даних як інформативні ознаки використовуються характеристики економічних циклів (амплітуда, тривалості), так і їх окремі стадії – сегменти.

Як приклад, на рисунку 1.5 наведено реалізацію циклічного економічного процесу індексу активності автомеханічної галузі США, пунктирними лініями зображені межі економічних циклів.

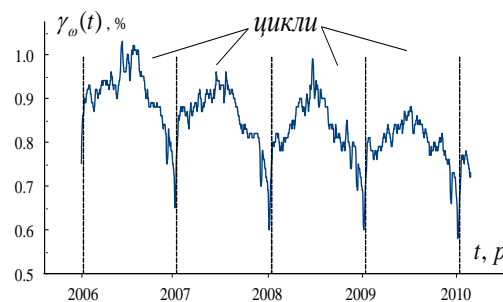


Рис. 1.5. Реалізація циклічного економічного процесу (індекс активності автомеханічної галузі США)

Свій вклад у розвиток теорії моделювання та опрацювання циклічних економічних процесів (економічних циклів) у Європі зробили такі відомі економісти: Жуляр, Маркс, Ван Гельдерен, Ван Дайн, Фримен, Хикс, Кальдор, Тод; у Росії – Кондратьєв, Гельфанд, Яковець, Сорокін, Туган-Барановський, Калецький; у США – Клайнкнехт, Китчин, Клинов, Форрестер, Самуельсон, Ростоу, Шумпетер та інші [144, 151, 315, 338, 385, 458].

Розробленням методів аналізу і прогнозу циклічних економічних процесів та їх моделюванням займалися такі науковці: Акаєв, Драган, Слуцький, Гарсія, Гайселс, Гансен, Гамільтон, Кузнєтс, МакКаллох, Нематоллахі, Осборн, Перрон, Філіпс, Саргент, Солтані, Тод, Тсе, Чіб [201, 305, 306, 375–377, 383, 407].

В якості моделей циклічних економічних процесів застосовують детерміновані та стохастичні математичні моделі. При детермінованому підході щодо моделювання використовують ряди та перетворення Фур'є: Грекова Т.И., Філатова Т.В., Халіпова Н.В., Леснікова І.Ю., Громко О.С., Чала Т.Г., Щербина

Л.В. [90], вейвлет-ряди та вейвлет перетворення: Yousefi S., Weinreich I., Reinarz D., Зомчак Л.М., Огородов А.П., Дмитрусенко К.О., [90]. При стохастичному підході в якості математичної моделі використовують процеси авторегресії та ковзного середнього, періодичні марковські процеси та ланцюги, періодично корельовані (ПКВП) та періодично розподілені випадкові процеси (ПРВП), циклічні випадкові процеси (ЦВП). Для аналізу циклічних економічних процесів також широко використовують wavelet-аналіз, метод «Гусениця» SSA, нейронні мережі: Зайченко Ю.П., Келестин Ю.В., Мазорчук М.С., Симонова К.А., Греков Л.Д. [90] та інші.

Ефективність функціонування програмно-алгоритмічних комплексів підтримки прийняття економічних рішень значною мірою залежить від математичного забезпечення – методів аналізу економічних процесів та їх прогнозування, які становлять алгоритмічну основу програмного забезпечення систем підтримки прийняття рішень. У таких системах має місце низка суттєвих недоліків, які полягають перш за все у низькій інформативності прогностичних ознак. Насамперед це зумовлено неврахуванням змінності ритму значень економічних показників [201], що спричиняє неможливість урахування в методах аналізу адаптації до його змін. Як наслідок – недостатня точність, достовірності методів опрацювання циклічних економічних процесів.

Створення ефективного математичного забезпечення для аналізу та прогнозування циклічних економічних процесів можливо у випадку, коли в математичні моделі буде закладена їх циклічна структура та можливість адаптації до змін ритму, а методи сегментації, які будуть розроблятися на їх математичних моделях, дозволять проводити її визначення та оцінювання ритму.

1.1.4. Циклічні сигнали електро-, газо-, нафто-, водоспоживання, їх математичні моделі. Комп'ютерні системи аналізу та прогнозу електро-, газо-нафто-, водоспоживання. Нові автоматизовані системи управління, які опрацьовують циклічні сигнали енергоресурсів, покликані покращити ефективність, точність та достовірність їх обліку, аналізу та прогнозування. Попит використання таких систем формують організації: DOE, EEA, IEA, IASA,

UN, Міненерго, ВАТ «Газпром» та інші. Створенням та вдосконаленням математичного, алгоритмічного та програмно-апаратного забезпечення для дослідження та прогнозування стану паливно-енергетичного комплексу займаються багато дослідників [18, 201, 126].

Серед відомих систем цифрового опрацювання, які розроблені для потреб аналізу та прогнозування електро-, газо-, нафтоспоживання, варто назвати «КРОС-ЭНЕРГО», «ATDATA@SMART», «АИС-ТЭБ» та інші. До існуючих систем автоматизованого збору, накопичення, аналізу та прогнозування електро-, газо-, нафтоспоживання слід віднести «АСКОЕ-Е1», «АСТОЕ-Е1», «ІКТ-PM&C», «BizEE Energy Audit Software», «OGRE Systems eXpress», «OGRE Systems CONTINUUM» та інші. Такі системи покликані здійснювати моніторинг постачання й споживання паливно-енергетичних ресурсів, здійснювати розрахунок важливих показників та формувати прогноз попиту й пропозиції на енергоресурси, моделювати кризові ситуації у розвитку паливно-енергетичних систем з метою прийняття адекватних управлінських рішень [201].

Типові реалізації (сигнали), які відображають дані водо- та газоспоживання наведено на рисунках 1.6 та 1.7 з позначеннями меж циклів (пунктирна лінія), вони характеризують етапи споживання енергоресурсів у певні проміжки часу.

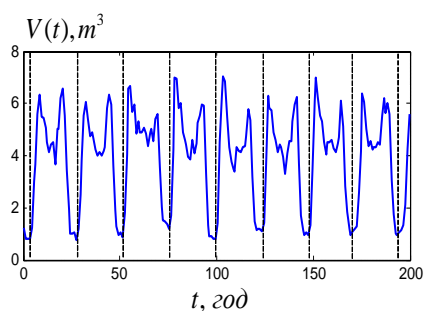


Рис. 1.6. Реалізація циклічного процесу (водонавантаження)

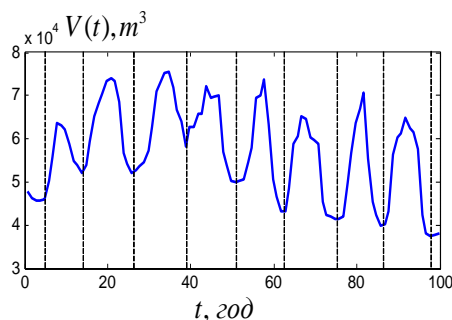


Рис. 1.7. Реалізація циклічного процесу (газонавантаження)

У галузях споживання енергоресурсів електро-, газо-, нафто-, водоспоживання при побудові система цифрової обробки даних виникають типові задачі опрацювання циклічних сигналів енергоспоживання (енергоресурсів), пов'язаних з їх сегментацією, статистичним опрацюванням, моделюванням та прогнозуванням [241, 242].

На рисунку 1.8 наведено фрагмент типової реалізації циклічного процесу електронавантаження. На даній реалізації також легко побачити характерні сегменти-цикли, що повторюються у часі.

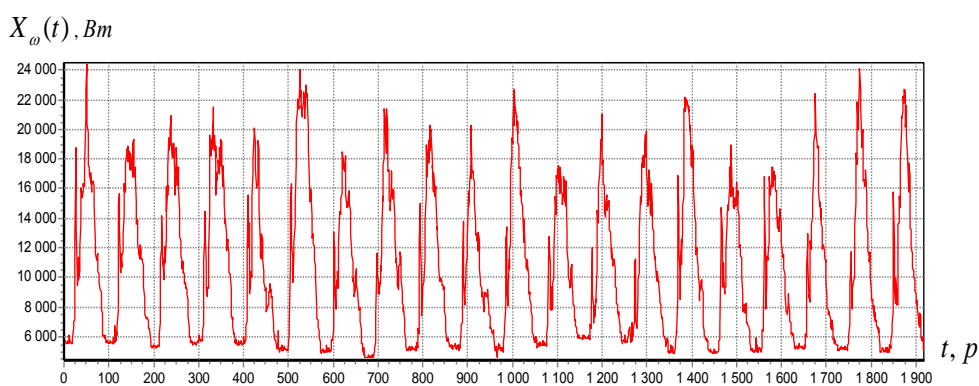


Рис. 1.8. Фрагмент реалізації циклічного процесу (електронавантаження, робочі дні березня 2007 р.)

Серед науковців, які займалися розробленням математичного та програмного забезпечення автоматизованих систем аналізу та прогнозування електро-, газо-, нафтоспоживання, слід назвати таких науковців: Агаєв, Бархударян, Гнеденко, Дегестанян, Денисенко, Деферрарі, Коваленко, Корліс, Ляуконіс, Мамедов, Марченко, Марценко, Махотіл, Мацюк, Мулик, Оганесян, Пістун, Попадько, Приймак, Щербак [18, 100, 220, 224, 225, 234, 235, 244, 266, 270]. Розроблення математичного забезпечення для аналізу електронавантажень займалися вчені Баранов Г.Л., Гордєєв В.І., Забело Є.П., Сухарева М.Г., Берман Р.Я., Жидкова М.О., Гармош В.Б., Кахановіч В.С., Кузнецов В.Г., Кукель-Краєвський С.О., Марченко Б.Г., Праховник А.В., Приймак М.В., Елькінд П.М., Михайлов В.В., Півняк Г.Г., Разумний Ю.Т., Рогальський В.Б., Руденко Ю.М., Хронусов Г.С., Шидловський А.К. [225, 244, 334, 335].

Математичне забезпечення, яке використовується у системах аналізу та прогнозування паливно-енергетичних процесів та ресурсів, належать моделі та методи множинної регресії, теорії стаціонарних та кусково-стаціонарних випадкових процесів (КСВП), ланцюгів Маркова, використання нейронних мереж [18, 220, 224, 266, 244]. До математичного забезпечення моделей процесів та ресурсів електро-, газо-, нафто-, водоспоживання належать стохастично періодичні процеси, зокрема адитивні та мультиплікативні моделі стаціонарного випадкового процесу та детермінованої періодичної функції, періодично корельований випадковий процес, періодично розподілений випадковий процес та лінійний періодичний випадковий процес [225, 234, 235, 244, 270].

Подібні проблеми виникають при аналізі даних енергоресурсів, як у випадку аналізу циклічних економічних процесів, вони пов'язані математичним забезпеченням до якого налажать детерміновані та стохастичні математичні моделі, які не є в достатній мірі адекватними, оскільки не враховують мінливість (змінність чи постійність) ритму досліджуваних процесів, а також наявність циклічної структури у таких циклічних сигналах. Це суттєво впливає на результати їх аналізу та опрацювання і призводить до невисокої точності та достовірності під час прогнозування процесів енергоспоживання.

1.1.5. Узагальнена структурна схема автоматизованих комп'ютерних систем діагностики та прогнозування за циклічними сигналами. Проводячи аналіз будови різних систем автоматизованої обробки циклічних сигналів (діагностичних чи прогностичних) в медицині, механіці чи економіці її можна зобразити у вигляді узагальненої структурної схеми, наведеної на рисунку 1.9.

Аналіз такої структури проведено з метою виявлення типових, спільних недоліків (науково-технічних проблем) на системному рівні, які притаманні різним автоматизованим системам цифрової обробки різних циклічних сигналів. Розглянемо і проаналізуємо узагальнену структурну схему діагностичних та прогностичних систем цифрової обробки циклічних сигналів та їх комп'ютерного моделювання.

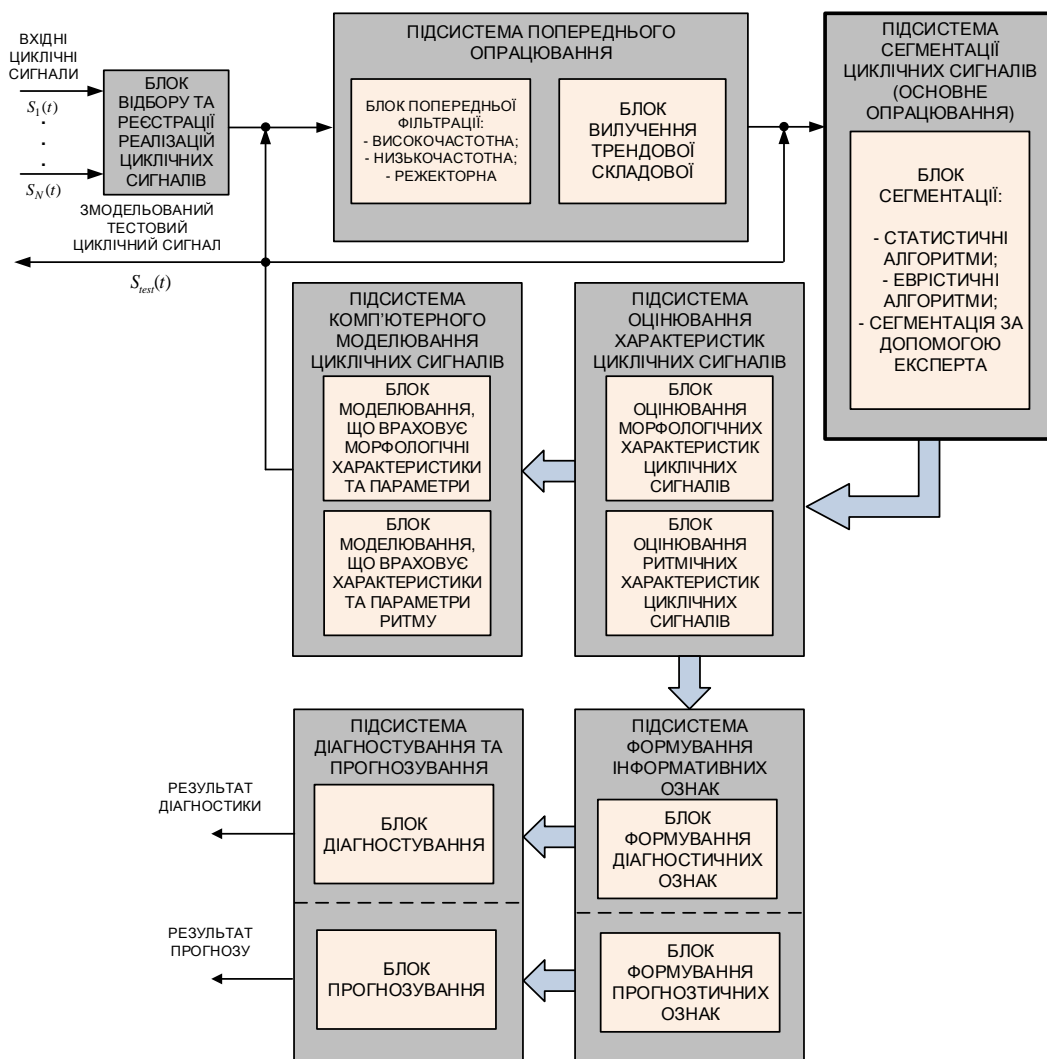


Рис. 1.9. Узагальнена структурна схема системи цифрової обробки циклічних сигналів та їх комп'ютерного моделювання

Вхідні циклічні сигнали надходять у блок відбору та реєстрації реалізацій циклічних сигналів. Процес реєстрації циклічних сигналів може здійснюватися синхронно (як це здійснюється у поліграфах чи поліаналізаторах), що дозволяє отримати більше діагностичної інформації під час їх паралельного опрацювання. Методи паралельного опрацювання кількох зареєстрованих циклічних сигналів дозволяють, наприклад, виявляти порушення у роботі серця (під час кардіодіагностики), які неможливо виявити при опрацюванні циклічного сигналу однієї фізичної природи.

Підсистема попереднього опрацювання здійснює підготовку отриманих даних для подальших кроків опрацювання основними методами діагностичної чи

прогностичної системи. Вона складається з двох блоків: попередньої фільтрації та вилучення трендової складової. Реалізація цих блоків в автоматизованих системах може бути здійснена з використанням відомих методів [1, 21, 75, 178, 258, 287].

Однією із найважливіших складових у такій структурній схемі є підсистема сегментації циклічних сигналів. Від ефективності та правильності роботи цієї підсистеми значною мірою залежать результати діагностики чи прогнозу. Оскільки робота цієї підсистеми значуще впливає на точність та достовірність кінцевих результатів, тому в огляді математичних моделей та методів опрацювання циклічних сигналів будемо звертати увагу на врахування (в моделях і методах) сегментної структури циклічних сигналів, яка є важливою. Методи, які реалізують функцію даної підсистеми, можна умовно поділити на: статистичні, евристичні та на сегментацію з використанням досвіду експерта (дуже поширено в медичній практиці, де в ролі експерта виступає лікар-діагност).

Підсистема оцінювання характеристик циклічних сигналів проводить оцінювання морфологічних характеристик, наприклад, форми економічних циклів, а підсистема, яка проводить аналіз ритму, виявляє закономірності між часовими чи просторовими змінами однотипних елементів у структурі циклічних сигналів. Ця інформація використовується в подальших методах для формування інформативних ознак (діагностичних чи прогностичних).

Підсистема діагностики чи прогнозу, аналізуючи інформативні ознаки у відповідних блоках опрацювання, формує діагностичний висновок чи прогноз, які відображаються на екрані системи цифрової обробки циклічних сигналів.

Слід сказати, що інформація, отримана від підсистеми оцінювання характеристик циклічних сигналів, може надходити на підсистему комп'ютерного моделювання (якщо така передбачена в системі), яка враховує характеристики та параметри ритму, а також характеристики та параметри морфологічного характеру й дозволяє генерувати циклічні сигнали, які можуть бути використані, наприклад, для налаштування та навчання алгоритмів автоматизованого опрацювання, тестування нових методів опрацювання, діагностики чи прогнозування. Дана підсистема, як складова систем цифрової обробки циклічних

сигналів, є важливою під час наукових досліджень у лабораторіях кардіологічних відділень у медичних закладах [168, 183, 185, 214]. При потребі така дослідницька діагностична система може модифікуватись у діагностичний комплекс для проведення функціональної діагностики за дослідженою та апробованою методикою.

Діагностичні чи прогностичні системи, які побудовані з використанням такої узагальненої структури та використанням комп'ютера дозволяють будувати сучасні діагностичні системи різної складності, які є повноцінними системами чи складовими систем у завданнях телемедицини для проведення достовірної, інформативної діагностики, що є актуальним в умовах сьогодення [74, 75].

Важливою складовою таких систем є спеціалізоване ПЗ, яке ґрунтується на відповідних алгоритмах (методах), а вони, в свою чергу, визначаються математичними моделями циклічних сигналів. Під час створення нових систем діагностики чи прогнозу ставиться мета та завдання моделювання (для прогнозування чи діагностики). Також шляхом виявлення та врахування на феноменологічному рівні властивостей циклічних сигналів (їх особливостей), які є ключовими, важливими для розв'язання задач дослідження та аналізу створюється математична модель, яка поряд із методами та алгоритмами визначає математичне забезпечення системи цифрової обробки (діагностики чи прогнозу), яка розробляється [105, 125, 134, 159, 185, 201, 233, 265, 345]. Далі це математичне забезпечення втілюється у відповідне програмно-алгоритмічне забезпечення. Тому дуже важлива трійка складових систем цифрової обробки циклічних сигналів, яка наведена на рисунку 1.10. З рисунка бачимо, що математичного забезпечення складає трійка: математичні моделі та методи; алгоритмічне забезпечення та програмне забезпечення. При побудови сучасних автоматизованих систем цифрової обробки циклічних сигналів розробляються саме ці три компоненти. Тому в даній дисертаційній роботі будемо дотримуватися викладання матеріалу, враховуючи ці компоненти: математичне забезпечення (моделі та методи); алгоритмічне забезпечення; і, як наслідок, програмне забезпечення (програмна реалізація).

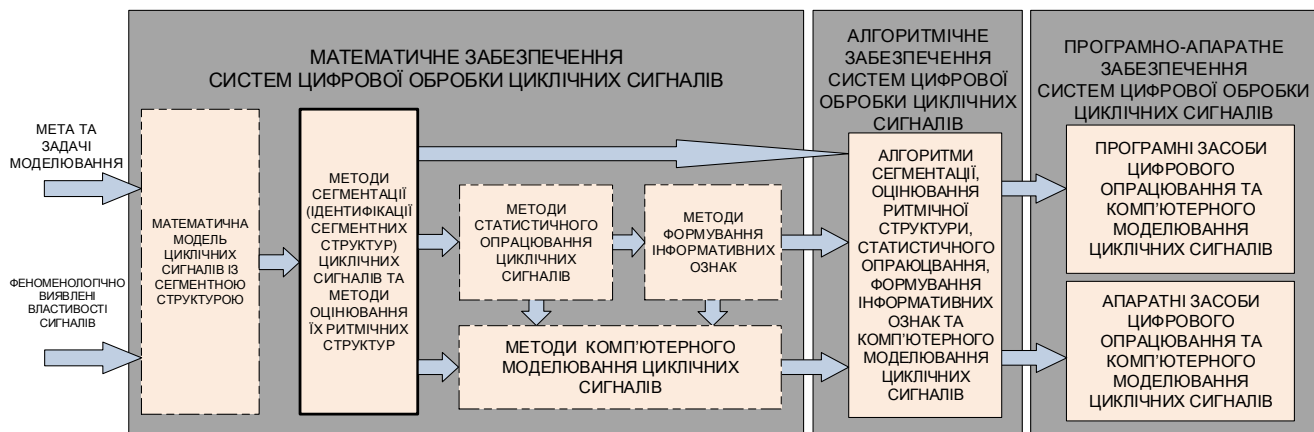


Рис. 1.10. Математичне та програмно-апаратне забезпечення системи цифрової обробки циклічних сигналів та їх комп'ютерного моделювання

Розглянемо виявлені недоліки (науково-технічні проблеми), виявлені в системах цифрової обробки циклічних сигналів під час проведеного огляду літературних джерел та аналізу їх узагальненої структури.

1.2. Недоліки (науково-технічні проблеми) в автоматизованих, комп'ютерних системах цифрової обробки та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів

Із проведеного аналізу літературних джерел підсумуємо та узагальнимо виявлені типові, спільні недоліки автоматизованих системах цифрової обробки циклічних сигналів та їх комп'ютерного моделювання в медицині, механіці та економіці. Такі недоліки пов'язані з математичним забезпеченням серед них слід назвати:

По-перше неврахуванням у багатьох математичних моделях циклічних сигналів, а відповідно і в методах їх опрацювання, повторюваної структури як циклів, так і їх складових – зон циклічних сигналів, що обмежує їх використання та не дозволяє здійснювати ідентифікацію їхньої структури.

По-друге відсутність узагальненого підходу до розроблення методів сегментації (ідентифікації сегментних структур) циклічних сигналів з єдиних позицій, враховуючи їхні спільні властивості, обмежує їх розбудову.

По-третє врахування в математичних моделях, а відповідно і в методах переважно стабільного ритму (математичні моделі та методи, які враховують період), обмежує їх використання та не дає можливість ідентифікувати наявність змінного ритму у досліджуваному циклічному сигналі.

По-четверте, не врахування в існуючих методах опрацювання одночасно й характеристик ритму (постійного, змінного), і характеристик морфологічного характеру різних циклічних сигналів зумовлює низьку інформативність діагностичних та прогностичних ознак у системах цифрової обробки даних.

Такі недоліки є наслідком недостатньої розбудови математичного забезпечення систем автоматизованого опрацювання циклічних сигналів та використанням у них подібних математичних засобів моделювання й опрацювання циклічних сигналів, які визначаються сучасним станом теорії їх моделювання, що не дає змоги підвищити точність їх аналізу, діагностування та прогнозування. Як наслідок хибний, неточний результат діагностики чи прогнозування в автоматизованих системах цифрової обробки реальних циклічних сигналів технічних та біологічних об'єктів. Важливо відзначити, що наявність вказаних недоліків у різних системах діагностики чи прогнозування у системах їх комп'ютерного моделювання у своїй переважній більшості зумовлені недостатньою розбудовою математичного забезпечення методів сегментації, оскільки немає єдиного підходу до побудови методів сегментації різних циклічних сигналів, а вони значною мірою визначають точність та достовірність обробки циклічних сигналів у задачах діагностики чи прогнозування. Це вимагає проведення компаративного (порівняльного) аналізу існуючих математичних моделей циклічних сигналів для встановлення їх адекватності, інформативності та повноти можливостей їх використання щодо побудови на їх основі нових методів сегментації. Які повинні враховувати виявлені феноменологічні властивості циклічних сигналів, які полягають у наявності повторюваної сегментної структури, яка відображає цикли та зони циклічного сигналу, та у наявності змінного чи постійного ритму їх розгортання у часі.

Такі аргументи вказують на необхідність та актуальність створення

теоретичних засад побудови нових методів опрацювання циклічних сигналів, які дозволять вирішити існуючу науково-прикладну проблему, що полягає у ідентифікації їх сегментних та ритмічних структур.

Розглянемо вимоги до математичної моделі, яка повинна адекватно описувати структури циклічних сигналів з урахуванням їх морфологічних та ритмічних особливостей.

1.3. Вимоги висунуті до математичної моделі циклічних сигналів

Враховуючи важливі властивості циклічних сигналів, а також мету й завдання моделювання (для діагностики чи прогнозування) опишемо, яким вимогам повинна відповідати математична модель, щоб адекватно описувати структури циклічних сигналів.

Вирішення проблем побудови автоматизованих діагностичних чи прогностичних систем, можливість розв'язання задач, які виникають при цьому, суттєво залежить від виду моделі (моделей) циклічного сигналу, яка визначає необхідний математичний апарат для теоретичних досліджень. Тому важливим завданням розроблення автоматизованих діагностичних чи прогностичних систем є створення нової чи обґрунтований вибір відомої математичної моделі циклічних сигналів. Математична модель циклічних сигналів суттєво визначає можливості аналізу, опрацювання циклічних сигналів у системах їх цифрової обробки, що, в свою чергу, зумовлює структуру й функціональні можливості та характеристики такої технічної системи. Тому важливо розробити або використати математичну модель циклічного сигналу, яка б з достатнім для практики ступенем точності й достовірності відображала як просторову, так і часову структуру циклічного сигналу й давала б змогу розв'язувати проблеми їх опрацювання, зокрема проблему ідентифікації сегментних та ритмічних структур циклічних сигналів.

З проведеного огляду літературних джерел та порівняльного аналізу математичних моделей циклічних сигналів встановлено, що їм властиві, як переваги так і певні недоліки. Наприклад, використання детермінованого підходу

до побудови математичної моделі циклічних сигналів у більшості випадків не є коректним, оскільки циклічний сигнал характеризується значною варіабельністю, як своєї структури так форми відповідних сегментів, що притаманно усім сигналам біологічного походження, це можна адекватно та коректно відобразити лише у випадку використання стохастичного підходу. Проте спрощення задачі опрацювання, використовуючи при цьому детермінований підхід є коректним, а математична модель є адекватною, в тих випадках коли при моделюванні можна послабити вимоги щодо її точності.

Серед математичних моделей які використовують стохастичний підхід необхідно вибрати таку, яка поряд із стохастичністю відображала б й інші, не менш важливі властивості циклічних сигналів. При цьому стохастична математична модель повинна описувати досліджуваній циклічний сигнал у повному ймовірнісному сенсі (в рамках функцій розподілу та характеристичних функцій), оскільки це дозволить використовувати весь напрацьований математичний апарат теорії випадкових функцій та розширить клас можливих діагностичних ознак, що дозволить повніше зображувати та досліджувати циклічні сигнали на її основі.

Тому враховуючи важливі властивості циклічних сигналів та науково-технічні проблеми (недоліки) автоматизованих систем цифрового опрацювання циклічних сигналів сформулюємо вимоги до математичної моделі, яку будемо використовувати в даній дисертаційній роботі.

Математична модель циклічних сигналів повинна задовольняти такі вимоги:

- дозволяти враховувати стохастичну природу сигналу, яка властива більшості циклічним сигналам біологічного, механічного та економічного походження (невизначеність, неточність, випадковість);
- дозволяти враховувати сегментну-циклічну чи сегментну-зонну часову або просторову структуру циклічних сигналів, яка відображає поетапну (фазову) структуру роботи циклічних систем чи її підсистем (циклічність, врахування сегментної структури, сегментів-циклів чи в межах циклів їх складових сегментів-зон);

- дозволяти враховувати постійний чи змінний ритм циклічних сигналів (мінливість ритму);
- дозволяти враховувати спільність ритму між різними циклічними сигналами, для яких породжуючим їх джерелом є одна система (спільність ритму);
- давати змогу проводити комп'ютерне моделювання циклічних сигналів на ЕОМ, враховуючи при цьому їх важливі морфологічні та ритмічні властивості, для потреб тестування методів їх опрацювання та навчання систем розпізнавання біомедичних образів під час діагностики в медицині чи механіці та під час формування прогнозу при аналізі економічних даних.

Розглянемо та порівняємо відомі математичні моделі циклічних сигналів з позиції забезпечення ними описаних вимог.

1.4. Відомі математичні моделі циклічних сигналів та можливості їх використання для вирішення проблеми ідентифікації їх сегментної структури

Математичне забезпечення сучасних автоматизованих систем цифрового опрацювання циклічних сигналів розробляється на основі відповідних математичних моделей.

У багатьох наукових працях, присвячених математичним моделям циклічних сигналів, можна виділити два типи щодо їх компонентної побудови, а саме: аксіоматичний та конструктивний [201]. До конструктивних математичних моделей належать моделі, які дозволяють врахувати процес породження, генерування циклічних сигналів. До аксіоматичних математичних моделей належать такі, які формують структури даних (просторово-часові структури сигналів). У випадку застосування конструктивних моделей використовують теорію рядів, інтеграл Фур'є, моделі що описують модульовані коливання, моделі авторегресії ковзного середнього із періодичною чи майже періодичною змінною їх коефіцієнтів [201]. У випадку застосування аксіоматичних

математичних моделей враховується просторово-часове розгортання досліджуваних циклічних сигналів та їх опис, зазначається у праці [201].

Серед відомих детермінованих математичних моделей циклічних сигналів [11, 19, 16, 185, 201, 330–332, 364, 472] слід назвати періодичні та майже періодичні функції, детерміновані функції, що описують форму одного циклу циклічного сигналу (наприклад, такі моделі описують один цикл ЕКС). Моделі, що належать до детермінованих застосовують в тих випадках коли випадкові фактори в циклічному явищі переважно відсутні, або в тих випадках коли необхідно спростити розв'язання поставленої задачі дослідження, при цьому знехтування випадковістю не призведе до суттєвих спотворень результатів під час їх аналізу. На практиці, детерміновані математичні моделі значно менше застосовуються в сучасних діагностичних та прогностичних системах через їх спрощений, ідеалізований характер [185]. Використання стохастичного підходу до побудови математичних моделей циклічних сигналів є більш поширеним при проектуванні автоматизованих цифрових діагностичних та прогностичних систем.

У додатку В наведено відомі математичні моделі циклічних сигналів, об'єкти (класи функцій та класи випадкових процесів) і порівняння їх основних властивостей (див. табл. В.1), що використовуються у системах цифрової обробки для проведення діагностики чи прогнозування.

1.4.1. Детерміновані математичні моделі циклічних сигналів. До детермінованих математичних моделей, які використовуються на практиці [1, 84, 87, 287], відносять гармонічні функції (синуси та косинуси), періодичні функції, квазіперіодичні функції та майже періодичні детерміновані функції. При цьому математичні моделі циклічних сигналів є найбільш розвинені для електричних сигналів серця [1, 287].

Широко використовуються моделі даного підходу у радіотехнічних та телекомунікаційних системах, зокрема це відображено у працях [84, 87], в системах офтольмодіагностики [1, 287]. В якості математичних моделей кардіосигналів використовуються періодичні функції та спектральний аналіз детермінованих функцій, зазначено у праці [201]. При використанні спрощеного

підходу до опису циклічних сигналів має сенс застосування математичних моделей, детермінованих періодичних функцій та гармонічних. Проте такий підхід є досить ідеалізованим, оскільки такі моделі описують реальні циклічні сигнали лише з добре впорядкованою структурою, яка розгортається у часі лише за стабільним законом ритму. Крім цього, такі моделі враховують і описують явища та процеси, врахувавши при цьому лише цикли і не дозволяють враховувати складові сегментів циклів. Тому такі моделі не є придатними для використання в задачах ідентифікації сегментних структур циклічних сигналів, оскільки не враховують різноманітність сегментної структури циклічних сигналів та мінливість їх ритму. Додаткові відомості щодо таких математичних моделей наведені в додатку В, підпункти В.1.1 та В.1.2.

Враховуючи, те що реальні циклічні сигнали не задовольняють умовам незмінності їх значень та строгій періодичності, тому це суттєво обмежує використання класу детермінованих періодичних функцій як математичних моделей циклічних сигналів на практиці. При цьому детермінована періодична функція адекватно описує лише частинний випадок циклічної структури досліджуваних сигналів, а саме, циклічні сигнали зі стабільним ритмом.

Використання майже періодичних функцій (див. підпункт В.1.3 додатка В), як математичних моделей циклічних сигналів також не є прийнятним, оскільки даний клас моделей і дозволяє врахувати мінливість їх ритму та нерегулярність характеру сегментної структури, проте їх властивість приблизної, а не точної повторюваності майже періодичної функції не дають змоги враховувати змінність однофазних значень циклічних сигналів, що у випадку їх врахування має адекватніше відобразити їх сегментну структуру. Оскільки клас таких функцій є дуже широким, з досить загальними властивостями, тому вони не дозволяють відобразити циклічну структуру реальних циклічних сигналів у зв'язку з цим їх використання є обмеженим.

Подібними властивостями володіє математична модель у вигляді квазігармонічної функції (див. табл. В.1). Тому, використання моделей майже періодичних та квазіперіодичних функцій в задачах моделювання та опрацювання

циклічних сигналів в системах цифрової обробки не отримали широкого розповсюдження, зазначається у праці [201].

Відомою математичною моделлю є циклічна числова функція, яка дозволяє враховувати повторювану циклічну структуру та мінливість ритму сигналу, проте не враховує складові сегменти-зони в межах циклів [200, 201]. Такі недоліки усуваються в математичній моделі у вигляді циклічної числової функції із сегментною структурою [418], яка відповідає більшості із висунутих вимог до математичної моделі циклічних сигналів, наведена у додатку В, підпункті В.1.5.

У випадку аналізу циклічних сигналів, використовуючи детермінований підхід, коли випадкові фактори відсутні чи ними можна знехтувати, що не призведе до суттєвого спотворення отриманих результатів такого опрацювання, будемо застосовувати математичну модель, зокрема, в даній дисертаційній роботі, у вигляді циклічної числової функції із сегментною структурою.

1.4.2. Стохастичні математичні моделі циклічних сигналів. Математичне забезпечення сучасних автоматизованих систем опрацювання циклічних сигналів широко використовує стохастичний підхід щодо їх математичних моделей [201, 215, 227, 336, 448] тобто математичний апарат теорії ймовірностей, випадкових процесів та математичної статистики.

Серед багатьох математичних моделей КС значного використання набула модель у вигляді вектора випадкових величин [198]. При використанні такої моделі зручно описувати множину відліків, значень параметрів (реперних точок) циклів циклічного сигналу [41], наприклад, параметри ЕКС такі як амплітуда, тривалості діагностичних сегментів тощо. Опрацювання циклічних сигналів, на базі моделі у вигляді вектора випадкових величин, проводиться шляхом статистичного опрацювання його ймовірнісних характеристик. Воно здійснюється шляхом усереднення однотипних елементів циклічного сигналу, при цьому кожен елемент береться із різних його циклів. Використання такої моделі не дозволяє враховувати різноманітність сегментних структур циклічних сигналів і тому є досить обмеженим.

Значного поширення набули стохастичні математичні моделі у вигляді

випадкових функцій, зокрема випадкових процесів та полів. Математичні моделі ЦС такого класу дозволяють, враховувати та відображати особливості циклічних сигналів більш повніше ніж їх моделі у вигляді вектора випадкових величин.

Для описування циклічних сигналів у вигляді випадкових процесів [201, 215, 227, 336, 344] широкого застосування набули моделі у вигляді стаціонарних випадкових процесів (див. підпункт В.2.1 додатка В). Відомими в цьому напрямку, є роботи Слуцького Є. Є. [306], в яких описані різні явища на основі стаціонарної моделі. У роботі яка стосується проблеми «прихованих періодичностей» він подає математичну модель (адитивну модель) циклічного сигналу до складу якої входить детермінована періодична компонента та стаціонарна компонента. На практиці стаціонарні випадкові процеси, як правило, використовують в рамках спектрально-кореляційної теорії [230], (стаціонарність у широкому розумінні). Моделі такого типу не дозволяють врахувати мінливість ритму циклічного сигналу оскільки враховують лише стабільний його ритм.

Існують математичні моделі циклічних явищ, в основі яких покладено теорію стохастично періодичних випадкових процесів [54–58, 82, 83, 94, 109–117, 228, 245, 271–274, 370–373, 389, 390, 401, 404, 441, 443]. В англійських літературних джерелах зустрічається назва – теорія циклостаціонарних випадкових процесів. В математичних моделях заснованих на теорії циклостаціонарних випадкових процесів, враховується припущення про те, що їх ймовірнісні характеристики є періодичними функціями часу (див. пункт В.2.2 додатка В). Коли вживають термін періодичний випадковий процес (див. підпункт В.2.2.3 додатка В), розуміють періодичність його багатовимірних функцій розподілу (у вузькому розумінні) за сукупністю аргументів. У роботі [228] введено поняття стохастично періодичного процесу у вузькому розумінні, та названо його, як стохастичний періодичний випадковий процес за Слуцьким. У роботі [109] – введено поняття періодично розподіленого або цикловаріантного випадкового процесу, а у роботах [370–373] – введено поняття циклостаціонарного випадкового процесу.

Широкого використання в рамках випадкової парадигми набули

математичні моделі (див. підпункт В.2.2.1 додатка В), які являють собою адитивні, мультиплікативні та адитивно-мультиплікативні суміші (В.35)–(В.37). В таких моделях враховуються дві компоненти: стаціонарна компонента (переважно стаціонарна у широкому розумінні) та детермінована періодична функція із однаковим періодом. При застосуванні математичної моделі у вигляді адитивної суміші (В.35) враховується періодичність лише математичного сподівання результуючого випадкового процесу при цьому його дисперсія є константою. У випадку застосування мультиплікативної математичної моделі (В.36) періодичність враховується, як математичного сподівання, так і дисперсії результуючого процесу. За такого підходу має місце зв'язок між математичним сподіванням та дисперсією. При застосуванні адитивно-мультиплікативної моделі (В.37) поєднуються властивості якими володіють моделі (В.35) та (В.36). Описані математичні моделі (В.35)–(В.37) є досить спрощеними, а їх використання знайшло місце у задачах виявлення завад та задачах їх фільтрації. Такі задачі розв'язують на етапі попереднього опрацювання сигналів в тому числі і біологічного походження [152, 291, 434]. Виходячи з цього такі математичні моделі не дозволяють врахувати можливу структурну різноманітність реальних циклічних сигналів та змінність їх ритму, що не дає змоги застосовувати їх в задачах сегментації циклічних сигналів (ідентифікації їх сегментної структури).

Одним із потужних класів математичних моделей (див. підпункт В.2.2.2 додатка В), які широко використовуються при опрацюванні сигналів є клас періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП). Означення ПКВП вперше дав Коронкевич [154]. З того часу дослідженнями властивостей моделі у вигляді ПКВП займалися такі науковці, як Гудзенко [94], Гард [389, 390], Гарднер [370–373], Драган [109–117, 54–58], Войчишин [54–58], Яглом [344], Огура [443], Яворський І. [113, 118, 340, 341], Яворський Б. [111, 119, 339], Приймак [112, 245]. По аналогії до назви циклостаціонарних випадкових процесів в англійськомовних наукових джерелах ПКВП називають циклостаціонарно корельованими випадковими процесами [370–373]. При використанні математичної моделі у вигляді ПКВП для статистичного опрацювання циклічних сигналів застосовують

синфазний, компонентний та фільтровий методи їх обробки [109, 115, 369].

Застосування моделей на основі ПКВП дозволяє враховувати математичне сподівання та кореляційну функцію, тобто використання ПКВП можливе в рамках лише двох моментних функцій. Вищі моментні функції, а також функції розподілу на основі ПКВП не можуть бути представлені. Необхідно зазначити, що ПКВП повністю описує процес лише значення якого мають нормальний закон розподілу.

Відомо, що основними характеристиками випадкового процесу є його сімейство функцій розподілу. Інші ймовірнісні характеристики, зокрема, такі, як характеристичні, моментні, кумулянтні функції визначаються через його сімейство функцій розподілу. Тому врахування у стохастичних математичних моделях їх ймовірнісної структури, можливе лише за рахунок врахування скінченновимірних функцій розподілу. Математична модель у вигляді стохастично періодичного процесу – є узагальненням адитивних, мультиплікативних, адитивно-мультиплікативних моделей та періодично корельованого випадкового процесу при умові врахування періодичних лише окремих його ймовірнісних характеристик, наприклад математичного сподівання, кореляційної функції. Такі моделі набули широкого використання, як моделі циклічних сигналів серця [189, 257], циклічних економічних процесів [375–377], потоків заявок систем масового обслуговування [270], модульованих радіосигналів [371, 374] тощо.

Під час математичного моделювання циклічних сигналів використовують низку відомих класів випадкових процесів, які мають періодичні ймовірнісні характеристики. До таких моделей відносять: процеси із незалежними періодичними значеннями (періодичні білі шуми) [155], процеси із незалежними періодичними приростами [155], марковські періодичні випадкові процеси та ланцюги [353, 375, 377, 404, 441], лінійні періодичні випадкові процеси (ЛПВП), [208, 209, 228]. У кандидатській дисертаційній роботі автора [184] при моделюванні реалізацій ЕКС, в якості одної із компоненти моделі (стохастично періодичного процесу), використовується лінійний випадковий процес (ЛВП).

В якості математичних моделей базових випадкових процесів використовують моделі білого шуму та періодичного білого шуму. Зокрема такі моделі поширені у радіотехніці, акустиці при моделюванні заводів, які накладаються на корисні сигнали. Періодичні білі шуми (див. підпункт В.2.2.5 додатка В) також використовуються для формування випадкових процесів складнішої форми та структури, зокрема ЛПВП. До характеристик таких випадкових процесів належать математичне сподівання, дисперсія, функція розподілу. Такі математичні моделі не можуть бути використані для опису структури циклів та їх складових, а також для врахування змінного ритму.

Для опису періодичних потоків заявок у системах масового обслуговування широко використовують моделі у вигляді випадкових процесів із незалежними періодичними приростами (див. підпункт В.2.2.4 додатка В). Такі моделі застосовуються, наприклад, в системах енерго-, газо-, водопостачання [100, 234, 235, 244]. Відомо, що такі моделі є базовими, вони використовуються в основі важливих класів випадкових процесів із періодичними ймовірнісними характеристиками, зокрема в основі означень періодичного білого шуму та лінійних періодичних випадкових процесів [201].

Відомими стохастичними математичними моделями є марківські процеси та послідовності (див. підпункт В.2.2.6 додатка В). Такі математичні моделі поширені для моделювання та аналізу циклічних енергонавантажень та економічних процесів, зокрема використовуються періодичні марковські випадкові процеси та ланцюги. До періодичних ймовірнісних характеристик таких моделей належать математичне сподівання, дисперсія, одновимірна функція розподілу та умовна функція розподілу. Інформативними ознаками при використанні математичної моделі у вигляді ланцюгів Маркова є періодичні матриці ймовірностей переходу між його станами [375–377]. Марківські моделі обмежено використовуються для моделювання циклічних сигналів в силу того, що марківська властивість обмежено поширена у циклічних явищах. Проте в роботах Воробйова [61–65] використовується багаторівневий випадковий процес, що пописує циклічні сигнали медико-біологічних даних з ознаками форми, які

повторюються. При застосуванні таких математичних моделей для описування механізму зміни станів використовують ланцюг маркова. Однак цей ланцюг керує тільки чергуванням класів послідовності подій, але не їх тривалостями. В іншій праці [284], описують процес енергонавантаження з урахуванням його властивості марковості (в якості моделі використано періодичний ланцюг Маркова). Перевагою марківських випадкових процесів є те, що вся інформація про процес зосереджена у двовимірній функції розподілу.

Серед математичних моделей широкого застосування у технічній діагностиці, гідроакустиці, геофізиці, медичній діагностиці набули моделі у вигляді ЛВП, зокрема лінійні періодичні випадкові процеси (див. підпункт В.2.2.7 додатка В). Такі математичні моделі досліджують в рамках їх функцій розподілу та характеристичних функцій. Оскільки моделі ЛВП та ЛПВП є конструктивними то дозволяють проводити моделювання, засобами ЕОМ, досліджуваного процесу. Задаючи при цьому його параметри, що входять у конструкцію, наприклад параметри ядра, (якщо воно параметризоване) чи параметри породжуючого процесу. Недоліком таких моделей є складність та неоднозначність у визначенні (оцінюванні) ядра процесу та параметрів породжуючого процесу за заданими ймовірнісними характеристиками [201].

Крім оглянутих математичних моделей у цифрових системах обробки циклічних сигналів використовують модель у вигляді майже періодичного випадкового процесу. Це такий випадковий процес, у якого функції розподілу (математичне сподівання та кореляційна функція) є майже періодичними із однаковими майже періодами (або, що аналогічно – з однаковими коефіцієнтами Фур'є). Тому, дані моделі можна розглядати як узагальнення періодичного (періодично корельованого) випадкового процесу, зазначено у роботі [201]. При використанні детермінованого підходу, під час аналізу класу моделей майже періодичних функцій, було зазначено, що даний клас є дуже широким, оскільки поняття майже періодичності є широким узагальненням періодичності і не є еквівалентним поняттю циклічності [201]. Тому, клас стохастичних моделей у вигляді майже періодичних випадкових процесів є узагальненням періодичних

випадкових процесів, які не задовольняють більшості із висунутих вимог до математичних моделей циклічних сигналів. До математичних моделей, які враховують циклічність (не повною мірою) належать узагальнені майже циклостаціонарні випадкові процеси [201].

Відомо, що для опису різних коливних властивостей в науці широко використовується математичний апарат теорії в основі якої покладені диференціальні рівняння: лінійні та нелінійні, детерміновані та стохастичні диференціальні рівняння, звичайні диференціальні рівняння та диференціальні рівняння в частинних похідних. Застосування такого підходу до опису та аналізу коливних явищ є конструктивним, оскільки моделює механізм породження колювання досліджуваного явища чи процесу. Проте застосування такого підходу до опису реальних циклічних сигналів у багатьох випадках, наприклад для низки біологічних, астрофізичних циклічних сигналів немає змоги, оскільки дуже складно записати диференціальне рівняння, яке його описує, та розв'язати його з врахуванням параметрів сегментної структури.

До математичних моделей, які дозволяють врахувати змінний ритм можна віднести моделі, які використовуються для опису модуляції гармонічних сигналів при цьому результуючий модульований сигнал є квазігармонічною функцією (див. пункт В.3 додатка В). В такій моделі змінність ритму враховується в параметрах моделі: миттєва кутова частота [84], миттєвий період [88].

В якості несучого сигналу може використовуватись імпульсний періодичний сигнал (меандр), в такому випадку отримують такі різновиди модуляцій: амплітудо-імпульсну, частото-імпульсну, фазо-імпульсну та тривало-імпульсну [201]. У цих випадках змінність ритму відображається у таких параметрах моделі як частота [9, 384], змінний період [221]. Описати циклічні сигнали моделями в основі яких покладена модуляція гармонічних функцій досить складно, оскільки в таких моделях складно врахувати сегментні структури.

В багатьох проаналізованих математичних моделях закладається властивість періодичності їх характеристик, що забезпечує строгу повторюваність значень циклічних сигналів чи їх ймовірнісних характеристик (через задане число

– величину періоду). Проте на практиці така строга повторюваність у структурі багатьох циклічних сигналів відсутня. Тому такі математичні моделі коректно застосовувати у випадках, коли наперед відомо про постійність, стабільність його ритму (ритмічної структури) циклічного сигналу, наприклад, для моделювання процесу скорочення штучного серця людини. Необхідність урахування в математичній моделі механізму адаптації до змін ритму циклічного сигналу (постійного чи змінного), обґрунтована у працях [163, 167, 192, 208–211]. В яких було показано, що врахування властивості періодичності в методах опрацювання кардіосигналів, які ґрунтуються на їх стохастичній періодичній моделі, призводять до негативного ефекту так званого „розмивання” отриманих статистичних оцінок характеристик циклічних сигналів серця. Такий негативний ефект зумовлений усередненням не однофазних (неоднорідних) відліків кардіосигналу на межі сегментів-циклів викликаний незмінністю (постійністю) інтервалу їх вибору за рахунок врахування постійного інтервалу (періоду), через який здійснювався вибір відліків та усереднення значень кардіосигналу [201].

У кандидатській дисертаційній роботі автора [185] розроблено стохастичну математичну модель циклічного електрокардіосигналу у вигляді випадкового процесу з періодичними ймовірнісними характеристиками. Дана модель дозволяє враховувати сегменти-зон у зонно-часовій структурі ЕКС. Поняття такої структури для циклічних сигналів введено в роботах [184, 185, 197, 198]. Її врахування дало змогу послабити негативний ефект „розмивання” статистичних оцінок при опрацюванні кардіосигналів за ансамблем виділених сегментів. Неповне усунення такого ефекту пояснювалася слабкою деталізацією зонно-часової структури ЕКС. Хоча в роботі [185] математична модель дозволяє врахувати стохастичність та повторювану структуру циклічного ЕКС, проте не дозволяє враховувати мінливість (постійність та змінність) його ритму, оскільки в ній строго закладається його постійність (періодичність). Це унеможливило опрацювання електрокардіосигналу з ознаками патологій, які проявляються у зміні його ритму.

В роботі [275] була зроблена спроба врахувати зміну часових інтервалів між

однофазними значеннями циклічного сигналу. За рахунок введення поняття “умовно періодичного зі змінним періодом випадкового процесу” та поняття “змінного періоду”, які у математичній формі повинні б відображати мінливість ритму циклічного сигналу. Однак у даній роботі, а також у низці інших робіт [28, 152, 236, 277] не було розкрито багато важливих питань, зокрема не встановлено необхідних та достатніх умов стосовно циклічності, яким повинен задовольняти так званий змінний період. Неврахування таких умов не дозволяє коректно ввести клас функцій, оскільки не було строго введено визначальної ознаки, властивості цього класу – його циклічності, зазначено у праці [201].

В моделях Воробйова здійснено спробу врахувати повторюваність у формі та змінність структури медико-біологічних сигналів. При використанні такого підходу тривалісті однорідних ділянок враховуються у різних запропонованих математичних моделях, не пов’язаних з марківським ланцюгом перемикачів. А сам марківський ланцюг, як модель, використовується для описування механізму зміни станів досліджуваного процесу. Велика кількість моделей, які можуть бути використані для описування тих чи інших циклічних явищ та значна кількість їх параметрів не робить запропоновану теорію математичних моделей Воробйова компактною та не дозволяє їх поширити на різні циклічні сигнали врахувавши при цьому їх сегментні структури. Такі моделі подані у додатку В, пункті В.4.

У роботах Лупенка С.А. [201, 205] розроблено теорію циклічних функціональних відношень. Клас стохастичних математичних моделей у вигляді циклічних функцій, дозволяють враховувати повторювану циклічну структуру та структуру яка враховує складові сегментів-циклів циклічних сигналів, крім цього вони враховують змінний та постійний їх ритм. Використання математичної моделі у вигляді вектора ритмічно пов’язаних циклічних випадкових процесів, також дозволяє враховувати спільність ритмічної структури між різними циклічними сигналами зареєстрованими від одного джерела. Використання такої моделі є доречним у випадку паралельного опрацювання декількох різних за природою циклічних сигналів. Оскільки більшості із висунутих вимог задовольняють саме ці математичні моделі, тому при стохастичному підході до

аналізу циклічних сигналів будемо використовувати модель у вигляді циклічного випадкового процесу із сегментною структурою. Основні властивості описаних математичних моделей наведено у додатку В, пункти В.5.1 та В.5.2.

З проведеного вище аналізу математичних моделей циклічних сигналів, можна стверджувати, що для їх описування, які характеризуються значною різноманітністю структури та властивостей, використовується велика множина їх математичних моделей (див. додаток В, табл. В.1). Проте є математичні моделі, а саме, циклічна числова функція із сегментною структурою (детермінований підхід) та циклічний випадковий процес із сегментною структурою (стохастичний підхід), які дозволяють врахувати важливі властивості циклічних сигналів та задовольняють більшості із висунутих вимог до їх адекватної математичної моделі. Для цих математичних моделей немає розроблених методів оцінювання їх параметрів, а лише пропонується використовувати відомі методи зокрема методи сегментації, зазначено у роботі [201].

У наступному підрозділі розглянемо постановку проблеми ідентифікації сегментної структури циклічних сигналів з урахуванням обґрунтованої математичної моделі досліджуваних циклічних сигналів, яка враховує сегментну циклічну чи сегментну зонну структури.

1.5. Постановка проблеми ідентифікації сегментної структури з урахуванням вибраної математичної моделі циклічних сигналів

Згідно робіт [239, 406] розрізняють три рівні, які розглядаються під час проведення ідентифікації об'єкта – перший пов'язаний з визначенням класу моделі або моделей. Здійснюється він на основі аналізу інформації про об'єкт дослідження і є першим рівнем ідентифікації моделі. На другому рівні проводиться вибір структури моделі в середині вибраного класу моделей. В даному випадку під структурою моделі розуміють вид математичного оператора, відомого з точністю до його параметрів. І третій рівень пов'язаний з оцінюванням значень параметрів моделі за експериментальними даними.

Враховуючи зазначений підхід, на першому рівні, із проведеного аналізу математичних моделей, вибраний клас моделей у вигляді циклічних функцій (циклічних функціональних відношень) як математичних моделей циклічних сигналів, вони дозволяють враховувати повторюване розгортання у часі структури циклів циклічних сигналів і дозволяють враховувати його ритм. На другому рівні проведений вибір двох видів математичних моделей в середині їх обраного класу (циклічних функцій). Два види моделей дозволяють окремо враховувати два типи сегментних структур (сегментну циклічну та сегментну зонну структуру).

Оскільки в даній роботі розглянуто два типи сегментних структур (сегментна циклічна та сегментна зонна), які враховано у відповідних детермінованих і стохастичних математичних моделях, то спочатку наведемо математичну модель циклічного сигналу, яка враховує сегментну циклічну структуру в такому вигляді:

$$F(t) = \sum_{i=1}^C f_i(t), t \in \mathbf{W}, \quad (1.1)$$

де C – кількість сегментів-циклів циклічного сигналу; \mathbf{W} – область визначення циклічного сигналу, а область його значень для випадку детермінованого підходу, є множиною дійсних чисел ($F(t) = f_d(t) \in \Psi = \mathbf{R}$), а для випадку стохастичного підходу – Гільбертовим простором випадкових величин, що задані на одному ймовірнісному просторі ($F(t) = \xi(\omega, t) \in \Psi = \mathbf{L}_2(\Omega, \mathbf{P})$). У конструкції (1.1) сегменти-цикли циклічного сигналу визначаємо через індикаторні функції, тобто $f_i(t) = F(t) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t)$, $i = \overline{1, C}$, $t \in \mathbf{W}$. При цьому індикаторні функції, які виділяють

сегменти-цикли, визначаємо так: $I_{\mathbf{W}_i}(t) = \begin{cases} 1, & t \in \mathbf{W}_i, \\ 0, & t \notin \mathbf{W}_i. \end{cases}$ де \mathbf{W}_i – область визначення

індикаторної функції, яка у випадку неперервного циклічного сигналу, є множиною дійсних чисел, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, дорівнює півінтервалу

$$\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1}), i = \overline{1, C}, \quad (1.2)$$

а у випадку дискретного сигналу, є зліченою множиною, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, множині дискретних відліків

$$\mathbf{W}_i = \{t_{i,l}, l = \overline{1, L}\}, i = \overline{1, C}, \quad (1.3)$$

де L – кількість дискретних відліків на i -му циклі, $L = const$.

Сегментна циклічна структура враховується множиною відліків часу $\{t_i\}$ або $\{t_{i,l}, l = \overline{1, L}\}, i = \overline{1, C}$. У такій конструкції математичної моделі (1.1) враховано ритм циклічного сигналу через неперервну функцію ритму $T(t, n)$, а саме, $I_{\mathbf{W}_i}(t) = I_{\mathbf{W}_{i+n}}(t + T(t, n)), i = \overline{1, C}, n \in \mathbf{Z}, t \in \mathbf{W}$, де n – величина, яка вказує на кількість циклів, через які віддалені однофазні значення досліджуваного сигналу.

Тепер наведемо математичну модель циклічного сигналу, яка враховує сегментну зонну структуру в такому вигляді:

$$F(t) = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^Z f_j(t), t \in \mathbf{W}, \quad (1.4)$$

де Z – кількість сегментів-зон на сегменті-циклі циклічного сигналу. Область значень циклічного сигналу для математичної моделі (1.4) буде дорівнювати аналогічно до попереднього випадку моделі (1.1). В конструкції (1.4) сегменти-зони циклічного сигналу пов'язані з сегментами-циклами й визначаються через індикаторні функції, тобто $f_j(t) = F(t) \cdot I_{\mathbf{W}_j}(t) = f_i(t) \cdot I_{\mathbf{W}_j}(t), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, t \in \mathbf{W}$.

При цьому індикаторні функції, які виділяють сегменти-зони, визначаються так:

$$I_{\mathbf{W}_j}(t) = \begin{cases} 1, & t \in \mathbf{W}_j, \\ 0, & t \notin \mathbf{W}_j, \end{cases} \text{ де } \mathbf{W}_j - \text{область визначення індикаторної функції, яка у}$$

випадку неперервного циклічного сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, дорівнює півінтервалу

$$\mathbf{W}_{i_j} = \left[t_{i_j}, t_{i_{j+1}} \right), \quad i = \overline{1, C}, \quad j = \overline{1, Z}, \quad (1.5)$$

а у випадку дискретного сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, дорівнює множині дискретних відліків

$$\mathbf{W}_{i_j} = \left\{ t_{i_{j,l}}, l = \overline{1, L_j} \right\}, \quad L = \sum_{j=1}^Z L_j, \quad i = \overline{1, C}, \quad j = \overline{1, Z}, \quad (1.6)$$

де L_j – кількість дискретних відліків на j -ій зоні відповідного сегмента-циклу.

Сегментна зонна структура враховується множиною відліків часу $\{t_{i_j}\}$ або $\left\{ t_{i_{j,l}}, l = \overline{1, L_j} \right\}$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$. У такій конструкції математичної моделі (1.4) враховано ритм циклічного сигналу через неперервну функцію ритму $T(t, n)$, а саме, $I_{\mathbf{W}_{i_j}}(t) = I_{\mathbf{W}_{i_{j+n}}}(t + T(t, n))$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$, $n \in \mathbf{Z}$, $t \in \mathbf{W}$.

На третьому рівні, згідно робіт [239, 406], здійснюється ідентифікація параметрів моделі за досліджуваними експериментальним даними, тому подамо задачу ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів у такому вигляді.

Враховуючи, описані вище, математичні моделі (1.1) та (1.4), з метою загальної постановки задачі ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів, у роботі їх узагальнену модель наведено таким чином:

$$F(t) = F(t, \mathbf{S}, \mathbf{T}), \quad (1.7)$$

де \mathbf{S} – формальне подання сегментної структури циклічних сигналів та її параметрів

$$\mathbf{S} = \begin{cases} \hat{\mathbf{D}}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}, \text{ для сегментної циклічної структури,} \\ \hat{\mathbf{D}}_z = \{t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}, \text{ для сегментної зонної структури,} \end{cases} \quad (1.8)$$

де \mathbf{T} – формальне подання ритмічної структури циклічних сигналів та її параметрів

$$\mathbf{T} = \begin{cases} \{\hat{T}(t_i, n), i = \overline{1, C}, n \in \mathbf{Z}\}, \text{ для сегментної циклічної структури,} \\ \{\hat{T}(t_{ij}, n), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, n \in \mathbf{Z}\}, \text{ для сегментної зонної структури.} \end{cases} \quad (1.9)$$

Після ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів необхідно провести оцінювання неперервної функції ритму, врахованої у моделях (1.1) та (1.4) шляхом інтерполяції ідентифікованої ритмічної структури:

$$\mathbf{T} \xrightarrow{\text{interpolation}} \hat{T}(t, n), n \in \mathbf{Z}, t \in \mathbf{W}. \quad (1.10)$$

Враховуючи узагальнене подання математичної моделі циклічних сигналів (1.7) з метою її конкретизації, тобто вибору моделі (1.1) або (1.4) при дослідженні циклічних сигналів проблема ідентифікації сегментної структури полягає у визначенні сегментної циклічної структури $\hat{\mathbf{D}}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$ чи сегментної зонної структури $\hat{\mathbf{D}}_z = \{t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, які наведено у виразі (1.8), а також ідентифікації дискретної ритмічної структури, що полягає у визначенні ритмічної циклічної структури $\{\hat{T}(t_i, n), i = \overline{1, C}\}$ чи ритмічної зонної структури $\{\hat{T}(t_{ij}, n), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, які наведено у виразі (1.9), що пов'язані з сегментними структурами (1.8).

Для вирішення підпроблеми загальної проблеми ідентифікації сегментних та ритмічних структур циклічних сигналів розглянемо вимоги до методів сегментації, які мають дозволяти виділяти сегменти-цикли та сегменти-зони, а

також проводити ідентифікацію відповідної сегментної циклічної та сегментної зонної структур.

1.6. Вимоги до розробляємих методів сегментації циклічних сигналів

Враховуючи формальну постановку підпроблеми ідентифікації сегментної структури циклічних сигналів проведемо порівняльний аналіз відомих методів їх опрацювання, зокрема, методів сегментації з позиції їх точності та достовірності аналізуючи при цьому їх переваги та типові недоліки. З метою їх аналізу сформуємо та перелічимо низку вимог, яким повинні відповідати нові методи сегментації циклічних сигналів у автоматизованих системах їх цифрової обробки, щоб дозволяти проводити сегментацію та ідентифікацію отриманої сегментної структури:

- проводити сегментацію циклічних сигналів різної фізичної природи. При цьому методи повинні адаптуватися під особливості різних циклічних сигналів за рахунок урахування їх структури та форми, що певним чином дозволить усунути вплив завад біологічного і/або технічного походження на результати їх опрацювання;
- проводити сегментацію циклічних сигналів з можливістю урахуванням не тільки сегментів-циклів, а також їх складових – сегментів-зон. Врахування як деталізованої сегментної зонної структури так і сегментної циклічної структури дозволить проводити їх ідентифікацію під час опрацювання досліджуваних циклічних сигналів;
- давати можливість аналізувати ритм циклічних сигналів, тобто враховувати його мінливість (постійність чи змінність). У випадку постійності ритму визначати величину періоду (тривалість сегментів-циклів) через яку вони знову повторюється. А у випадку змінності ритму здійснювати його оцінювання, врахувавши ритмічну структуру досліджуваного циклічного сигналу;
- давати можливість проводити опрацювання циклічних сигналів в часовій

області або області просторових координат, що дозволить оперувати інформативними ознаками (діагностичними чи прогностичними), які використовуються та добре досліджені у відповідній предметній області досліджуваних циклічних сигналів;

- давати можливість проводити опрацювання циклічних сигналів у межах двох підходів щодо їх математичних моделей (детермінованого та стохастичного).

Враховуючі висунуті вимоги проведено огляд та порівняльний аналіз відомих методів сегментації циклічних сигналів.

1.7. Відомі методи сегментації циклічних сигналів

В узагальненій структурній схемі систем цифрової обробки циклічних сигналів (див. рис. 1.9) важливим блоком їх основного опрацювання є блок сегментації. Від коректності та ефективності роботи його методів значною мірою залежить результат діагностики чи прогнозу, що отримується в таких автоматизованих системах опрацювання циклічних сигналів.

У додатку Д наведені відомі математичні методи сегментації, які використовуються в сучасних автоматизованих системах діагностики чи прогнозування для розв'язку задачі виділення меж сегментів циклічних сигналів. В таблиці Д.2, додатку Д для порівняння, наведено їх основні властивості.

Виділяють два підходи щодо побудови математичних моделей – детермінований та стохастичний. Згідно такого підходу, методи опрацювання циклічних сигналів, зокрема, і методи сегментації поділяються на такі які ґрунтуються на детермінованих математичних моделях і такі які ґрунтуються на стохастичних (випадкових) математичних моделях.

1.7.1. Методи сегментації циклічних сигналів (детермінований підхід).

На даний час в автоматизованих комп'ютерних системах цифрової обробки циклічних сигналів широко використовуються методи, які умовно можна поділити на три класи [185]:

- частотно-часові методи.
- методи, що базуються на хвильовому перетворенні;
- методи, в основу яких покладені нейронні мережі;

Перед початком огляду методів опрацювання (сегментації) циклічних сигналів необхідно сказати, що вони можуть розв'язувати окрім основної задачі сегментації, тобто виділення відповідних сегментів, і інші підзадачі, наприклад, розпізнавання виділених сегментів та аналіз коректності структури виділеного циклу і відповідно його сегментів (структурні методи). Іноді підзадачі, які реалізуються різними методами, об'єднуються в одному методі тоді кажуть, що їх здійснює один метод сегментації, проте варто розділяти ці підзадачі окремо. Тому серед, розглянутих в даній роботі методів будемо розділяти ті, які використовуються для виділення сегментів, та ті, які використовуються для розпізнавання (ідентифікації, класифікації) виділених сегментів.

Клас частотно-часових методів є найбільш поширеним в автоматизованих комп'ютерних діагностичних системах [70, 71, 148, 149, 191]. Методи які належать до цього класу алгоритмів, відповідно проводять опрацювання циклічних сигналів в часовій чи частотних областях. При використанні підкласу частотних алгоритмів проводять опрацювання циклічних сигналів перейшовши з часової області їх представлення у частотну область. Для цього використовують Фур'є-перетворення. При цьому досліджуваний сигнал розкладають у ряди за дискретними тригонометричними функціями. За такого підходу даний підклас алгоритмів застосовується лише для стаціонарних сигналів. При опрацюванні нестационарних сигналів припускають, що вони складаються зі стаціонарних сегментів. При такому підході використовують віконне перетворення Фур'є.

Переваги даних методів полягають у стійкості до присутності шумів у корисному сигналі [185]. Проте недолік таких методів полягає у складності вибору оптимальної довжини вікна. При виборі великої довжини вікна порушується припущення про стаціонарність, а при виборі малої довжини вікна погіршується роздільна здатність за частотою. Крім цього дані методи не дозволяють забезпечити усі висунуті вимоги до розробляємих методів

сегментації.

Другим поширеним підкласом частотно-часових методів є часові методи. Даний підклас алгоритмів набув значного поширення завдяки тому, що їх методи проводять опрацювання циклічних сигналів в часовій області та дозволяють оперувати діагностичними ознаками, загально прийнятими в лікарській практиці. Наприклад, у випадку опрацювання ЕКС лікар-кардіолог традиційно оперує діагностичними ознаками отриманими з зафіксованої на паперовій стрічці електрокардіограми чи ЕКС віображеного на екрані монітора. Методи які входять до даного підкласу в літературних джерелах поділяються на метричні та структурні [185].

Методи які відносяться до метричних оперують діагностичними ознаками які являють собою кількісні показники циклічного сигналу. До них належать амплітуди сегментів, тривалості сегментів, площі діагностичних сегментів, крутизна фронтів наростання діагностичних сегментів та інші.

Розглянемо метричні методи які відносяться до підкласу часових методів сегментації циклічних сигналів:

- методи аналізу амплітудних характеристик сигналу;
- методи аналізу різницевих функцій першого й другого порядку та порівняння її екстремумів з пороговими значеннями;
- методи аналізу допоміжних залежностей типу „функції форми”, „узагальненої енергетичної функції” та інших;
- методи аналізу з використанням еталонних форм.

Найпростішими і найпоширенішими метричними методами є методи засновані на аналізі амплітудних характеристик сигналу [1, 8, 11, 41, 70, 71, 300, 301, 359, 393, 462]. Дані методи проводять вимірювання амплітуд сегментів циклічних сигналів та їх порівняння з раніше встановленими пороговими значеннями. Це дозволяє будувати методи пошуку характерних сегментів циклічних сигналів. Наприклад при опрацюванні ЕКС використовуються метричні методи, які дозволяють проводити пошук R-сегментів.

Переваги таких методів є простота використання та відсутність у потребі

значних обчислювальних потужностей для їх реалізації. До недоліків слід віднести значну чутливість до присутності в досліджуваному циклічному сигналі артефактів технічного та біологічного походження. Також дані методи чутливі до таких видів патологій ЕКС, які проявляються у високоамплітудних сегментах Р або Т у порівнянні з малими амплітудами сегмента-Р, а також у випадку коли спостерігається у досліджуваному циклічному сигналі дрейф ізопотенціальної лінії (трендова компонента). Хоча дані методи і дозволяють забезпечити більшість із висунутих вимог до розробляємих методів сегментації проте обмеженість використання їх практиці очевидна. Методи аналізу амплітудних характеристик сигналу наведено у додатку Д, підпункт Д.1.3.

Широке використання в автоматизованих системах цифрового опрацювання циклічних сигналів набули методи сегментації, (методи визначення QRS – комплексів, пошуку та виділення R-сегментів), засновані на визначенні різницевої функції першого та другого порядку та аналізі отриманих результатів.

До таких методів [71, 139, 346, 440, 462] належать методи аналізу різницевої функції першого порядку (першої похідної) та порівняння отриманих результатів її екстремумів з пороговими значеннями. Широкого застосування набули ці методи завдяки тому, що логіка їх опрацювання є простою і такі алгоритми легко реалізуються засобами обчислювальної техніки, що є їх значною перевагою у порівнянні з іншими. До недоліків даних методів слід віднести значну чутливість до зашумлених циклічних сигналів та сигналів з артефактами. На практиці такі недоліки частково усуваються із використанням ефективних методів попереднього опрацювання (фільтрації та усунення трендової складової з досліджуваного циклічного сигналу).

До методів сегментації, в складі яких використовується процедура визначення різницевої функції другого порядку (другої похідної) відносять метод „функції форми”, результати якого відображають ті чи інші часові моменти в які відбувається зміна форми сигналу. В основі таких методів покладено певне нелінійне перетворення циклічного сигналу. В якості нелінійного перетворення – „функції форми”, „множника граничної форми” використовують функцію від

модуля різницевої функції другого порядку (другої похідної), що визначається для низькочастотної складової циклічного сигналу, наприклад ЕКС [185]. Перевага таких методі полягає у тому, що вони окрім задачі сегментації застосовуються також для розв'язку задачі стиснення даних [223]. До недоліків таких методів належать ті самі, що і у випадку опрацювання циклічних сигналів на основі методів аналізу різницевої функції першого порядку (першої похідної). Методи сегментації, засновані на використанні похідних, наведено в додатку Д, підпункт Д.1.4.

Разом з метричними методами заснованими на аналізі різницевих функцій першого та другого порядку будують методи які виявляють сегментів малої амплітуди та тривалості ніж R-сегмент, наприклад сегмента-R. З цією метою при сегментації ЕКС використовуються алгоритми, які виділяють QRS-сегменти і після цього замінюють їх значення на значення рівня ізопотенціальної лінії. Застосувавши таку процедуру, опрацювають змінений циклічний сигнал і виділяють R-сегменти, даний підхід описано в роботі [386].

В автоматизованих система опрацювання циклічних сигналів існують методи з використанням фільтрації ковзним середнім та зваженого і піднесеного до квадрату сигналу із застосуванням оператора першої похідної [440]. Відомим та поширеним є алгоритм виявлення QRS-комплексу Пана-Томпкінса [445]. Даний метод заснований на аналізі нахилу QRS-комплексу, аналізу його амплітуди і ширини з використанням фільтрів, оператора першої похідної та адаптивного порогового рівня. Даний метод поєднує в своєму складі описані вище підходи у розглянутих методах.

До метричних методів слід віднести методи побудовані з використанням смугових фільтрів, які застосовуються в поєднанні з іншими методами, такі методи описані в роботах [382, 445]. Використання цифрових фільтрів для задачі сегментації засновано на знанні частотних складових QRS-комплексу, що дозволяє виділяти (подавляти) відповідні частоти циклічного сигналу. Даний клас алгоритмів є відносно простим в плані обчислювальних операцій проте його складність значно зростає під час проведення сегментації і збільшується зі

збільшенням кількості оброблюємих фрагментів циклічних сигналів.

У роботах [95, 466] описаний метод головна ідея якого полягає у тому, що один QRS-комплекс на початку опрацювання ЕКС приймається за еталон. Прийнявши еталон відбувається опрацювання циклічного сигналу при цьому співставляються інші QRS-комплекси з вибраним еталоном та проводиться їх сегментація. При такому підході використовуються різні метрики близькості наприклад, середньоквадратична, рівномірна, кореляційна. На відміну від інших методів цей метод володіє значною завадостійкістю. Проте його головний недолік полягає у тому, що невдалий вибір еталону призводить до помилок при його порівнянні з іншими діагностичними сегментами [185]. Як правило, еталон вибирає експерт. Метод сегментації на основі використання еталонів наведено у додатку Д, підпункт Д.1.5.

До відомих методів опрацювання циклічних сигналів належать методи, в основі яких покладено хвильове перетворення. Дані методи є альтернативою методів на основі Фур'є перетворення. Згідно з роботами [121, 156, 358, 360, 403, 408, 447, 450, 452, 457, 459] такі методи дозволяють проводити аналіз у частотно-часовій області при цьому як стаціонарних, так і нестаціонарних сигналів. Даний клас методів (алгоритмів) використовуються не тільки для виділення (сегментації) характерних діагностичних сегментів, наприклад при опрацюванні ЕКС, а також використовуються під час їх розпізнавання. Крім цього даний клас алгоритмів дозволяє виконувати ще одну підзадачу опрацювання яка полягає у стисненні отриманих даних з незначною втратою інформації. У додатку Д, підпункт Д.1.1, для прикладу, наведено алгоритми хвильового перетворення для задачі сегментації ЕКС.

Відомі методи хвильового перетворення можна класифікувати за двома їх видами [121]:

- надлишкове неперервне (CWT);
- дискретне ортогональне (DWT).

До першого виду хвильового перетворення, яке в останні роки, широко використовується, в тому числі для аналізу серцевого ритму, сегментації QRS-

комплексів ЕКС, та дослідження діагностичних зон Р і Т відносять надлишкове неперервне перетворення.

До другого виду перетворення належить дискретне ортогональне перетворення воно переважно використовується з метою стиснення даних. Перевага даного класу методів у порівнянні з частотним полягає у виділенні діагностичних сегментів з кращою роздільною здатністю по частоті, що дозволяє проводити детальний аналіз низькочастотної та високочастотної їх складових [185]. До переваг даного класу алгоритмів також можна віднести високу стійкість (нечутливість) до присутності в корисному сигналі шумів та можливість стиснення потрібної інформації. Ще однією перевагою алгоритмів даного класу є те що їх можна використовувати для того щоб відрізнити сегменти ЕКС (в тому числі і QRS-комплекс) від артефактів та шумів, а також дрейфа ізопотенціальної лінії ЕКС [411]. Хоча даний клас методів є поширеним і володіє низкою переваг, проте не всі методи, які використовуються в сучасних автоматизованих діагностичних системах досить інформативно висвітлені в літературних джерелах, насамперед, це пов'язано з комерційною таємницею фірм-розробників діагностичної апаратури, в основі яких покладені методи на основі хвильового перетворення. Це не дозволяє їх об'єктивно порівняти та однозначно стверджувати про їх ефективність. Крім цього вибір «материнського вейвлета» має бути наближений до форми QRS-комплексу, а його форма може суттєво відрізнитись наприклад, QRS-комплекс може містити роздвоєння та розтросення R-сегментів, що є ознакою патології. Як було сказано вище даний клас алгоритмів проводить опрацювання у частотній області та не задовольняє висунуті вимоги до розробляємих методів сегментації у повному обсязі. Використання методів, заснованих на вейвлет-перетворенні, вимагає значних обчислювальних потужностей. В іншому випадку такі методи є повільними, мають низьку швидкодію, що проявляється у пошуку локальних максимумів (мінімумів) із використанням порогів [121] при різних масштабних коефіцієнтах.

У багатьох працях, які присвячені методам сегментації циклічних сигналів здійснюється спроба поєднання різних методів. Наприклад, у роботі [156]

наведено методи, які розв'язують задачу сегментації (комплексного виявлення PQRST-сегментів) за рахунок застосування методу в основі якого покладено визначення першої похідної та методу заснованого на дискретному вейвлет-перетворенні [121, 403]. В іншій праці [381] описаний метод заснований на перетвореннях «по тривалості», який теж використовує в своїй основі метод першої похідної, яка дозволяє виявляти P-сегмент при опрацюванні ЕКС, що реєструється по багатьох каналах. Методи, засновані на використанні хвильового перетворення, також використовуються для аналізу інших даних, наприклад, для аналізу профілограм поверхнь металів [122].

З розвитком інформаційних технологій почали широко використовуватись системи цифрової обробки, в яких покладені алгоритми на базі нейронних мереж [123, 362, 437, 451, 455, 469]. Використання нейронних мереж (див. додаток Д, підпункт Д.1.2) дозволяє проводити розв'язок задачі розпізнавання та класифікації виділених діагностичних сегментів під час проведення кардіодіагностики. Крім розпізнавання характерних елементів циклічних сигналів, алгоритми нейронних мереж часто застосовують для фільтрації, як це показано у роботі [432]. На відміну від інших методів опрацювання даних клас алгоритмів перед застосуванням необхідно навчити по репрезентативній базі типових циклічних сигналів чи їх виділених сегментів. Таке навчання полягає у визначення вагових коефіцієнтів між нейронами побудованої мережі. В процесі навчання нейронна мережа здатна виявляти складні закономірності між вхідними та вихідними даними. Проте в тих ситуаціях на практиці, які зумовлені різноманітністю сегментної структури циклічних сигналів і присутністю в ній артефактів (викликаних завадами технічного чи біологічного походження), алгоритми на основі нейронних мереж будуть не завжди давати коректні результати. Тому ефективність роботи алгоритмів такого класу значною мірою буде залежати від попередньо проведеного навчання, а також ефективних методів попереднього опрацювання (вони чутливі до присутності шуму в ЦС) та методів сегментації. Переваги застосування такого класу алгоритмів у задачах опрацювання циклічних сигналів полягають у кращому розпізнаванні

характерних сегментів циклічних сигналів у порівнянні з іншими класами алгоритмів. Тому даний клас алгоритмів частіше використовують саме для задачі розпізнавання, коли вже визначені сегменти циклічних сигналів на основі методів сегментації [185].

1.7.2. Методи сегментації циклічних сигналів (стохастичний підхід).

Даний клас методів заснований на використанні математичних моделей, які описують циклічні сигнали, використовуючи стохастичну парадигму. Тому в основі їх побудови покладено ймовірнісні характеристики та параметри стохастичних математичних моделей, які необхідно закладати в нові методи сегментації при їх побудові. До методів, які реагують на зміну ймовірнісних характеристик випадкових процесів належать методи які відомі в літературі як методи пошуку розладки [31, 40, 42, 138, 246, 247, 442, 453] у додатку Д наведені теоретичні відомості щодо цих методів.

У роботі [185] розроблено метод визначення сегментів-зон, що застосовується при сегментації ЕКС, він заснований на визначенні моментів розладок випадкового процесу. Суть методу полягає в урахуванні особливостей циклічного сигналу (ЕКС), а саме, чергуванні стаціонарних (етап розслаблення серцевого м'яза) та нестаціонарних (етап активного скорочення серцевого м'яза) сегментів циклічного сигналу. Перевага даного методу полягає у стійкості його до присутності завад у досліджуваному циклічному сигналі. Недолік даного методу полягає у обмеженості його використання – лише для ЕКС, циклічна структура якого має чергування стаціонарних та нестаціонарних сегментів на циклі. Тому він не може бути поширений для опрацювання інших циклічних сигналів в задачах їх сегментації, оскільки їх структура відмінна від структури ЕКС. Крім цього даний метод не задовольняє всіх вимог висунутих до розробляємих методів сегментації зокрема він дозволяє враховувати лише постійний ритм циклічного сигналу.

1.7.3. Методи, які використовуються для розпізнавання (ідентифікації, класифікації) виділених сегментів циклічного сигналу та методи аналізу його ритму. Після застосування методів сегментації необхідно проводити

розпізнавання виділених сегментів та встановлювати коректність, правильність виділеної сегментної структури. З цією метою застосовуються методи, в основі яких використовуються нейронні мережі, а також методи, які в літературі носять назву структурних [46, 45, 322, 362, 437, 455, 468]. Як відомо, для задачі аналізу коректності структури сигналів широко використовують апарат математичної лінгвістики. Методи, які використовують даний підхід, полягають у тому, що для опису виділених об'єктів розпізнавання й побудови самої процедури використовують послідовності елементарних символів. При застосуванні таких методів, у процесі розпізнавання, встановлюється, чи є дана послідовність символів синтаксично правильною, коректною відносно заданої граматики. Аналізуючи отримані слова (послідовності символів), приймається рішення про правильність і коректність виділеної сегментної структури циклічного сигналу. Використовуючи структурний підхід виділяють два види його аналізу:

- структурно-лінгвістичний (синтаксичний);
- структурно-статистичний.

В роботах [45, 46] описані методи, які реалізують структурно-лінгвістичний підхід, щодо опрацювання ЕКС, вони засновані на аналізі послідовно розташованих символів (імен) які відповідають типам виділених сегментів. Методи структурно-лінгвістичного підходу порівняно прості й не потребують значних обчислень при їх застосуванні. Ефективність аналізу структури циклічних сигналів на її коректність визначається повнотою граматичних правил та порогових значень, що встановлюються дослідним шляхом. До недоліків даного методу слід віднести значну залежність результатів його роботи від точності виділених сегментів на етапі їх сегментації.

До методів які реалізують структурно-статистичний підхід відносять методи в основі яких покладені апріорні та апостеріорні ймовірності поєднань значень різних виділених сегментів [351]. При використанні структурно-статистичних методів, зокрема при аналізі ЕКС, будуються правила перевірок поєднань відповідних сегментів та їх груп. Для побудови граматики необхідна база репрезентативних ЕКС. При такому підході, використовуючи репрезентативні

бази, процес навчання методів може бути автоматизованим. До недоліків структурно-статистичних методів слід віднести їх низьку швидкодію, яка зумовлена значною кількістю обчислень, що може суттєво впливати на час опрацювання при застосуванні методів такого класу у мобільних автоматизованих діагностичних системах.

У результаті здійснення сегментації (виділення відповідних сегментів циклічних сигналів), проведенні їх розпізнавання (ідентифікації) отримують інформацію про форми, амплітуди й тривалості кожного сегмента. Провівши аналіз коректності структури циклічного сигналу, проводять класифікацію отриманих сегментів та інтерпретацію ЕКС з метою постановки діагностичних висновків про функціональний стан серця в автоматизованих системах кардіодіагностики. В структурі методів опрацювання циклічних сигналів (див. підпункт 1.1.1.1) існує два підходи щодо побудови методів третього та четвертого етапу опрацювання циклічних кардіосигналів. До цих етапів належить етап визначення (морфологічних та ритмічних) діагностичних ознак та етап проведення діагностики з використанням побудованих діагностичних просторів.

Нагадаємо, що методи, які використовують на цих етапах опрацювання кардіосигналів під час проведення кардіодіагностики, не є метою дослідження даної дисертаційної роботи, тому їх огляд в дані роботі здійснений лише поверхнево.

В залежності від того, як відбувається процес інтерпретації отриманих даних в автоматизованих діагностичних системах виділяють два класи методів: перший, використовує детермінований підхід, при цьому методи моделюють логіку лікаря-діагноста [462]. В таких методах використовуються діагностичні ознаки захворювань, значущість яких встановлена медициною. До методів другого типу, які використовують статистичний підхід, відносять методи в основі яких покладені діагностичні ознаки, що отримуються під час статистичного опрацювання циклічних сигналів і засновані вони на параметрах та характеристиках якими оперує теорія ймовірності та математична статистика [46]. В таких методах не використовується традиційна логіка лікаря-діагноста, як у

випадку аналізу ЕКС, прийняття діагностичних рішень ґрунтується на використанні об'єктивних статистичних критеріїв [45, 46].

В таблиці Д.2, додатка Д наведено класифікацію та порівняльний аналіз відомих методів опрацювання циклічних сигналів, які реалізують етапи основної обробки – методи виділення (сегментації) діагностичних сегментів та методи їх розпізнавання (ідентифікації). Таке поєднання різних за задачами (підзадачами) опрацювання методів зроблене тому, що деякі з проаналізованих методів автоматизованого опрацювання циклічних сигналів використовуються окремо, наприклад, лише для сегментації, а інші, наприклад, в поєднанні з методами розпізнавання (ідентифікації) сегментів. Останні дозволяють проводити як виділення (сегментацію), так і розпізнавання діагностичних сегментів, тобто реалізують одразу дві задачі основного етапу автоматизованого опрацювання циклічних сигналів.

Розглянемо інші методи з позиції їх використання для розв'язування задачі сегментації, які можуть бути адаптовані та застосовані на етапі виділення чи розпізнавання сегментів.

При побудові методів визначення меж відповідних сегментів циклічних сигналів (методів сегментації), можуть бути застосовані для підзадачі розпізнавання (класифікації) виділених сегментів методи кластерного аналізу [4, 290, 352, 378, 380, 395, 405, 471]. Застосовувати без попереднього опрацювання циклічних сигналів методи кластерного аналізу для розв'язання саме задачі сегментації (виділення меж сегментів) циклічних сигналів, на думку автора, не є коректним, оскільки складно визначити критерій за яким буде здійснений вибір належності відповідних однофазних значень меж сегментів досліджуваного циклічного сигналу відповідним кластерам. Коректним буде застосовувати методи кластерного аналізу для виявлення, наприклад, присутності в сигналі артефактів на досліджуваних сегментах-циклах і в разі їх виявлення не враховувати аномальний сегмент-цикл, оскільки наявність артефактів суттєво впливає на результати опрацювання циклічних сигналів. Спотворення сегментів-циклів, викликаних наявністю в них артефактів, може бути викликане різними

чинниками, наприклад, поганим контактом електрода з тілом пацієнта тощо). Огляд основних методів кластерного аналізу наведено в додатку Д., підпункт Д.4.

Типові задачі виділення різних об'єктів виникають під час здійснення процедури сегментації зображень. Коли необхідно провести сегментування не одновимірного об'єкта (сигнала), а двовимірного (зображення, відеозображення). У додатку Д, підпункт Д.5 оглядово наведено відомі методи, які застосовують для розв'язування задачі сегментації зображень [86, 161, 237, 267, 309, 325, 356, 363, 394, 409, 412, 429, 388, 444, 449, 454, 464, 465, 467]. З проведеного аналізу методів сегментації зображень слід відмітити, що методи, які використовують для розмежування об'єктів на зображенні будуються з використанням подібних підходів, що і методи сегментації сигналів. Наприклад, до таких методів належать порогові методи, методи із застосуванням нейронних мереж та інші. Хоча підходи до сегментації зображень подібні, проте неможна однозначно стверджувати про можливість адаптації методів сегментації зображень для подібних задач сегментації циклічних сигналів, оскільки методи сегментації зображень будуються з використанням наявної інформації про межі об'єктів, наприклад, про яскравість, контрастність, координати відповідних пікселів тощо. Таку інформацію опрацьовують методи сегментації зображень, а у випадку сегментації циклічних сигналів інформація про межі сегментів зосереджена у часових відліках та відповідних їм значеннях. Проте при побудові нових методів сегментації циклічних сигналів можна застосовувати подібні підходи (чи частково застосовувати алгоритми), які лежать в основі методів сегментації зображень, створюючи при цьому нові комбіновані, гібридні методи сегментації циклічних сигналів.

Після проведення сегментації та ідентифікації виділених сегментів використовують методи, які дозволяють оцінювати ритм циклічних сигналів. При аналізі ритму розглядають два випадки, коли ритм є постійним або коли він змінюється у часі. Останній випадок адекватніше описує реальні циклічні сигнали, зокрема ЕКС з наявними патологіями серцевого ритму (наприклад, тахікардія). У випадку, коли постійний ритм враховано у математичній моделі,

використовують відомі методи для його оцінювання, наприклад методи визначення періоду, описані у роботах [185, 276]. У випадку, коли ритм є змінним, використовують лише один метод оцінювання ритмічної структури циклічного сигналу, заснований на використанні кусково-лінійної інтерполяції [196]. Проте на практиці лінійні залежності зміни ритму не завжди адекватно відображають його зміни у реальних циклічних сигналах. Необхідно зазначити, що говорячи про ритм мова йде не лише про можливість враховувати зміну значень тривалостей R-R-інтервалів при аналізі ЕКС чи аналізі варіабельності серцевого ритму який передбачає визначення стандартних показників. А мова іде про можливість врахувати при аналізі ритму всіх значень циклічного сигналу, зокрема для ЕКС, вершин сегментів P-P-, Q-Q-, R-R-, S-S-, T-T-інтервалів та інших значень циклів.

Враховуючи проаналізовані методи опрацювання циклічних сигналів, слід зауважити, що більшість відомих методів сегментації циклічні сигнали в деяких випадках дають некоректні, іноді хибні результати виділення сегментів. У додатку Д, підпункті Д.1.6 наведено приклади електрокардіосигналів, при опрацюванні яких відомі методи некоректно виділяють діагностичні сегменти. Такі результати зумовлені, по-перше, складністю, варіабельністю структури різних циклічних сигналів, наявністю у ній як сегментів-циклів, так і різної форми та кількості сегментів-зон на циклах; по-друге, неможливістю адаптуватися до змін ритму (ритмічної структури) циклічних сигналів, тобто врахувати в методах як постійний, так і змінний ритми циклічних сигналів; по-третє, дією на досліджуваний циклічний сигнал завад технічного та біологічного походження, що ускладнює їх опрацювання; по-четверте, неможливістю методів сегментації адаптуватися під різні циклічні сигнали на етапі виділення сегментів. Наявність вказаних недоліків зумовлена недостатньою розбудовою математичного забезпечення, зокрема методів сегментації, оскільки немає єдиного підходу до побудови методів сегментації різних циклічних сигналів, а вони (методи) значною мірою визначають точність та достовірність опрацювання циклічних сигналів у задачах діагностики чи прогнозування. Такі аргументи вказують на необхідність

та актуальність створення нових математичних моделей чи врахування відомих зі створенням на їх основі нових методів або узагальненої методології сегментації циклічних сигналів, які певним чином дозволять вирішити існуючі проблеми сегментації циклічних сигналів (ідентифікації сегментних структур) у різних галузях науки, техніки та медицини. Це дає всі підстави сформулювати важливу науково-прикладну проблему, що полягає у розвитку теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів у напрямку створення нових методів ідентифікації їх сегментних та ритмічних структур, що підвищують точність їх опрацювання та комп'ютерного моделювання в автоматизованих системах цифрової обробки даних.

Вирішення цієї проблеми дозволить враховувати особливості значного структурного різноманіття циклічних сигналів, закономірності та мінливості їх ритму (постійного чи змінного) і надасть змогу адаптуватися до врахування його змін, що забезпечить стратегію розвитку теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів у напрямку створення методології сегментації (ідентифікації сегментних структур) та нових методів оцінювання ритмічних структур на основі обґрунтованих математичних моделей циклічних функцій у рамках детермінованого та стохастичного підходів. Розбудова нового математичного забезпечення дозволить підвищити точність опрацювання циклічних сигналів в автоматизованих системах цифрової обробки даних.

1.8. Висновки до першого розділу

1. Враховуючи проведений огляд літературних джерел, розглянуто основні методи досліджень циклічних сигналів у медицині під час діагностики стану серця людини за зареєстрованими циклічними КС при допомозі автоматизованих діагностичних систем, у механіці під час діагностики стану поверхні металу, в економіці під час аналізу і прогнозування циклічних економічних процесів. Встановлено, що циклічні сигнали різної фізичної природи мають спільні феноменологічні властивості, які полягають у наявності в них повторюваної

структури (сегментів-циклів чи сегментів-зон), при цьому їх розгортання у часі характеризується постійним чи змінним ритмом. Такі особливості циклічних сигналів необхідно враховувати під час побудови математичного забезпечення (математичних моделей та методів) автоматизованих систем їх цифрової обробки для проведення діагностики чи прогнозування.

2. Проаналізовано типові діагностичні ознаки в системах автоматичного опрацювання циклічних сигналів (діагностичних та прогностичних) та побудовано типову узагальнену структурну схему їх систем. У результаті проведеного аналізу типової структури цифрових систем обробки циклічних сигналів (системний рівень) виявлено недоліки, які переважно зосереджені у блоці сегментації циклічних сигналів.

3. Враховуючи порівняльний аналіз математичних моделей циклічних сигналів та їх властивостей з позиції врахування ними повторюваної, сегментної структури, сформульовано вимоги до математичної моделі циклічних сигналів. Враховуючи висунуті вимоги та проведений огляд відомих математичних моделей циклічних сигналів (рівень математичного забезпечення) обґрунтовано використання в якості класу математичних моделей – класу циклічних функцій для випадку детермінованого та стохастичного підходів. Конкретизовано математичні моделі в межах їх класу, при використанні детермінованого підходу – детермінована циклічна числова функція, а при використанні стохастичного підходу – циклічний випадковий процес. Обґрунтовані математичні моделі дозволяють врахувати повторювану сегментну структуру (сегментну циклічну та сегментну зонну структури) й мінливість (змінність та постійність) ритму циклічного сигналу. Враховуючи обґрунтовані математичні моделі сформульована постановка проблеми ідентифікації сегментної циклічної та сегментної зонної структур, висунуті вимоги щодо побудови нових методів сегментації.

4. Проведено порівняльний аналіз та класифікацію існуючих методів сегментації циклічних сигналів, які реалізують етапи виділення й ідентифікації інформативно значущих сегментів циклічних сигналів в автоматизованих

комп'ютерних системах їх цифрової обробки в медицині, механіці та економіці. Аналізуючи методи опрацювання циклічних сигналів, зокрема методи сегментації для визначення структури, характеристик та параметрів обраних математичних моделей встановлено, що немає єдиного, узагальненого підходу щодо побудови методів сегментації різних циклічних сигналів, тобто немає узагальненої методології їх сегментації. Крім цього, недостатньо розвинені методи ідентифікації ритмічних структур. Враховуючи це, сформульовано науково-прикладну проблему що полягає у розвитку теорії моделювання у напрямку створення методології сегментації циклічних сигналів (ідентифікації їх сегментних структур) і оцінюванні їх ритмічних структур у системах їх цифрової обробки, яка і визначає напрямок дисертаційного дослідження.

РОЗДІЛ 2

СЕГМЕНТНІ СТРУКТУРИ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ СЕГМЕНТАЦІЇ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ

У цьому розділі, вибравши напрямок наукового дослідження, розглянуто основні поняття: сегмента, циклу та зони, які формують концептуальну модель циклічних сигналів. Враховуючи зазначені поняття, обґрунтовано узагальнену сегментну структуру циклічних сигналів, яка лежить в основі розробленої методології їх сегментації. Згідно з обґрунтованою математичною моделлю циклічних сигналів, в роботі, наведено дві сегментних структури: сегментна циклічна та сегментна зонна. Наведено основні математичні співвідношення для них. Враховуючи абстрактну циклічну функцію із сегментною структурою, побудовано таксономічне дерево класів моделей циклічних функцій, для яких розроблено методи сегментації (ідентифікації сегментних структур). Враховуючи описані сегментні структури та характеристики циклічних функцій, які є математичними моделями циклічних сигналів конкретизовано постановку завдання сегментації для двох типів сегментних структур.

Основні результати другого розділу опубліковано в роботах [170, 172, 418].

2.1. Концептуальна модель циклічних сигналів із сегментною структурою

Вибравши напрямок наукового дослідження, що полягає створенні методології сегментації (методів ідентифікації сегментних структур) та оцінюванні ритмічних структур циклічних сигналів, необхідно розглянути основні поняття, які лежать в основі концептуальної моделі та є підґрунтям для створення методології їх сегментації. Тому розглянемо узагальнену сегментну структуру циклічних сигналів.

На практиці, під час сегментації циклічних сигналів, математичними моделями яких є циклічні функції, виділяють характерні (репрезентативні)

фрагменти, ділянки циклічного сигналу, кожна з яких характеризує певний етап у роботі досліджуваної системи, процесу чи явища, яке розгортається у часі або просторі (механічні процеси на поверхні металів). Виділивши такі ділянки проводиться їх «прицільний» та достовірний аналіз. Наприклад, у медицині, під час проведення діагностики стану серця людини, аналізуються циклічні кардіосигнали лікарями-експертами [1, 2, 268]. При цьому застосовують автоматизовані діагностичні систем, які здійснюють виділення (сегментацію) циклів серцевого скорочення за зафіксованими електрокардіосигналами (електрокардіограмами). При такому аналізі, крім циклів серцевого скорочення, аналізують ділянки, фрагменти електрокардіосигналу, з яких складається кожен його цикл [1, 268]. Ці ділянки, в лікарській практиці, називають діагностичними зонами [1, 2, 268]. Для лікарів-діагностів важливим є аналіз як самих циклів серцевого скорочення, так і цих складових циклів – сегментів-зон, вони містять важливу діагностичну інформацію про стан серця пацієнта і характеризують роботу його підсистем (шлуночків, передсердь).

При такому аналізі в автоматизованих системах цифрової обробки циклічних сигналів, наприклад, кардіосигналів (електрокардіосигналів, реокардіосигналів, фонокардіосигналів та інших) важливими є їх морфологічні характеристики, особливості форми їх фрагментів – циклів, зон, так і ритмічні характеристики, тобто тривалості відстаней між однотипними фрагментами [170, 172] у різних циклах циклічних сигналів (кардіоінтервалограми та інші). Подібні підходи до аналізу циклічних сигналів є в економіці під час аналізу економічних циклів [89] чи в механіці під час аналізу процесів поверхні рельєфних утворень викликаних механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливом на них [80, 81, 324, 431]. Сегментуємі при цьому сегменти-цикли містять діагностичну інформацію про стан поверхні металів.

Для побудови методології сегментації циклічних сигналів (ідентифікації їх сегментних структур) необхідно розглянути поняття циклу та зони, а також узагальнене поняття сегмента, які в цілому дозволять описати узагальнену структуру досліджуваних циклічних сигналів. Тому, спочатку, формалізувавши

поняття циклу та зони, введемо та формалізуємо узагальнене поняття сегментної структури: сегментної циклічної та сегментної зонної структур.

Враховуючи результати, наведеного у додатку Е аналізу понятійно-термінологічно апарату теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів, зважаючи на значну омонімію та синонімію зазначеної термінології (у різних галузях науки медицини, механіки, економіки тощо), будемо використовувати означення таких базових понять (термінів): “циклічний сигнал”, “цикл”, “фаза”, “ритм”, “атрибут”, які описані у роботах Лупенка С.А. [201], доповнюючи та розширюючи цей перелік такими поняттями: “сегмент”, “зонна”, “сегментна структура”, “сегментна циклічна структура”, “сегментна зонна структура”, “ритмічна структура”.

Наведемо основні поняття (терміни), які будуть вживатися у рамках даного дисертаційного дослідження та у своїй сукупності формують концептуальну модель циклічних сигналів із сегментною структурою.

1. Сегмент – визначена методами сегментації ділянка, фрагмент (часовий чи просторовий) досліджуваного циклічного сигналу (функції), яка відповідає циклу або зоні в циклі. Поки не визначена належність фрагмента, ділянки сигналу до циклу чи до зони (не проведена їх ідентифікація) будемо називати його узагальнюючою назвою – сегментом.

2. Цикл – це найдрібніший сегмент циклічного сигналу (мислимо в розумінні такий фрагмент, що послідовно повторюється один за одним), який складається із однієї й тієї ж упорядкованої множини фаз та між якими існує відповідність за атрибутом (атрибутами) [201, 205]. Іншими словами, цикл – це повне, завершене розгортання у часі чи просторі упорядкованої множини фаз, через яку сегменти-цикли повторюються.

3. Зона – це сегмент циклічного сигналу, який є частиною певної ділянки, фрагмента циклу, (сегмента-циклу). Він також складається з однієї й тієї ж упорядкованої множини фаз, між якими існує відповідність за атрибутом для такого ж сегмента-зони, але в інших циклах циклічного сигналу. При цьому кожен цикл циклічного сигналу, який містить сегменти-зони, складається з однієї

й тієї ж кількості сегментів-зон, строго впорядкованих у кожному циклі циклічного сигналу. Іншими словами, зона – це частина циклу, яка відповідає певному етапу чи етапам розгортання у часі чи просторі упорядкованої множини фаз.

У загальному випадку цикли характеризують повне, завершене коливання циклічного процесу чи явища, а зони – лише певну стадію, ділянку, фрагмент у циклі циклічного сигналу. Структура та кількість зон у кожному циклі циклічного сигналу однакова, проте кількість зон у різних циклічних сигналах різна й зумовлюється конкретною специфікою предметної області використання циклічних сигналів у медицині, механіці, економіці тощо.

4. Фаза – це етап, стадія, яка характеризує розгортання у часі або просторі циклічного сигналу, яка у загальному випадку є множиною його значень, що взяті по одному із різних циклів циклічного сигналу та мають однаковий атрибут [201, 205].

5. Атрибут – характеризує упорядкований за множиною циклів сигнал, який має властивість подібності, еквівалентності між циклами. Прикладом атрибуту є рівність значень усіх однофазних відліків у різних циклах детермінованого циклічного сигналу [201, 205].

У випадку необхідності детального аналізу циклів циклічного сигналу в їх межах можуть штучно вводитися зони, з яких складається кожен цикл досліджуваного сигналу. Така необхідність поділу сегмента-циклу на сегменти-зони може бути продиктована особливістю самого циклічного сигналу, зумовленого його, наприклад, природою формування, породження чи необхідністю отримання більшої кількості інформації, яка буде врахована в подальших методах опрацювання (методах статистичного опрацювання, методах аналізу ритму тощо).

Поняття сегмент, цикл, зона, фаза та атрибут характеризують морфологічні характеристики циклічних сигналів. Проте поряд з морфологічними характеристиками циклічних сигналів важливими є також ритмічні характеристики. Тому розглянемо важливе поняття ритму циклічних сигналів.

6. Ритм. Будь-який циклічний сигнал характеризується своїм ритмом (темпом), що є його властивістю, яка задає величини часових або просторових проміжків (відстаней) між однофазними значеннями циклічного сигналу для всіх його сегментів-циклів, сегментів-зон та фаз [201, 205].

Ритм у циклічних сигналах може бути постійним (стабільним) чи змінним. Наприклад, коли маємо справу з постійним (стабільним) ритмом, то величини часових або просторових відстаней, проміжків між однофазними значеннями є постійними величинами, а тривалості циклів можна розглядати як тривалості періоду, як це у випадку періодичних детермінованих сигналів (циклічних сигналів). У випадку, коли відстані між однофазними значеннями в різних циклах відрізняються, тобто будуть різні за величиною тривалості циклів, то маємо справу із сигналом, який характеризується змінним ритмом.

Дані поняття в концепції методології сегментації циклічних сигналів у системах цифрової обробки даних, яка у формі тлумачень, таких понять, як „сегмент”, „цикл”, „зона”, „фаза”, „атрибут” та „ритм” адекватно описують циклічні сигнали й відображають важливі властивості значного структурного різноманіття їх часової або просторової структури, що дає можливість розвитку математичних засад формалізованої методології їх сегментації та дослідження в напрямку розвитку математичного апарату їх опрацювання (розбудови методів сегментації) та моделювання.

Враховуючи описані вище поняття, які ввійшли в концептуальну модель, зобразимо у вигляді структурної схеми взаємодію базових понять сегмента, циклу та зони, наведених на рисунку 2.1.

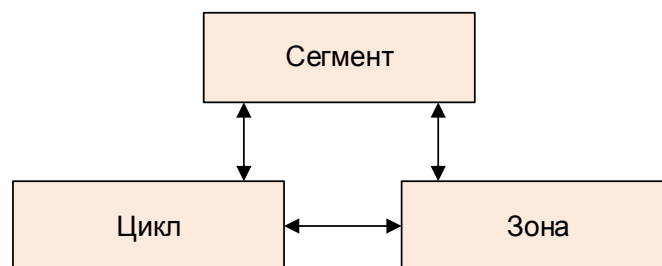


Рис. 2.1. Структурна схема взаємодії понять: сегмент, цикл, зона

Поняття, які входять у концептуальну модель, пов'язані між собою, як це показано на структурній схемі (див. рис. 2.1) і є важливими для описування узагальненої сегментної структури циклічних сигналів, яка відповідає або сегментній циклічній структурі або сегментній зонній структурі циклічних сигналів.

Таке врахування циклів і/або зон зумовлено їх наявністю у структурі циклічних сигналів. На рисунках 2.5 та 2.6, як приклад, наведено реальні циклічні сигнали, які відображають сегменти-цикли та сегменти-зони відповідно.

У структурній схемі (див. рис. 2.1) слід розуміти, що сегментом циклічного сигналу є або цикл, або зона. Поки не здійснена процедура ідентифікації сегмента, не встановлено його як цикл чи зону, будемо вживати узагальнений термін сегмент. У випадку, коли в циклічному сигналі присутні лише сегменти-цикли (вони ідентифіковані), то їх можна розглядати як сегменти циклічного сигналу, що відповідають його циклам. У випадку, коли в кожному циклі досліджуваного циклічного сигналу виділяють сегменти-зони (вони ідентифіковані), то кожну зону можна розглядати як відповідний сегмент циклу, при цьому на кожному циклі їх кількість є однаковою. Враховуючи це, розглянемо поняття узагальненої сегментної структури циклічних сигналів.

2.2. Узагальнена сегментна структура циклічних сигналів. Основні математичні співвідношення для сегментних структур циклічних сигналів

У загальному випадку узагальнену (абстрактну) сегментну структуру можна розглядати в межах двох підходів – детермінованого та випадкового. Відповідно сегментна структура може бути як детермінованою, так і випадковою. У другому випадку стохастичність закладається врахуванням випадкових моментів часу або простору (як випадкові величини), які відповідають межам сегментів-циклів чи сегментів-зон досліджуваних циклічних сигналів. Таке врахування випадкової сегментної структури наведено у додатку Ж, підпункт Ж.3 для випадкових циклічних функцій.

Оскільки на практиці в системах цифрової обробки циклічних сигналів проводять аналіз кардіосигналів, циклічних процесів рельєфних утворень, циклічних економічних процесів, циклів сонячної активності тощо), математичними моделями яких є циклічні випадкові процеси, як правило, однієї зафіксованої реалізації, тому при її опрацюванні будемо розглядати її як деяку детерміновану циклічну функцію (з невідомими параметрами). Тому будемо надалі розглядати узагальнену сегментну структуру (в рамках навіть стохастичного підходу), як детерміновану сегментну структуру циклічних сигналів, для якої моменти часу, які відповідають межах сегментів-циклів чи сегментів-зон для зафіксованої реалізації не є випадковими величинами проте для кожної зафіксованої реалізації вони є різними та невідомими.

Враховуючи концептуальну модель циклічних сигналів та структурну схему взаємодії базових понять (див. рис. 2.1), на рисунку 2.2 наведено структурну схему узагальненої сегментної структури.

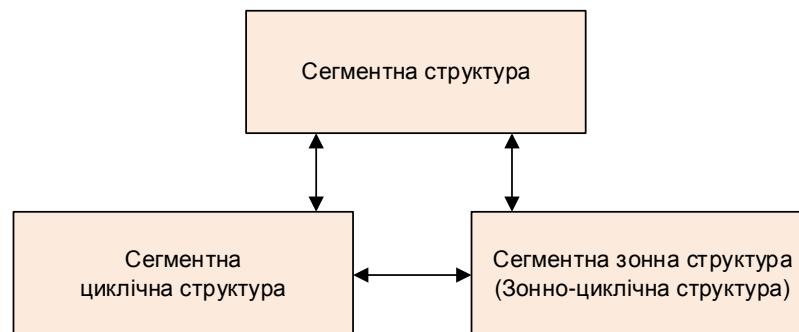


Рис. 2.2. Структурна схема узагальненої сегментної структури: сегментна циклічна структура; сегментна зонна структура

На практиці, у випадку, коли досліджуваний циклічний сигнал містить лише цикли, будемо використовувати сегментну циклічну структуру циклічних сигналів, як приклад (див. рис. 2.5). А у випадку, коли сигнал містить у межах циклів зони (це зумовлено особливістю самого циклічного сигналу, його природою формування, породження тощо) на кожному циклі циклічного сигналу (див. рис. 2.6) будемо використовувати сегментну зонну структуру циклічних сигналів. Розглянемо ці дві структури детальніше.

2.2.1. Сегментна циклічна структура циклічних сигналів. Як було сказано вище, узагальнена сегментна структура поділяється на сегментну циклічну структуру та на сегментну зону структуру. При цьому сегментна зона структура є вкладеною у сегментну циклічну структуру, оскільки вона деталізує (на циклах) сегментну циклічну структуру.

На рисунку 2.3 схематично зображено сегментну циклічну структуру циклічного сигналу при реєстрації C -циклів. На цьому ж рисунку позначені межі сегментів-циклів через задання початку t_i й закінчення t_{i+1} сегмента та тривалості сегментів-циклів $\{T_i, i = \overline{1, C}\}$.

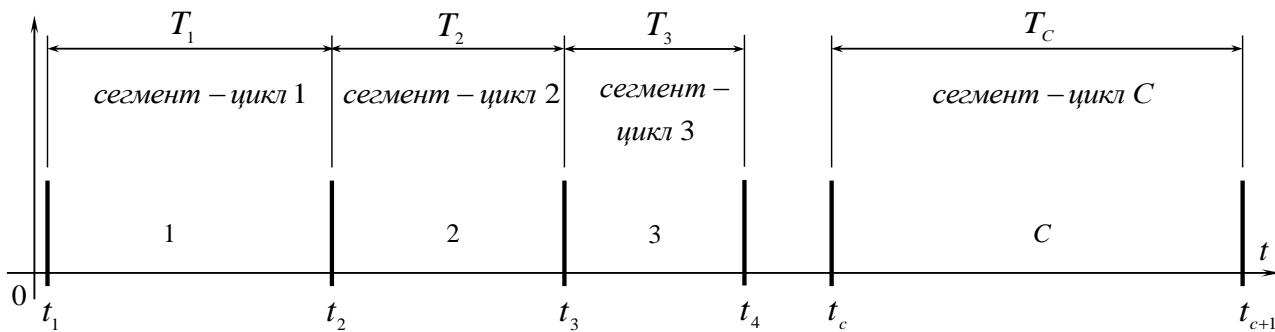


Рис. 2.3. Схематичне зображення сегментної циклічної структури циклічного сигналу

Тривалість циклічного сигналу при реєстрації C -циклів визначається через множину тривалостей їх сегментів-циклів $\{T_i, i = \overline{1, C}\}$, тобто

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=1}^C T_i. \quad (2.1)$$

Тривалість циклічного сигналу, що відповідає цілому циклу, визначається через часові або просторові відліки початку t_i та закінчення t_{i+1} i -го циклу в циклічного сигналу

$$T_i = t_{i+1} - t_i, i = \overline{1, C}. \quad (2.2)$$

Враховуючи сегментну циклічну структуру, тривалості сегментів-циклів впорядковані за часом множиною $\{T_i, i = \overline{1, C}\}$.

Момент часу або просторовий відлік, що відповідає початку i -ого циклу циклічного сигналу, будемо визначати

$$t_i = t_1 + \sum_{q=1}^{i-1} T_q, i = \overline{1, C}. \quad (2.3)$$

Момент часу або просторовий відлік, що відповідає закінченню i -ого циклу циклічного сигналу, будемо визначати

$$t_{i+1} = t_1 + \sum_{q=1}^{i-1} T_q + T_i, i = \overline{1, C}. \quad (2.4)$$

Сегментна циклічна структура повністю задається множиною моментів часу чи просторових відліків, які відповідають початку сегмента і його закінченню $\{t_i, i = \overline{1, C}\}$.

Для випадку аналогового сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, область визначення i -го сегмента-циклу визначається через часовий або просторовий півінтервал, який визначається відповідно двома величинами – початком t_i та закінченням t_{i+1} i -го сегмента-циклу для кожного циклічного сигналу, який аналізується

$$\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1}), i = \overline{1, C}. \quad (2.5)$$

Для випадку дискретного сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, область визначення i -го сегмента циклу визначається через множину дискретних часових відліків

$$\mathbf{W}_i = \{t_{i,l}, l = \overline{1, L}\}, i = \overline{1, C}, \quad (2.6)$$

де L - кількість дискретних відліків на циклі, для циклічного сигналу $L = const$.

Область визначення сигналу \mathbf{W} , який реєструється, дорівнює об'єднанню областей визначення сегментів циклів \mathbf{W}_i , які не перетинаються

$$\mathbf{W} = \bigcup_{i=1}^C \mathbf{W}_i, \quad \mathbf{W}_i \cap \mathbf{W}_q = \emptyset, \quad i \neq q, \quad i = \overline{1, C}. \quad (2.7)$$

У загальному випадку циклічний сигнал $F(t), t \in \widehat{\mathbf{W}} \subset \mathbf{R}$ заданий на скінченній області $\widehat{\mathbf{W}}$, причому область $\widehat{\mathbf{W}}$ не завжди є об'єднанням цілого числа областей визначення циклів [205, 206], тобто

$$\widehat{\mathbf{W}} \neq \bigcup_{i=1}^C \mathbf{W}_i. \quad (2.8)$$

На практиці, перед проведенням опрацювання циклічного сигналу, необхідно залишити лише ту його ділянку $F(t), t \in \widehat{\mathbf{W}}$, яка складається з цілого числа циклів, тобто для області його визначення можна записати

$$\widehat{\mathbf{W}} = \bigcup_{i=1}^C \mathbf{W}_i, \quad (2.9)$$

де C - кількість зареєстрованих повних циклів. При досить великій кількості зареєстрованих циклів таке відкидання крайніх сегментів циклічного сигналу практично не вплине на точність і достовірність процедури опрацювання циклічного сигналу.

2.2.2. Сегментна зонна структура циклічних сигналів. Як було сказано вище, сегментна зонна структура є вкладеною в сегментну циклічну структуру і в загальному випадку є його сегментною структурою. На рисунку 2.4 схематично зображено сегментну зонну структуру. На даному рисунку умовно зображено сегментну зонну структуру циклічного сигналу при реєстрації C -циклів. Кожен цикл такої сегментної структури складається із Z зон на циклі. Крім цього, на

цьому ж рисунку показані тривалості сегментів-циклів $\{T_i, i = \overline{1, C}\}$ та тривалості сегментів-зон $\{T_{ij}, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}\}$, складових сегментів циклів. Позначено сегменти-зони, з яких складається кожен цикл циклічного сигналу через задання меж початку сегмента-зони t_{ij} та його закінчення $t_{i,j+1}$ у кожному i -му циклі.

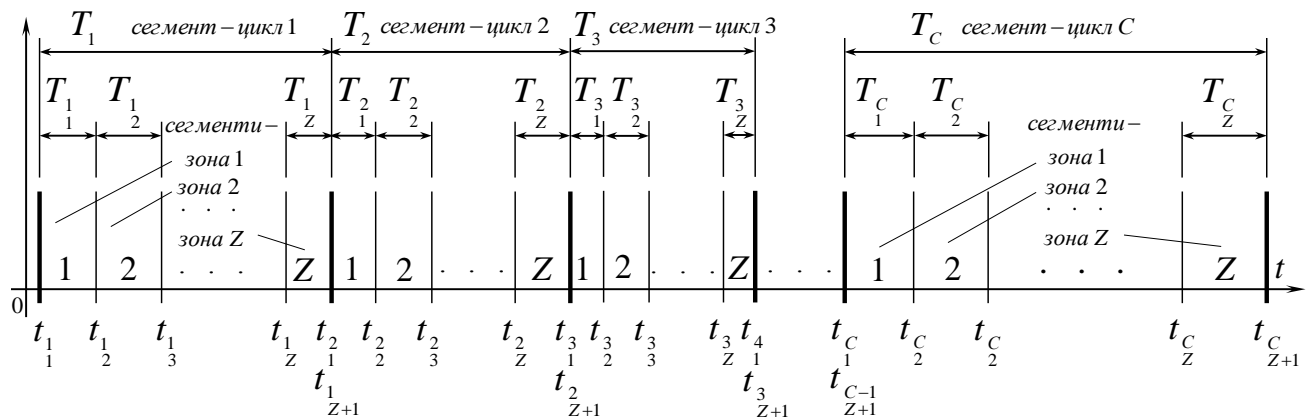


Рис. 2.4. Схематичне зображення сегментної зонної структури циклічного сигналу

Момент часу або просторовий відлік, що відповідає початку j -ої зони в i -му циклі циклічного сигналу, будемо визначати

$$t_{ij} = t_1 + \sum_{q=1}^{i-1} T_q + \sum_{q=1}^{j-1} T_{iq}, \quad j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}. \quad (2.10)$$

Для сегментної циклічної структури (див. рис. 2.3) початок першого циклу і початок першої зони в першому циклі сегментної зонної структури (див. рис. 2.4) співпадають, тобто $t_1 = t_{11}$. Це справедливо для всіх початків сегментів-циклів у кожних i -х циклах.

Момент часу або просторовий відлік, що відповідає закінченню j -ї зони циклічного сигналу в i -му циклі, буде визначатися через тривалості сегментів-зон у циклі

$$t_{i,j+1} = t_{ij} + T_{ij}, \quad j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}. \quad (2.11)$$

Сегментна зонна структура повністю задається множиною моментів часу або просторових відліків, які відповідають початку сегмента і його закінченню $\{t_j, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}\}$.

Тривалість сегмента циклічного сигналу, що відповідає цілому циклу, є найбільшим за тривалістю його сегментом, тривалість якого дорівнює сумі тривалостей у всіх сегментів-зон T_j , що входять у даний i -й цикл досліджуваного сигналу

$$T_i = \sum_{j=1}^Z T_j, i = \overline{1, C}. \quad (2.12)$$

Тривалість j -ої зони в i -му циклі T_j дорівнює різниці відліків закінчення t_{j+1} та початку t_j сегмента-зони в сегментній зонній структурі:

$$T_j = t_{j+1} - t_j, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}. \quad (2.13)$$

Тривалість циклічного сигналу при реєстрації C сегментів-циклів кожен з яких складається із Z сегментів-зон визначається через множину тривалостей циклів $\{T_i, i = \overline{1, C}\}$, або множину тривалостей зон $\{T_j, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}\}$, тобто

$$T_\Sigma = \sum_{i=1}^C T_i = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^Z T_j. \quad (2.14)$$

Для випадку аналогового сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, область визначення j -ого сегмента-зони в i -му сегменті циклу визначається через часовий або просторовий півінтервал, який визначається відповідно двома величинами – початком t_j та

закінченням $t_{i_{j+1}}$ j -ого сегмента-зони в i -му сегменті циклу для кожного циклічного сигналу, що аналізується

$$\mathbf{W}_j = [t_{i_j}, t_{i_{j+1}}), j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}. \quad (2.15)$$

Для випадку дискретного сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, область визначення i -го сегмента циклу визначається через множину дискретних часових відліків

$$\mathbf{W}_j = \{t_{i_{j,l}}, l = \overline{1, L_j}\}, L = \sum_{j=1}^Z L_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, \quad (2.16)$$

де L - кількість дискретних відліків на циклі, $L = const$; L_j - кількість дискретних відліків на j -му сегменті-зони.

Область визначення \mathbf{W}_i найбільшого сегмента, який відповідає i -му циклу, дорівнює об'єднанню областей визначення дрібніших сегментів-зон, що не перетинаються:

$$\mathbf{W}_i = \bigcup_{j=1}^Z \mathbf{W}_{i_j}, \mathbf{W}_{i_j} \cap \mathbf{W}_{i_q} = \emptyset, j \neq q, j, q = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}. \quad (2.17)$$

Область визначення сигналу \mathbf{W} , що реєструється, дорівнює об'єднанню областей визначення сегментів циклів \mathbf{W}_i або об'єднанню областей визначення дрібніших сегментів-зон \mathbf{W}_{i_j} на циклах, що не перетинаються:

$$\mathbf{W} = \bigcup_{i=1}^C \mathbf{W}_i = \bigcup_{i=1}^C \bigcup_{j=1}^Z \mathbf{W}_{i_j}, \mathbf{W}_{i_j} \neq \emptyset, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}. \quad (2.18)$$

Оскільки сегментна зонна структура вкладена в сегментну циклічну

структуру, то має місце зв'язок початків і закінчень відліків сегментів-зон та сегментів-циклів:

$$\begin{aligned} t_i &= t_i, i = \overline{1, C}, \\ t_{i+1} &= t_{i+1}, i = \overline{1, C}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

На рисунку 2.5, як приклад, наведено зображення циклічного сигналу із позначеною сегментною циклічною структурою.

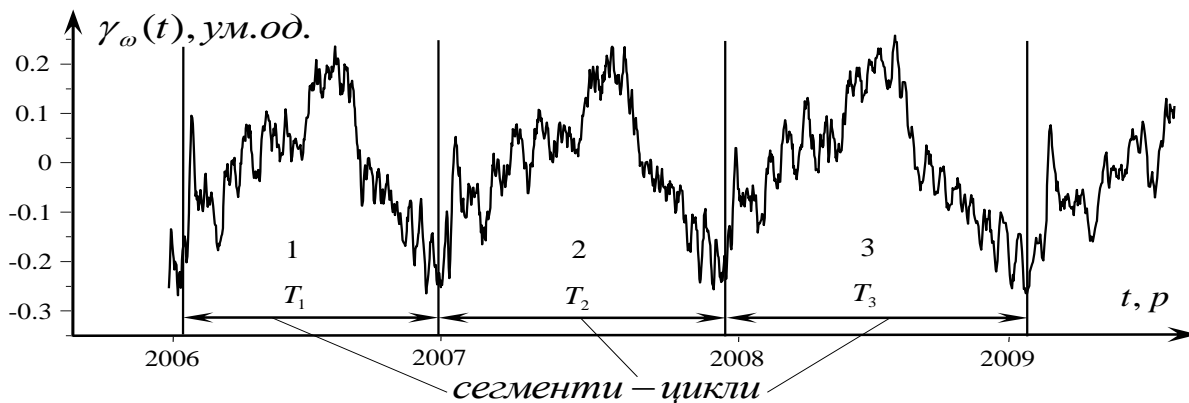


Рис. 2.5. Зображення циклічного сигналу з позначеною сегментною циклічною структурою, циклічний економічний процес – індекс активності автофінансування США, три цикли ($C = 3$)

Враховуючи сегментну зонну структуру тривалості сегментів-зон, з яких складається кожен сегмент-цикл, упорядковані за часом множиною $\{T_j, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}\}$, де Z - кількість сегментів-зон, з яких складається кожен сегмент-цикл; C - кількість сегментів-циклів досліджуваного сигналу. Нагадаємо, що на практиці під час опрацювання циклічних сигналів опрацьовуємо фрагмент сигналу з фіксованою, цілою кількістю сегментів-циклів та однаковою кількістю сегментів-зон на циклі.

Така структура слідування сегментів (див. рис. 2.4 та 2.3) характерна для багатьох сигналів технічної, біологічної природи, у яких виражений постійний чи

змінний ритм та які характеризуються повторюваністю розгортання у часі або просторі етапів (фаз), наприклад, як це можна спостерігати в електрокардіосигналі, у якого послідовне слідування в часі сегментів P, Q, R, S, T (так званих діагностичних зон), зумовлених послідовним скороченням певних відділів серцевого м'яза (див. рис. 2.6). Тому врахування сегментної структури при дослідженні різних циклічних сигналів є важливим та обґрунтованим, оскільки продиктовано задачами їх аналізу на практиці.

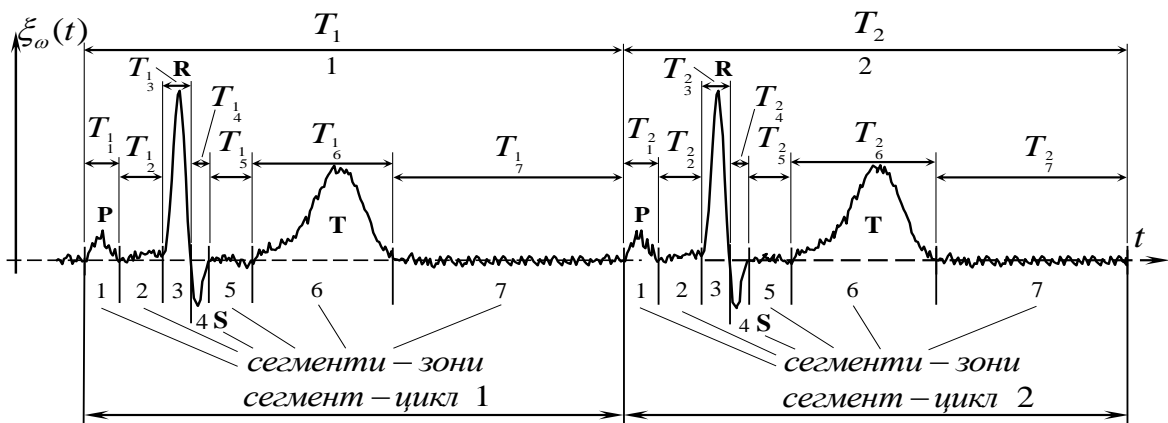


Рис. 2.6. Зображення циклічного сигналу з позначеною сегментною зонною структурою, типова реалізація електрокардіосигналу з позначеннями сегментів-циклів (два цикли) та сегментів-зон ($C = 2$, $Z = 7$), P, R, S, T –діагностичні сегменти-зони електрокардіосигналу – прийнято позначати у лікарській практиці

Сегментна циклічна структура чи сегментна зонна структура дозволяють враховувати особливості сегментів циклічних сигналів їх форми, амплітуди, тривалості, тобто характеристики морфологічного характеру сегментів циклічних сигналів. Розглянемо характеристику циклічного сигналу, яка враховує його ритмічний характер (ритм), цією характеристикою є його ритмічна структура.

2.3. Узагальнена ритмічна структура циклічних сигналів. Основні математичні співвідношення для ритмічних структур циклічних сигналів

Розглянемо узагальнену ритмічну структуру циклічних сигналів. Для

характеристики часових або просторових закономірностей і співвідношень, що мають місце між однофазними відліками циклічних сигналів у різних її циклах, використовується поняття функції ритму [205], характеристика, яка формалізує поняття темпу (ритму) циклічного сигналу, як це передбачено концептуальною моделлю циклічних сигналів. У даній роботі будемо вживати термін “ритмічна структура”, що є синонімом дискретної функції ритму циклічних сигналів, яка є їх важливою характеристикою. При цьому вона має зв’язок, через відліки, із відповідною їй сегментною структурою, тобто ритмічна циклічна структура має зв’язок з сегментною циклічною структурою, а ритмічна зонна структура має зв’язок з сегментною зонною структурою.

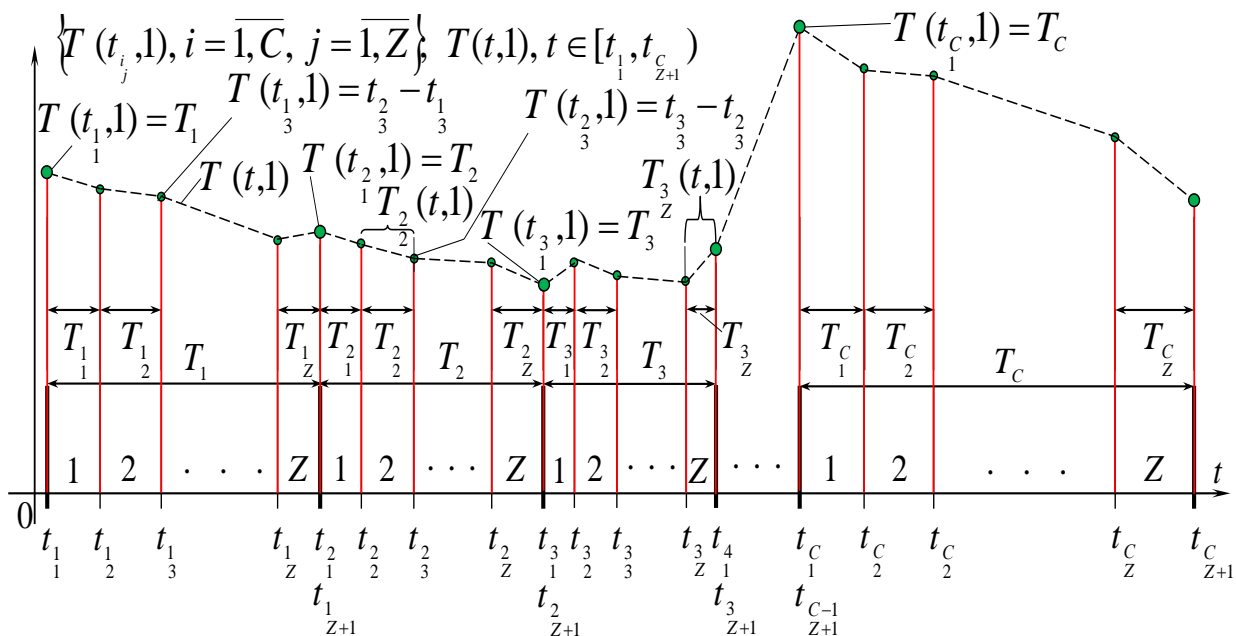


Рис. 2.7. Схематичне зображення ритмічної структури (дискретної функції ритму) та неперервної функції ритму реалізації циклічного сигналу (неперервна функція ритму – кусково-лінійна, позначена пунктиром)

Нагадаємо, що ритм циклічного сигналу характеризується постійністю (стабільністю) або змінністю. На відміну від факту періодичності, тобто постійності ритму циклічного сигналу в задачах його опрацювання, їх ритмічна структура в рамках даного дисертаційного дослідження може бути довільною і задаватися ритмічною структурою, яка може описувати як постійний

(стабільний), так і змінний ритм досліджуваного циклічного процесу чи явища.

На рисунку 2.7 схематично зображено дискретну ритмічну структуру $T(t_j, n)$ та неперервну функцію ритму $T(t, n)$ циклічного сигналу при $n = 1$.

Узагальнена сегментна структура відображає інформацію про межі часових або просторових відліків відповідних сегментів-циклів чи сегментів-зон. Така структура переходить у відображення відліків ритмічної структури (дискретної функції ритму).

При цьому сегментна циклічна структура $\hat{\mathbf{D}}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$ пов'язана з відповідною ритмічною циклічною структурою $\hat{T}(t_i, n), i = \overline{1, C}$, а сегментна зонна структура $\hat{\mathbf{D}}_z = \{t_j, j = \overline{1, Z}\}$ з відповідною ритмічною зонною структурою $\hat{T}(t_j, n), j = \overline{1, Z}$ через їх відліки. Ритмічна структура є формальним описом ритму циклічного сигналу.

У роботах [201, 205] наведено означення функції ритму – це функція, яка характеризує закон зміни часових або просторових інтервалів між однофазними значеннями в різних циклах циклічного сигналу. Вона має такі властивості [205, 206]:

$$\begin{aligned} \text{a) } & T(t, n) > 0, \text{ якщо } n > 0 \text{ (} T(t, 1) < \infty \text{);} \\ \text{b) } & T(t, n) = 0, \text{ якщо } n = 0; \\ \text{c) } & T(t, n) < 0, \text{ якщо } n < 0, t \in \mathbf{W}, \end{aligned} \quad (2.20)$$

де n - величина, яка означає кількість циклів, через які віддалені однофазні значення досліджуваного сигналу.

Для будь-яких $t_1 \in \mathbf{W}$ та $t_2 \in \mathbf{W}$, для яких $t_1 < t_2$, для функції $T(t, n)$ виконується строга нерівність

$$T(t_1, n) + t_1 < T(t_2, n) + t_2, \forall n \in \mathbf{Z}. \quad (2.21)$$

За умови неперервної функції ритму її похідна по часу повинна бути більше за -1, тобто

$$T'(t, n) > -1, t \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}. \quad (2.22)$$

Функція $T(t, n)$ є найменшою за модулем $|T(t, n)| \leq |T_\gamma(t, n)|$ серед усіх таких функцій $\{T_\gamma(t, n), \gamma \in \Gamma\}$, які задовольняють (2.20)–(2.22).

У частинному випадку для функції ритму $T(t, n)$ можна подати нерівність (2.22) через її похідну за аргументом t . Для цього подамо цю нерівність у такому вигляді:

$$\frac{T(t_2, n) - T(t_1, n)}{t_2 - t_1} > -1, \text{ якщо } t_1 < t_2. \quad (2.23)$$

Якщо область визначення $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, а циклічний сигнал є всюди визначеним на \mathbf{R} , то функція ритму $T(t, n)$ є неперервною за аргументом t функцією, а у випадку існування її похідної по t , із нерівності (2.23) випливає така строга нерівність [202]:

$$\lim_{t_2 - t_1 \rightarrow 0} \frac{T(t_2, n) - T(t_1, n)}{t_2 - t_1} = T'(t, n) > -1. \quad (2.24)$$

У роботах [205, 206] відзначено, що нерівності (2.24) є лише частинним випадком загальної умови (2.21), оскільки, наприклад, якщо маємо дискретну циклічну числову функцію, то її функція ритму також є дискретна і про її похідну взагалі говорити неможливо у такому сенсі. Для багатьох функцій ритму $T(t, n)$, які є неперервними за аргументом t , у ряді точок не існує похідної, що не дає змоги використовувати нерівність (2.24).

У більшості практичних задач аналізу циклічних сигналів апріорно нічого

не відомо про закономірності зміни неперервної функції ритму циклічних сигналів на відповідних сегментах. Тому на практиці необхідно проводити її оцінювання. Наприклад, найпростішим, відомим методом її оцінювання є кусково-лінійна інтерполяція дискретної функції ритму [196]. Дискретна функція ритму (дискретна ритмічна структура) є вкладеною в неперервну функцію ритму. Тому для її визначення необхідно мати інформацію про межі сегментів-циклів чи сегментів-зон, тобто відомості про відповідну сегментну структуру. Для отримання таких відомостей необхідно застосувати методи сегментації для досліджуваних циклічних сигналів. Проте, як це було показано в першому розділі, відомі методи сегментації циклічних сигналів можуть давати не завжди коректні, достовірні результати внаслідок некоректного визначення відліків меж сегментів-циклів чи сегментів-зон (див. додаток Д, підпункт Д.1.6). Такі, неточно визначені відліки меж сегментів суттєво впливають на оцінювання неперервної функції ритму і як наслідок на подальші кроки опрацювання, що призводить до хибного результату діагностики чи прогнозування.

Отримавши достовірну інформацію про відліки меж сегментів-циклів чи меж сегментів-зон, коректно ідентифікувавши сегментну циклічну структуру $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$ чи сегментну зонну структуру $\mathbf{D}_z = \{t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ можна сформулювати дискретну ритмічну структуру.

Дискретну ритмічну структуру для випадку сегментної циклічної структури (ритмічна циклічна структура) дискретного сигналу, коли $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, формуємо так:

$$T(t_i, n) = t_{i+n} - t_i, i = \overline{1, C}, n \in \mathbf{Z}. \quad (2.25)$$

Дискретну ритмічну структуру для випадку сегментної зонної структури, (ритмічна зонна структура) дискретного сигналу, коли $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, формуємо так:

$$T(t_{ij}, n) = t_{i+jn} - t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, n \in \mathbf{Z}. \quad (2.26)$$

Оскільки відліки дискретної ритмічної структури відповідають відлікам відповідної сегментної структури, то маючи інформацію про сегментну структуру можна провести оцінювання ритму циклічного сигналу. Ритм циклічного сигналу в якісному відношенні може бути постійним (стабільним, незмінним, регулярним) або змінним (нестабільним). Із точки зору поняття ритмічної структури, циклічний сигнал із постійним ритмом – це сигнал, моделлю якого є циклічна функція (періодична функція) із функцією ритму $T(t,n) = n \cdot T$, $T = const > 0$. Циклічний сигнал зі змінним ритмом – це сигнал, моделлю якого є циклічна функція з функцією ритму $T(t,1) \neq const$.

Під час аналізу ритму, у випадку, якщо тривалості всіх сегментів-циклів $\{T_i, i = \overline{1, C}\}$ або сегментів-зон $\{T_j, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}\}$ рівні, маємо стабільний ритм циклічного (періодичного) сигналу, тобто $F(t) = F(t + n \cdot T)$, де $T = const > 0$ - період; $n \cdot T$ - величина кратного періоду $n \in \mathbf{N}$.

У випадку якщо тривалості всіх сегментів-циклів $\{T_i, i = \overline{1, C}\}$ або сегментів-зон $\{T_j, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}\}$ не рівні (на циклах), маємо змінний ритм циклічного сигналу, тобто $F(t) \neq F(t + n \cdot T)$, а $F(t) = F(t + T(t,n))$.

Враховуючи вище описане відзначимо, що для ритмічної структури (неперервної функції ритму), яку можна подати $T(t,n) = n \cdot T$ – ритм є стабільним; у протилежному випадку, коли $T(t,n) \neq n \cdot T$ - ритм є змінним.

Також справедливо таке твердження: якщо проведено оцінювання ритму і встановлено, що він є стабільним, тобто була визначена величина періоду $T = const > 0$, то для такого циклічного сигналу (періодичного сигналу) можна визначити ритмічну структуру, яка буде дорівнювати

$$T(t,n) = n \cdot T, t \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}. \quad (2.27)$$

Врахування ритмічної структури та обґрунтоване її використання при аналізі циклічних сигналів дозволяє вивчати ритм та особливості сегментної

структури циклічних сигналів, наприклад, роботи серця людини при проведенні кардіодіагностики і може розглядатися як узагальнення відомого аналізу тривалостей R-R інтервалів (P-P інтервалів, Q-Q інтервалів, та інших) – аналізу серцевого ритму [1, 69, 73, 268, 329].

У першому розділі, даного дисертаційного дослідження використані математичні моделі циклічних функцій, описаних у роботах Лупенка С.А. [201, 205]. Тому покажемо, як враховуються основні властивості й характеристики математичних моделей циклічних функцій, а також сформулюємо в загальному випадку постановку завдання сегментації циклічних сигналів (ідентифікації їх сегментних структур).

У структурі циклічного сигналу має місце факт повторюваності, подібності його за певними властивостями, названими атрибутами [201, 205, 206]. У роботі [205] показано, що атрибутами, відносно яких розглядається циклічність досліджуваного сигналу, можуть бути: значення функції (наприклад, для детермінованих числових, векторних, матричних періодичних функцій), коли циклічність мислиться в сенсі рівності значень функціонального відношення (циклічної функції) для його бієктивно пов'язаних пар, які взяті з різних його циклів; певні характеристики циклічної функції, відносно яких вводиться еквівалентність значень циклічної функції, наприклад, стохастична еквівалентність у вузькому чи широкому сенсах для періодичних випадкових процесів, еквівалентність відносно математичного сподівання та змішаного центрального моменту другого порядку для періодично корельованих випадкових процесів, еквівалентність векторів у сенсі рівності їх норм для періодичного відносно норми вектора функцій, еквівалентність квадратних матриць у сенсі рівності їх норм для періодичної відносно норми функціональної матриці, функції належності в сенсі нечітких множин Заде і т.п. [205].

У роботах [201, 205, 206] математично формалізовано поняття атрибута й множини атрибутів, а саме, введено відображення $p: \Psi \rightarrow \mathbf{A}$ лінійного простору Ψ на деяку множину \mathbf{A} , що є множиною можливих значень атрибута. Елементами множини \mathbf{A} можуть бути числа, вектори, функції, а, отже,

відображення $p: \Psi \rightarrow \mathbf{A}$ може бути, в загальному випадку, числовою функцією, функціоналом, оператором.

Оскільки областю визначення відображення $p: \Psi \rightarrow \mathbf{A}$ є лінійний простір Ψ , який, у свою чергу, є областю значень функціонального відношення $f: \mathbf{W} \rightarrow \Psi$, то відображення $p: \Psi \rightarrow \mathbf{A}$ може розглядатися як складна функція $p: \mathbf{W} \rightarrow \Psi \rightarrow \mathbf{A}$ (в інших позначеннях $p(t) = p(f(t)) \in \mathbf{A}, t \in \mathbf{W}$ із проміжним аргументом $f(t)$).

Із метою виключення нециклічних процесів (сигналів) із розгляду створюваної методології сегментації, а саме таких, атрибути (характеристики) яких не змінюються в часі, будемо вимагати, щоб відображення $p(t) = p(f(t)) \in \mathbf{A}, t \in \mathbf{W}$ було відмінне від константи, тобто для відображення $p(t) = p(f(t)) \in \mathbf{A}, t \in \mathbf{W}$ $\exists t, t' \in \mathbf{W}$, що $p(f(t)) \neq p(f(t'))$.

У подальшому, в роботі, з метою спрощення будемо вживати термін “циклічна функція”, як математична модель циклічних сигналів, розуміючи, що циклічність мислиться відносно певного атрибута $p: \Psi \rightarrow \mathbf{A}$.

Для атрибутів циклічної функції справедлива рівність, наведена через неперервну функцію ритму так:

$$p(f(t)) = p((t + T(t, n))) \in \mathbf{A}, t \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}. \quad (2.28)$$

Поряд із поняттям атрибута циклічної функції важливим є поняття фази, яке математично формалізовано в роботах [201, 205, 206]. Фаза характеризує певний етап у розгортанні коливного, циклічного руху. Якщо маємо упорядковане за індексом α розбиття $\mathbf{D}_f^\varphi = \{f_{\varphi_\alpha}, \alpha \in \mathbf{I}\}$ циклічного функціонального відношення (деякої циклічної функції) f , елементи якого є функціональними відношеннями, що утворені згідно із (2.30) та для яких має місце рівність (2.32), називають множиною фаз [205], а самі множини f_{φ_α} називають фазами циклічного функціонального відношення (циклічної функції) f .

Оскільки будь-яка фаза $f_{\varphi_\alpha} = \{(t_i^\alpha, f(t_i^\alpha)), i \in \mathbf{Z}\}$ є упорядкованою за i множиною, то відповідний i -й елемент $(t_i^\alpha, f(t_i^\alpha))$ із цієї множини природно називають реалізацією фази f_{φ_α} в i -му циклі циклічного функціонального відношення f .

Оскільки для циклічної функції (циклічного функціонального відношення) f маємо зліченну множину областей \mathbf{W}_i , то відповідно для кожного $t_{i_1}^\alpha$ будемо мати зліченну множину $\mathbf{W}_{\varphi_\alpha}$ елементів t_i^α , які бієктивно пов'язані з ним. Множина $\mathbf{W}_{\varphi_\alpha}$ всіх бієктивно пов'язаних елементів із елементом $t_{i_1}^\alpha$ визначається так:

$$\mathbf{W}_{\varphi_\alpha} = \{t_i^\alpha : t_{i_1}^\alpha \leftrightarrow t_i^\alpha, i_1 = \text{const}, i \in \mathbf{Z}\}. \quad (2.29)$$

Для кожного фіксованого $t_{i_1}^\alpha \in \mathbf{W}_{i_1}$ будемо мати свою множину $\mathbf{W}_{\varphi_\alpha}$. Якщо ж $t_{i_1}^\alpha$ пробіжить усю упорядковану множину \mathbf{W}_{i_1} , то отримаємо впорядковане по індексу α розбиття $\mathbf{D}_{\mathbf{W}}^\varphi = \{\mathbf{W}_{\varphi_\alpha}, \alpha \in \mathbf{I} \subset \mathbf{R}\}$ (\mathbf{I} -індексна числова множина) області визначення \mathbf{W} циклічної функції f . Індексна числова множина \mathbf{I} може бути прийнята рівною будь-якій із множин \mathbf{W}_i . Приймемо, що $\mathbf{I} = \mathbf{W}_1$. У випадку, коли $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, розбиття $\mathbf{D}_{\mathbf{W}}^\varphi$ є незліченим, тобто індексна множина \mathbf{I} є незліченною і дорівнює півінтервалу: $\mathbf{I} = \mathbf{W}_1 = [\tilde{t}_1, \tilde{t}_2)$, де \tilde{t}_1, \tilde{t}_2 - межі першого циклу, а у випадку, коли $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, розбиття $\mathbf{D}_{\mathbf{W}}^\varphi$ містить рівно L множин, а індексна множина є скінченною і дорівнює $\mathbf{I} = \mathbf{W}_1 = \{t_{1,l}, l = \overline{1, L}\}$.

Утворене впорядковане за індексом α розбиття $\mathbf{D}_f^\varphi = \{f_{\varphi_\alpha}, \alpha \in \mathbf{I}\}$ циклічної функції f , шляхом бієктивного відображення елементів $\mathbf{W}_{\varphi_\alpha}$ розбиття $\mathbf{D}_{\mathbf{W}}^\varphi = \{\mathbf{W}_{\varphi_\alpha}, \alpha \in \mathbf{I}\}$ на підмножини (функціональні відношення) f_{φ_α} циклічного функціонального відношення f , тобто кожному $\mathbf{W}_{\varphi_\alpha}, \alpha \in \mathbf{I}$ ставиться у

відповідність підмножина $f_{\varphi_\alpha} = \{(t, f(t)), t \in \mathbf{W}_{\varphi_\alpha}\} \subset f$ тих пар $(t, f(t))$ відношення f , аргумент t яких належить $\mathbf{W}_{\varphi_\alpha}$ ($t \leftrightarrow (t, f(t)), t \in \mathbf{W}_{\varphi_\alpha}$). Оскільки $\mathbf{W}_{\varphi_\alpha}$ - це зліченна множина (2.29), то і f_{φ_α} - також зліченна множина, яка визначається так:

$$f_{\varphi_\alpha} = \{(t_i^\alpha, f(t_i^\alpha)): t_i^\alpha \leftrightarrow t_i^\alpha, i_1 = \text{const}, i \in \mathbf{Z}\}. \quad (2.30)$$

Оскільки f_{φ_α} - це сукупність бієктивно пов'язаних пар циклічного функціонального відношення, то згідно з ізоморфізмом відносно порядку та атрибута [206] слідує рівність атрибутів

$$p(f(t)) = p(f(t')) \in \mathbf{A}, t \in \mathbf{W}_{i_1}, t' \in \mathbf{W}_{i_2}, t \leftrightarrow t', i_1, i_2 \in \mathbf{Z}. \quad (2.31)$$

У частинному випадку коли $p(f(t)) = f(t)$, з ізоморфізму відносно порядку та атрибута $p: \Psi \rightarrow \mathbf{A}$ функціональних відношень $\{f_i, i \in \mathbf{Z}\}$, випливає їх ізоморфізм відносно порядку та значень. У цьому разі рівність (2.31) набуде вигляду

$$f(t) = f(t') \in \mathbf{A}, t \in \mathbf{W}_{i_1}, t' \in \mathbf{W}_{i_2}, t \leftrightarrow t', i_1, i_2 \in \mathbf{Z}. \quad (2.32)$$

Тому згідно з рівністю (2.31) для підмножини f_{φ_α} має місце рівність атрибутів, а саме:

$$p(f(t_i^\alpha)) = p(f(t_{i_2}^\alpha)) \in \mathbf{A}, t_{i_1}^\alpha \in \mathbf{W}_{i_1}, t_{i_2}^\alpha \in \mathbf{W}_{i_2}, t_{i_1}^\alpha \leftrightarrow t_{i_2}^\alpha, i_1, i_2 \in \mathbf{Z}. \quad (2.33)$$

У роботі [205] наведено означення множини однофазних значень - це проекція $\mathbf{A}_{\varphi_\alpha} = \mathbf{Pr}_\Psi \{f_{\varphi_\alpha}\} = \{f(t_i^\alpha): t_i^\alpha \leftrightarrow t_i^\alpha, i_1 = \text{const}, i \in \mathbf{Z}\}$ функціонального відношення f_{φ_α} на множину Ψ циклічного функціонального відношення f .

А проєкцію $\mathbf{W}_{\varphi_\alpha} = \mathbf{Pr}_w \{f_{\varphi_\alpha}\}$ функціонального відношення f_{φ_α} на множину \mathbf{W} називають областю визначення фази f_{φ_α} .

Множина проєкцій $\{\mathbf{A}_{\varphi_\alpha}, \alpha \in \mathbf{I}\}$ є впорядкованою за параметром α системою підмножин із Ψ . Кожна множина $\mathbf{A}_{\varphi_\alpha}$ визначається так:

$$\mathbf{A}_{\varphi_\alpha} = \{f(t_i^\alpha): t_{i_1}^\alpha \leftrightarrow t_i^\alpha, i_1 = \text{const}, i \in \mathbf{Z}\}. \quad (2.34)$$

У загальному випадку множини $\mathbf{A}_{\varphi_\alpha}$ є багатоелементними. У частинному випадку, коли значення однофазних пар функціонального відношення f є рівними, то множини $\mathbf{A}_{\varphi_\alpha}$ будуть одноелементними (наприклад, для детермінованої періодичної функції).

Використовуючи функцію ритму $T(t, n)$ циклічної функції, аналогічно виразам (2.30) та (2.34) можна записати вирази для фази f_{φ_α} та її проєкції $\mathbf{A}_{\varphi_\alpha}$ з урахуванням функції ритму, а саме:

$$f_{\varphi_\alpha} = \{(t_1^\alpha + T(t_1^\alpha, n), f(t_1^\alpha + T(t_1^\alpha, n))), t_1^\alpha = \text{const} \in \mathbf{W}_i, n \in \mathbf{Z}\}, \quad (2.35)$$

$$\mathbf{A}_{\varphi_\alpha} = \{f(t_1^\alpha + T(t_1^\alpha, n)), t_1^\alpha = \text{const} \in \mathbf{W}_i, n \in \mathbf{Z}\}. \quad (2.36)$$

При визначенні відліків сегментної структури, наприклад, меж сегмента-циклу чи деякого сегмента-зони визначають відліки, фази (множину однофазних значень), тобто для однотипного сегмента-зони в межах сегментів-циклів фази відповідають початку та закінченню відповідного сегмента.

На рисунку 2.8 схематично зображено циклічний сигнал з позначеннями рівних значень за атрибутом певних відліків циклічного сигналу, зображено ізоморфізм відносно порядку відліків та значень циклів. Крім цього, наведено позначення сегментної зонної структури, оскільки дана структура є вкладеною в

сегментну циклічну структуру, то для даного прикладу відліки зонної структури, а саме $t_{1,1} = t_{1,1}$, $t_{2,1} = t_{2,1}$, $t_{3,1} = t_{3,1}$, будуть відповідати відлікам сегментної циклічної структури (на рис. 2.8 не показана).

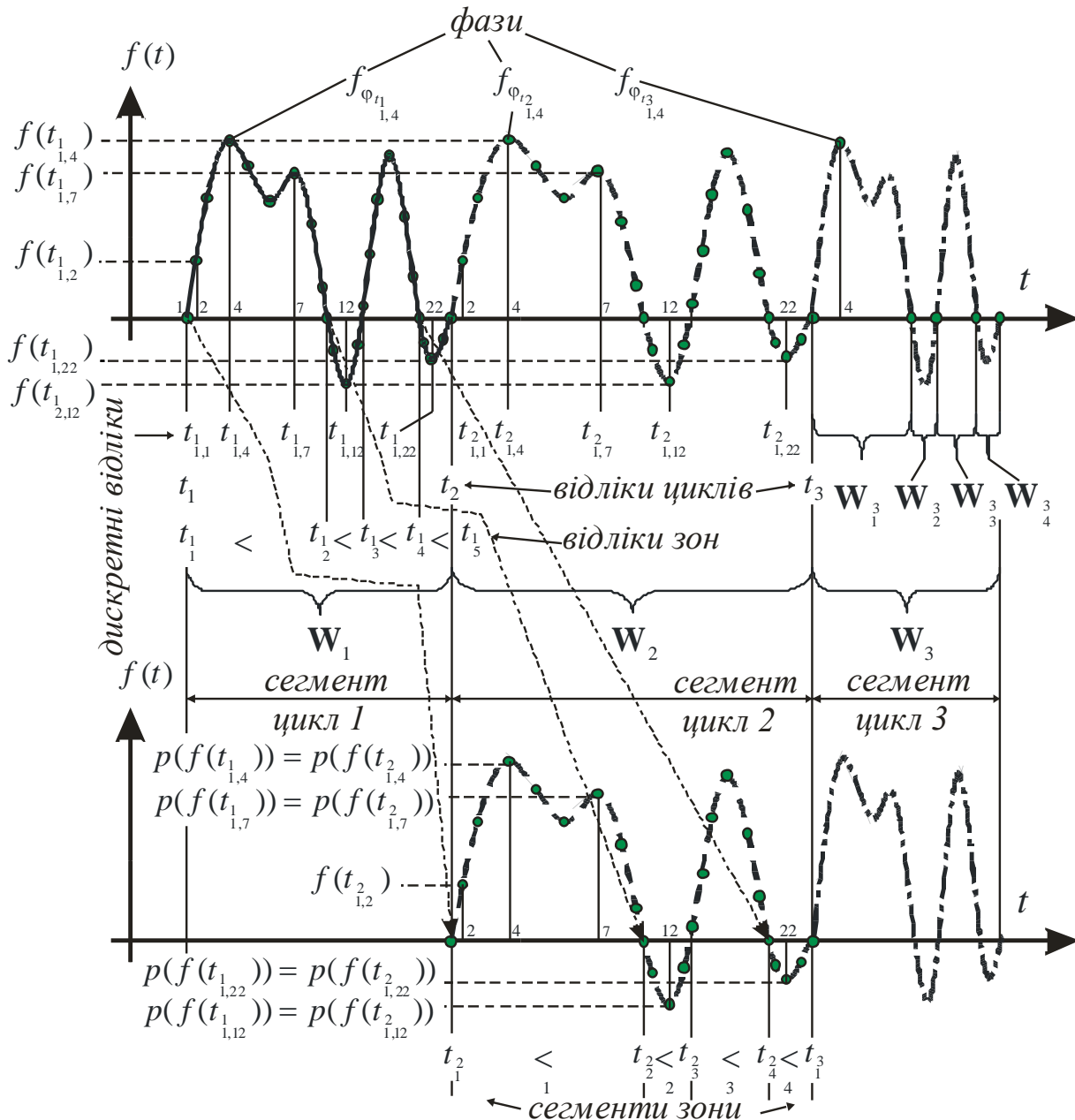


Рис. 2.8. Схематичне зображення циклічного сигналу з позначеннями ізоморфізму відносно порядку відліків та значень циклів, позначено вибіркові моменти часу, приклади однофазних значень (фаз циклічного сигналу), приклади атрибутів (рівні значення сигналу), області визначення сегментів-циклів та сегментів-зон ($C = 3, Z = 4$).

Відліки циклів відповідають $t_1 = t_{1,1}$, $t_2 = t_{2,1}$, $t_3 = t_{3,1}$. Така відповідність

стосується і фаз, тобто $f_{\varphi_{1,1}} = f_{\varphi_{1,1}}$, $f_{\varphi_{2,1}} = f_{\varphi_{2,1}}$, $f_{\varphi_{3,1}} = f_{\varphi_{3,1}}$ для сегментної зонної та сегментної циклічної структур відповідно.

Нагадаємо формалізоване поняття циклу та формалізуємо поняття зони, які в сукупності дозволяють формалізувати поняття сегментної циклічної та сегментної зонної структур.

Поняття циклу формалізоване в роботах [201, 205, 206]. Це – найдрібніше впорядковане розбиття $\mathbf{D}_f^c = \{f_i, i \in \mathbf{Z}\}$ циклічного функціонального відношення (деякої циклічної функції) $f: \mathbf{W} \rightarrow \Psi$, елементи якого є ізоморфними відносно порядку та атрибуту $p: \Psi \rightarrow \mathbf{A}$, називаємо розбиттям на цикли, а будь-який його елемент f_i - i -м циклом циклічного функціонального відношення f .

Тобто i -й цикл – це функціональне відношення f_i , яке є звуженням циклічного функціонального відношення f на область \mathbf{W}_i .

При цьому проекція $\Psi_i = \text{Пр}_{\Psi} \{f_i\}$ функціонального відношення f_i на множину Ψ називається областю значень циклу f_i . А проекцію $\mathbf{W}_i = \text{Пр}_{\mathbf{W}} \{f_i\}$ функціонального відношення f_i на множину \mathbf{W} називають областю визначення циклу f_i .

На відміну від поняття циклу поняття зони більш деталізує структуру циклу циклічного сигналу, тому формалізуємо поняття зони.

Зона – це впорядковане розбиття циклу $\mathbf{D}_f^z = \{f_j, j \in \mathbf{Z}\}$ циклічного функціонального відношення (деякої циклічної функції) $f_j: \mathbf{W}_j \rightarrow \Psi_j$, елементи якого є ізоморфними відносно порядку й атрибуту $p: \Psi_j \rightarrow \mathbf{A}$, називаємо розбиттям на зони, а будь-який його елемент f_j - j -ю зонною i -го циклу циклічного функціонального відношення f_i .

Тобто j -а зона i -го циклу – це також функціональне відношення f_j , яке є звуженням циклічного функціонального відношення f_i на область \mathbf{W}_j .

При цьому проекція $\Psi_{i_j} = \text{Пр}_{\Psi_i} \{f_j\}$ функціонального відношення f_j на

множину Ψ називається областю значень зони f_{i_j} . А проєкцію $\mathbf{W}_{i_j} = \text{Пр}_{w_i} \{f_{i_j}\}$ функціонального відношення f_{i_j} на множину \mathbf{W}_{i_j} називаємо областю визначення зони f_{i_j} в i -му циклі.

Формалізація сегментної структури. Під «сегментною структурою» розуміємо сукупність, множину впорядкованих моментів, часових або просторових відліків, які відповідають початку та закінченню сегментів-циклів або сегментів-зон і які є ізоморфними відносно порядку, а значення, які їм відповідають, рівні за атрибутом (атрибутами). Визначення сегментної структури є аналогічним знаходженню області розбиття циклічного сигналу, яка включає всі фази циклічного сигналу (функції) в усіх сегментах-зонах та сегментах-циклах.

Відліки «сегментної структури» відповідають відлікам «ритмічної структури», яка в загальному випадку є її дискретною функцією ритму. Крім цього відліки в такій структурі, якщо їх описувати через поняття фази, є однофазними для відповідних меж сегментів-циклів чи сегментів-зон. При такому підході можна говорити про «фазову структуру» циклічного сигналу, яка однакова на всіх сегментах-циклах проте в межах сусідніх сегментів-зон вона відрізняється.

Таким чином, шляхом урахування основних понять концептуальної моделі циклічних сигналів проведено їх формалізацію. Формалізовані поняття циклу [201, 205], зони, сегментної структури (сегментної циклічної та сегментної зонної структур) циклічних функцій, які відіграють роль аксіоматичної бази методології сегментації циклічних сигналів у системах цифрової обробки даних.

Нагадаємо, що областю значень циклічної функції [201, 205, 206] є деякий лінійний простір Ψ над полем дійсних або комплексних чисел, елементами якого можуть бути, в загальному, числа, нечіткі числа, вектори, матриці, тензори, інтервали, функції, оператори, випадкові величини, випадкові вектори, випадкові матриці, випадкові функції і т.п. (згідно теорії циклічних функціональних відношень) Оскільки циклічний сигнал будемо розглядати як такий, що отримується в результаті вимірювання його значень, то для випадку

детермінованого підходу $\Psi = \mathbf{R}$ (математична модель - циклічна числова функція) і для випадкового підходу $\Psi = \mathbf{L}_2(\Omega, \mathbf{P})$, (математична модель - циклічний випадковий процес).

Область визначення як часова або просторова область реєстрації циклічного сигналу є множина $\mathbf{W} = \mathbf{R}$ дійсних чисел або впорядкована дискретна множина $\mathbf{W} = \mathbf{D}$.

У випадку дискретності області визначення $\mathbf{W} = \mathbf{D}$ для її елементів має місце такий тип лінійного упорядкування: $t_{i_1, l_1} < t_{i_2, l_2}$, якщо $i_2 > i_1$, або якщо $i_2 = i_1$, а $l_2 > l_1$, в інших випадках $t_{i_1, l_1} > t_{i_2, l_2}$ ($i_1, i_2 \in \mathbf{Z}$, $l_1, l_2 \in \overline{1, L}$, $0 < t_{i, l+1} - t_{i, l} < \infty$).

- для врахування сегментної циклічної структури

$$\mathbf{W} : \mathbf{R}, \mathbf{D} = \{t_{i, l} \in \mathbf{R}, i = \overline{1, C}, l = \overline{1, L}, L \geq 2\};$$

- для врахування сегментної зонної структури

$$\mathbf{W} : \mathbf{R}, \mathbf{D} = \left\{ t_{j, l} \in \mathbf{R}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, l = \overline{1, L_j} \right\}.$$

Для описування циклічних сигналів, які мають сегментну циклічну структуру, необхідно знати розбиття $\mathbf{W}_w^c = \{W_i \subset \mathbf{W}, i = \overline{1, C}\}$ області визначення \mathbf{W} на ізоморфні відносно порядку множини (коли $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, то $W_i = [t_i, t_{i+1})$, $i = \overline{1, C}$ ($0 < t_{i+1} - t_i < \infty$, $i = \overline{1, C}$), а коли $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, то $W_i = \{t_{i, l}\}$, $i = \overline{1, C}, l = \overline{1, L}$, $L = const \in \mathbf{N}$ ($0 < t_{i+1, l} - t_{i, l} < \infty$, $i = \overline{1, C}$).

Для описування циклічних сигналів, які мають сегментну зонну структуру, необхідно знати розбиття $\mathbf{W}_w^z = \{W_j \subset W_i \subset \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ області визначення \mathbf{W} на ізоморфні відносно порядку множини (коли $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, то $W_j = [t_j, t_{j+1})$, $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$ ($0 < t_{j+1} - t_j < \infty$, $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$), а коли $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, то $W_j = \left\{ t_{j, l} \right\}$, $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, l = \overline{1, L_j}$, $L = const \in \mathbf{N}$, $L = \sum_{j=1}^Z L_j$, ($0 < t_{j+1, l} - t_{j, l} < \infty$), $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$.

Як видно із означення області визначення циклічної функції [201, 206],

множина \mathbf{W} є лінійно упорядкованою множиною (чи дискретною підмножиною) дійсних чисел. Під дискретною множиною розуміємо таку множину, яку утворюють тільки ізольовані точки [153].

Враховавши основні формалізовані поняття, характеристики та властивості циклічних функцій систематизуємо та наведемо їх у вигляді таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Основні характеристики та властивості циклічних функцій

Характеристики та властивості циклічних функцій, (математичних моделей циклічних сигналів)	Сегментна циклічна структура $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$	Сегментна зонна структура $\mathbf{D}_z = \{t_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$
1	2	3
Область значень: -дитермінований підхід; -випадковий підхід	$\Psi = \mathbf{R};$ $\Psi = L_2(\Omega, \mathbf{P})$	$\Psi = \mathbf{R};$ $\Psi = L_2(\Omega, \mathbf{P})$
Область визначення: -неперервна $\mathbf{W} = \mathbf{R};$ -дискретна $\mathbf{W} = \mathbf{D}$	$\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1});$ $\mathbf{W}_i = \{t_{i,l}, l = \overline{1, L}\}$	$\mathbf{W}_j = [t_{j_l}, t_{j_{l+1}});$ $\mathbf{W}_j = \{t_{j,l}, l = \overline{1, L_j}\}, L = \sum_{j=1}^Z L_j$
Розбиття області визначення	$\mathbf{D}_w^c = \{\mathbf{W}_i \subset \mathbf{W}, i = \overline{1, C}\}$	$\mathbf{D}_w^z = \{\mathbf{W}_j \subset \mathbf{W}_i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$
Функція ритму (ритмічна структура, дискретний випадок): -стабільний ритм $T(t, n) = n \cdot T;$ -змінний ритм $T(t, n) \neq n \cdot T$	$T(t_i, n) = n \cdot T;$ $T(t_i, n) = t_{i+n} - t_i$	$T(t_{i_j}, n) = n \cdot T;$ $T(t_{i_j}, n) = t_{j_{i+n}} - t_{i_j}$

Продовж. табл. 2.1

1	2	3
Атрибут (атрибути) $p: \mathbf{W} \rightarrow \Psi \rightarrow \mathbf{A}$	неперервний випадок $p(f(t)) = p(f(t + T(t, n)));$ дискретний випадок $p(f(t_i)) = p(f(t_i + T(t_i, n)))$	неперервний випадок $p(f(t)) = p(f(t + T(t, n)));$ дискретний випадок $p(f(t_j)) = p(f(t_j + T(t_j, n)))$
Фаза, множина фаз	$f_{\varphi_\alpha} = \{(t_i^\alpha, f(t_i^\alpha)): t_{i_1}^\alpha \leftrightarrow t_{i_2}^\alpha\}$ з урахуванням атрибута $p(f(t_{i_1}^\alpha)) = p(f(t_{i_2}^\alpha));$ з урахуванням функції ритму $f_{\varphi_\alpha} = \left\{ \left(\begin{array}{l} t_i^\alpha + T(t_i^\alpha, n) \\ f(t_i^\alpha + T(t_i^\alpha, n)) \end{array} \right) \right\}$	$f_{\varphi_\alpha} = \left\{ \left(\begin{array}{l} t_{i_j}^\alpha, f(t_{i_j}^\alpha) \\ t_{i_{j_1}}^\alpha \leftrightarrow t_{i_{j_2}}^\alpha \end{array} \right) \right\}$ з урахуванням атрибута $p(f(t_{i_{j_1}}^\alpha)) = p(f(t_{i_{j_2}}^\alpha));$ з урахуванням функції ритму $f_{\varphi_\alpha} = \left\{ \left(\begin{array}{l} t_{i_j}^\alpha + T(t_{i_j}^\alpha, n) \\ f(t_{i_j}^\alpha + T(t_{i_j}^\alpha, n)) \end{array} \right) \right\}$

Описавши основні математичні співвідношення для сегментних структур і розглянувши важливі характеристики, властивості циклічних функцій (циклічних сигналів), зазначимо, що поняття абстрактної циклічної функції з сегментною структурою та циклічні функції в рамках детермінованого й стохастичного підходів наведено у додатку Ж. Розглянемо циклічні функції, які є математичними моделями циклічних сигналів та для яких розроблені методи сегментації (ідентифікації сегментних структур).

2.4. Таксономія класів моделей циклічних функцій із сегментною структурою

Враховуючи, що метою даної дисертаційної роботи є створення та побудова узагальненої методології сегментації циклічних сигналів, математичними

моделями яких є циклічні функції – стохастичні та детерміновані, розглянемо узагальнене дерево класифікації математичних моделей, для яких буде розроблено методологію сегментації циклічних сигналів.

Класифікація математичних моделей циклічних функцій із сегментною структурою наведена на рисунку 2.9 у вигляді таксономічного дерева. На даному рисунку наведено ті математичні моделі циклічних функцій, для яких у рамках єдиного теоретико-методологічного підходу розроблені методи сегментації. Відзначимо, що класифікація циклічних функцій досить широка [201, 205].



Рис. 2.9. Таксономічне дерево математичних моделей циклічних функцій із сегментною структурою

До неї входять циклічні функції, значеннями яких можуть бути числа, нечіткі числа, вектори, матриці, тензори, інтервали, функції, оператори, випадкові величини, випадкові вектори, випадкові матриці, випадкові функції і т.п. У рамках одного дисертаційного дослідження неможливо охопити всі можливі класи циклічних функцій, тому зосередимо увагу на розгляді циклічних функцій,

наведених на рисунку 2.9, які розглянуті в рамках даного дисертаційного дослідження. У додатку 3 наведені основні відомості про випадкові процеси з циклічними імовірнісними характеристиками, які не були розглянуті у додатку Ж, пункті Ж.3, але увійшли в дане дисертаційне дослідження і враховані у дереві класифікації випадкових циклічних функцій.

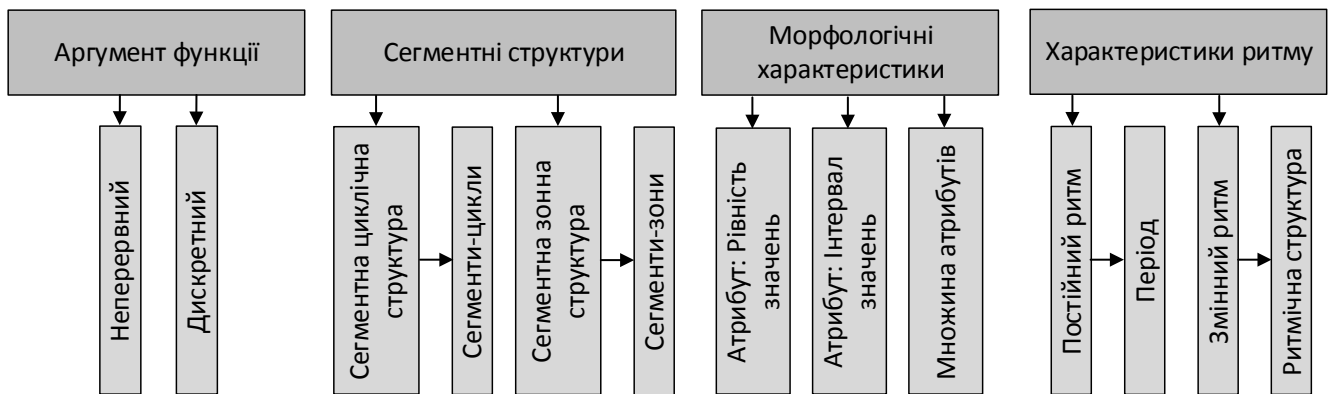


Рис. 2.10. Характеристики циклічних функцій із сегментною структурою

З метою класифікації математичних моделей за певними ознаками, властивостями, характеристиками будемо виділяти чотири основні їх характеристики. Ці характеристики визначають та конкретизують клас, підклас циклічних функцій, які розглядаються в рамках даного дисертаційного дослідження. Дані характеристики наведено на рисунку 2.10. Характеристика аргументу функції визначає належність до класу неперервних чи дискретних функцій. Характеристики морфологічного характеру визначають підклас, наприклад, циклічної числової функції, для якої атрибутом є еквівалентність, рівність значень (або для випадку випадкових процесів це множина атрибутів, для яких атрибутами є, наприклад, стохастична еквівалентність у вузькому чи широкому сенсах для періодичних випадкових процесів, еквівалентність відносно математичного сподівання та змішаного центрального моменту другого порядку для періодично корельованих випадкових процесів, матриць у сенсі рівності їх норм для періодичної відносно норми функціональної матриці, функції належності в сенсі нечітких множин Заде і т.п. [201]. Характеристики ритму визначають ритмічну структуру циклічної функції й описують ритм постійний

(стабільний) чи змінний. Відповідно для постійного ритму оцінюють значення періоду, а для змінного – ритмічну структуру. Характеристики сегментної структури відповідно визначають тип циклічної функції, яка може бути описана математичною моделлю, що містить сегментну циклічну структуру або сегментну зонну структуру відповідно. В циклічній структурі сигналу спостерігаються або сегменти-цикли, або сегменти-зони.

Врахування та уточнення цих характеристик дозволяє конкретизувати тип математичної моделі та дозволяє будувати методи сегментації з урахуванням конкретних властивостей циклічних сигналів. Застосування методів сегментації до циклічних сигналів, математичними моделями яких є циклічні функції, дозволить оцінити сегментну структуру (провести її ідентифікацію) та оцінити ритмічну структуру, що в цілому дозволить врахувати як морфологічні характеристики, так і характеристики ритму досліджуваних циклічних сигналів і здійснити подальші кроки опрацювання в системах цифрової обробки даних.

Враховуючи описане вище, перейдемо до формулювання постановки завдання сегментації (ідентифікації сегментної структури) циклічних сигналів.

2.5. Постановка завдання сегментації циклічних сигналів із сегментною структурою

Враховуючи описані циклічні функції та їх властивості в роботі [418], сформульовано постановку проблеми сегментації для циклічних функцій, які є моделями циклічних сигналів. В загальному, необхідно розглядати два випадки формулювання такої постановки проблеми: по-перше, сегментація циклічного сигналу з урахуванням відповідної сегментної структури (сегментної циклічної чи сегментної зонної структури); по-друге сегментація циклічного сигналу неперервного чи дискретного аргументу (при цьому можна розглядати, що дискретний циклічний сигнал є вкладеним у неперервний). Проте на практиці під час аналізу циклічних сигналів у діагностичних чи прогностичних системах цифрової обробки даних завжди маємо справу з дискретними циклічними

сигналами і формулювання постановки проблеми сегментації циклічного сигналу неперервного аргументу є більш теоретичним, ніж практичним. Виходячи з цього, сформулюємо постановку проблеми сегментації циклічних сигналів для випадку дискретного аргументу, оскільки цього вимагають завдання, які ставляться на практиці при побудові автоматизованих систем цифрового опрацювання (діагностики чи прогнозування) циклічних сигналів.

Спочатку подамо завдання сегментації для циклічного сигналу з сегментною циклічною структурою. Якщо існує деякий циклічний сигнал дискретного аргументу $F(t_k) \in \Psi, t_k \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$, то для нього:

Постановка завдання сегментації циклічного сигналу з сегментною циклічною структурою. Полягає в необхідності знаходження невідомої множини часових або просторових відліків i -х сегментів-циклів $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$, що аналогічно знаходженню розбиття $\mathbf{W}_w^c = \{\mathbf{W}_i, i = \overline{1, C}\}$ області визначення циклічного сигналу.

При цьому необхідно, щоб для визначеної множини моментів часу або простору $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$ виконувались умови бієкції встановлених відліків циклів, строге їх упорядкування, тобто ізоморфізм відносно порядку відліків (2.37), які відповідають сегментам-циклам, а також рівність атрибутів відліків сегментів-циклів (2.38), тобто:

$$t_i \leftrightarrow t_{i+1}, \dots; t_{i+1} > t_i, t_i \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, \quad (2.37)$$

$$p(f(t_i)) = p(f(t_{i+1})) \in \mathbf{A}, t \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, \quad (2.38)$$

де \mathbf{A} – множина можливих значень атрибутів. Наприклад, атрибутом є рівність значень усіх однофазних відліків циклічної числової функції.

Аналогічним чином сформульовано постановку завдання сегментації циклічного сигналу з сегментною циклічною структурою через урахування його фаз. Вона полягає у необхідності знаходження невідомої множини часових або

просторових відліків i -х сегментів-циклів $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$, що аналогічно у знаходженні множини однофазних значень $\mathbf{A}_{\varphi_\alpha}$, які відповідають межам цих сегментів-циклів, тобто

$$\mathbf{A}_{\varphi_\alpha} = \{f(t_i^\alpha): t_{i_1}^\alpha \leftrightarrow t_i^\alpha, i_1 = \text{const}, i \in \mathbf{Z}\}. \quad (2.39)$$

Постановка завдання сегментації циклічного сигналу з сегментною зонною структурою. Полягає в необхідності знаходження невідомої множини часових або просторових відліків j -х сегментів-зон у відповідних i -х сегментах-циклах

$\mathbf{D}_z = \{t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, що аналогічно у знаходженні розбиття

$\mathbf{W}_w^z = \{\mathbf{W}_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ області визначення циклічного сигналу.

При цьому необхідно, щоб для визначеної множини моментів часу або простору $\mathbf{D}_z = \{t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, виконувались умови бієкції встановлених відліків зон, строге їх упорядкування, тобто ізоморфізм відносно порядку відліків (2.40), які відповідають сегментам-зонам, а також рівність атрибутів відліків сегментів-зон (2.41), тобто:

$$t_{ij} \leftrightarrow t_{i+1, j}, \dots; t_{i, j+1} > t_{ij}, t_{ij} \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, \quad (2.40)$$

$$p(f(t_{ij})) = p(f(t_{i+1, j})) \in \mathbf{A}, t \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, \quad (2.41)$$

Аналогічним чином сформульовано постановку завдання сегментації циклічного сигналу з сегментною зонною структурою через урахування його фаз.

Вона полягає у необхідності знаходження невідомої множини часових або просторових відліків j -х сегментів-зон у відповідних i -х сегментах-циклах

$\mathbf{D}_z = \left\{ t_{ij}^{\alpha}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$, що аналогічно у знаходженні множини однофазних значень $\mathbf{A}_{\varphi\alpha}$, які відповідають межах цих сегментів-зон, тобто

$$\mathbf{A}_{\varphi\alpha} = \left\{ f \left(t_{ij}^{\alpha} \right) : t_{i_{j_1}}^{\alpha} \leftrightarrow t_{ij}^{\alpha}, j_1 = \text{const}, i, j \in \mathbf{Z} \right\}. \quad (2.42)$$

Оскільки сегментна зонна структура є вкладеною у сегментну циклічну структуру, то важливо визначати і враховувати відповідні відліки початків сегментних структур (2.19). Для циклічного сигналу, маючи відлік початку першого сегмента циклу чи першої зони в першому циклі і маючи при цьому інформацію про те, що ритм є постійним. Тобто, визначивши значення періоду, можна визначити всю його сегментну циклічну чи сегментну зонну структуру. Аналогічним чином, маючи інформацію про змінний ритм циклічного сигналу, тобто знаючи його ритмічну структуру можна визначити всю його сегментну циклічну чи сегментну зонну структуру циклічного сигналу.

Формалізувавши основні поняття концептуальної моделі та сформувавши постановку завдання сегментації для циклічних сигналів із сегментною циклічною та сегментною зонною структурами, перейдемо до розгляду розробленої методології сегментації (ідентифікації їх сегментних структур) циклічних сигналів.

2.6. Висновки до другого розділу

1. Формалізовано поняття: «сегмент», «зона», «сегментна структура», «сегментна циклічна структура», «сегментна зонна структура», які формують концептуальну модель циклічних сигналів та доповнюють відомі формалізовані поняття, такі, як «цикл», «ритм», «атрибут» та «фаза».

2. Обґрунтовано узагальнену (абстрактну) сегментну структуру циклічних сигналів, виходячи із врахування формалізованих понять концептуальної моделі

циклічних сигналів, яка у випадку відображення меж їх сегментів-циклів відповідає сегментній циклічній структурі, а у випадку відображення меж їх сегментів-зон відповідає сегментній зонній структурі. Сегментна циклічна структура характерна для процесів рельєфних утворень на поверхні металів, зумовлених механічним або лазерним ударно-хвильовим впливом на неї. Крім цього така структура притаманна циклічним економічним процесам, а сегментна зонна структура характерна для різних циклічних кардіосигналів, зокрема, електрокардіосигналу, магнітокардіосигналу, рекардіосигналу та іншим.

3. Врахування обґрунтованих сегментних структур циклічних сигналів, що відображають межі сегментів-циклів чи сегментів-зон, дозволило детально вивчати особливості морфологічних характеристик (форми) різних сегментів циклічних сигналів, які відображають циклічну роботу досліджуваної системи та її підсистем у різних галузях, зокрема, медицині, механіці, економіці тощо.

4. Врахований зв'язок сегментних структур з ритмічними структурами циклічних сигналів через їх відліки, дозволив проводити аналіз їх постійного (стабільного) чи змінного ритму та здійснювати його оцінювання. Мінливість (постійність чи змінність) ритму є важливою та необхідною його характеристикою у задачах опрацювання циклічних сигналів, зокрема, при проведенні статистичної обробки та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів.

5. Врахування формалізованих понять концептуальної моделі та описаної абстрактної циклічної функції із сегментною структурою для детермінованого та стохастичного випадків (залежно від виду обраної математичної моделі), дозволило обґрунтувати та побудувати дерево класифікації математичних моделей циклічних функцій, для яких розроблені, в роботі, методи сегментації (ідентифікації сегментних структур) циклічних сигналів.

6. Враховуючи обґрунтовані сегментні структури та відомі характеристики використаної в роботі математичної моделі, зокрема, атрибути та фази, сформульовано постановку завдання сегментації циклічних сигналів із сегментною циклічною та сегментною зонною структурами, що дозволяє

врахувати їх в розробляємих методах та проводити їх ідентифікацію.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДОЛОГІЯ СЕГМЕНТАЦІЇ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ. МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СЕГМЕНТНИХ СТРУКТУР ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ. ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ СЕГМЕНТАЦІЇ

У цьому розділі враховуючи постановку завдання сегментації циклічних сигналів описано її вирішення шляхом розробленої методології сегментації циклічних сигналів, моделями яких є циклічні функції. Описано узагальнений підхід до сегментації абстрактної циклічної функції, яка є узагальненою моделлю циклічного сигналу із сегментною структурою. На основі розробленої методології створено систему методів сегментації циклічних сигналів, які, власне, дозволяють проводити ідентифікацію їх сегментних структур, із урахуванням двох підходів – детермінованого та стохастичного, залежно від вибраної математичної моделі. Для розроблених методів сегментації детермінованих циклічних сигналів та випадкових циклічних сигналів дискретного аргументу, проведено оцінювання їх точності. Наведено результати застосування розроблених методів ідентифікації сегментних структур у різних галузях: медицині, механіці, економіці, а саме результати сегментації циклічних кардіосигналів, циклічних механічних процесів рельєфних утворень поверхні металів, що виникають під механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливом на неї та циклічних економічних процесів.

Основні результати третього розділу опубліковані в роботах [166, 179, 415, 426].

3.1. Методологія сегментації циклічних сигналів

У попередньому розділі сформульована постановка завдання сегментації циклічних сигналів, моделлю яких є циклічні функції. Враховуючи її необхідно провести розбиття області визначення циклічного сигналу і визначити часові чи просторові множини меж сегментів-циклів $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$ чи множини меж

сегментів-зон $\mathbf{D}_z = \left\{ t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$. Іншими словами, отримати відомості про сегментну структуру, провівши її визначення, а також її ідентифікацію, встановивши при цьому тип сегментної структури: сегментну циклічну або сегментну зонну структуру досліджуваного циклічного сигналу.

У загальному випадку розв'язати таку задачу сегментації циклічного сигналу є складно, оскільки завжди необхідно уточнити, конкретизувати апріорну інформацію про її характеристики в ті моменти часу чи просторові відліки, які відповідають межах сегментів-циклів чи сегментів-зон. А така інформація, в більшості випадків, є невідомою.

Перш за все, для побудови методології сегментації циклічних сигналів необхідно окреслити основні принципи, які будуть покладені в її основу. В науці принципами є загальні вимоги до побудови теорії, сформульовані як те первинне, що лежить в основі певної сукупності фактів. Існування факту повторюваної структури в розгортанні циклічного явища чи процесу є головним принципом, покладеним в основу методології їх сегментації. Твердження про наявність сегментної циклічної структури циклічних функцій, як моделей циклічних сигналів, є головним, важливим фактом, який обов'язково необхідно враховувати в методах опрацювання, зокрема їх сегментації. При характеристиці різноманітних систем, які генерують циклічні сигнали, важливим фактом, який враховує ті суттєві характеристики, які відповідають за правильне функціонування тих чи інших її підсистем, без яких вона не виконувала б свого призначення, є наявність відповідних етапів у розгортанні циклічного явища чи процесу, які відображаються сегментною зонною структурою і відповідають роботі її підсистем. Враховуючи це, розглянемо принципи, які покладені в основу методології сегментації циклічних сигналів [166].

Перший принцип враховує факт циклічного розгортання у часі чи просторі структури циклічного явища, яке повторюється (феноменологічна властивість). Такий принцип є первинним, він враховується сегментною циклічною структурою досліджуваних циклічних сигналів.

Другий принцип враховує факт можливої наявності у циклічній структурі сегментів-зон, які повторюються на всіх його циклах. Такий принцип є вторинним, оскільки він враховується сегментною зонною структурою. Проте слід відзначити, що не у всіх циклічних сигналах, на циклах може спостерігатися сегментна зонна структура, як це у випадку, наприклад, циклічного економічного процесу чи інших. Тому, власне, її існування є вторинним.

Третій принцип враховує існування у циклічних сигналах (завдяки обґрунтованій їх математичній моделі у вигляді циклічної функції) ізоморфізмів відносно порядку відліків циклічних сигналів у всіх його сегментах-циклах та сегментах-зонах. Даний принцип є важливим для побудови методів сегментації, оскільки методологія сегментації циклічних сигналів будується на теорії циклічного функціонального відношення (теорії циклічних функцій, як моделей циклічних сигналів), у якій постулюється наявність ізоморфізмів відносно відліків циклічної функції, а також рівність за атрибутом (атрибутами) її однофазних значень [201, 205].

Четвертий принцип є наслідковим. Він полягає у зв'язку сегментних та ритмічних структур через їх відліки. Завдяки цьому можна оцінити ритм циклічного сигналу, попередньо визначивши та ідентифікувавши сегментну структуру. Також справедливе наступне твердження. Маючи ритмічну структуру (дискретну функцію ритму), можна визначити сегментну структуру циклічного сигналу (сегментну циклічну чи сегментну зонну структуру).

Перелічені принципи є обґрунтованими, оскільки впливають із феноменологічних особливостей циклічних сигналів та математично формалізовані у другому розділі дисертаційної роботи, що дозволяє на чіткій математичній основі будувати методи сегментації циклічних сигналів, враховуючи відповідні підходи до використаних математичних моделей циклічних сигналів.

Зобразимо у вигляді структурної схеми, рисунок 3.1, методологію сегментації циклічних сигналів, ключові компоненти які використовуються для побудови нових методів ідентифікації сегментних структур. Дану структуру

можна розглядати, як узагальнену стратегію побудови нових методів сегментації циклічних сигналів яка враховує чотири наведені вище принципи методології.

Розглянемо узагальнену концепцію сегментації циклічних сигналів. У даній структурній схемі досліджуваній дискретний циклічний сигнал $F(t_k) \in \Psi, t_k \in \mathbf{W}$ у загальному випадку – це абстрактна циклічна функція із сегментною структурою (модель циклічного сигналу), надходить на вхід першого блока даної структури.

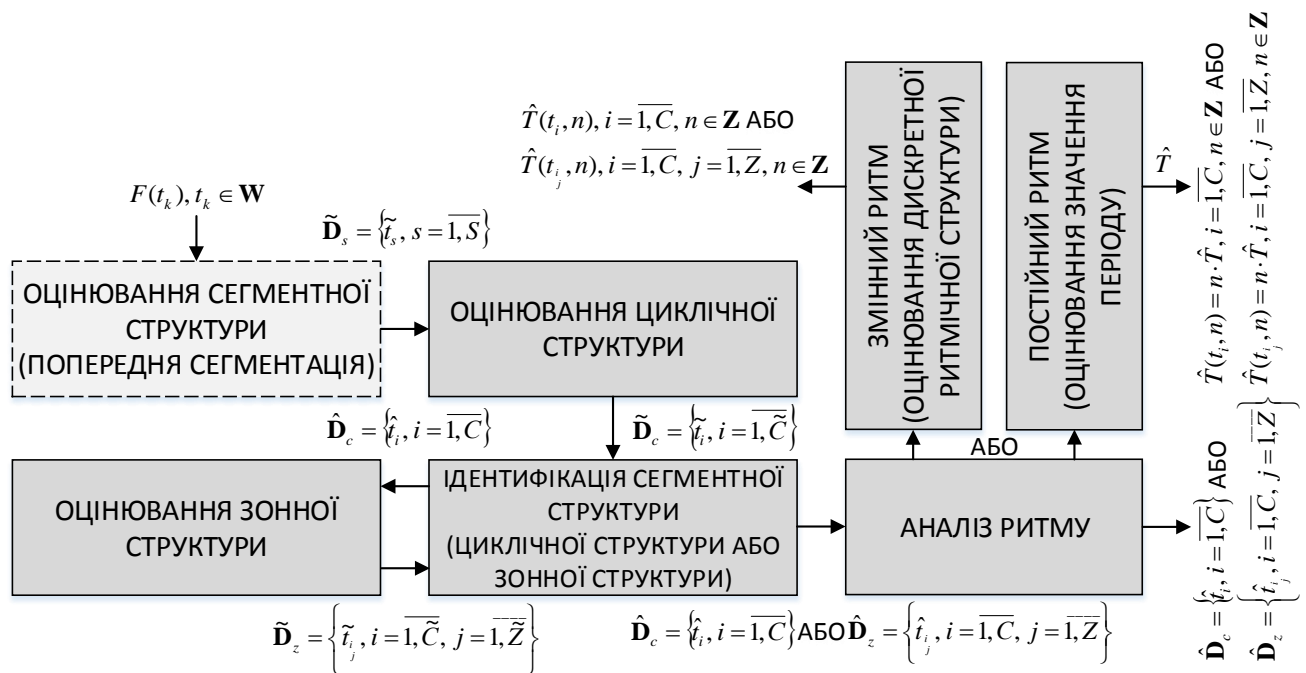


Рис. 3.1. Узагальнена структурна схема методології сегментації циклічних сигналів (ідентифікації сегментних структур)

Першим етапом опрацювання циклічного сигналу в такій структурі є оцінювання сегментної структури у загальному. На цьому етапі при побудові методу сегментації необхідно розробити або застосувати відомий підхід і/або метод розбиття досліджуваного циклічного сигналу на сегменти. При цьому на даному етапі не проводиться ідентифікація належності отриманих сегментів до сегментів-циклів чи сегментів-зон. На цьому етапі важливе лише попереднє розбиття циклічного сигналу на основі врахування його особливостей. У більшості практичних задач немає ніякої інформації про характеристики відліків меж сегментів. Тому на даному етапі необхідно використовувати різні підходи й методи, які дозволяють певним чином (враховуючи його особливості) розбити

досліджуваний сигнал на сегменти (отримати попередню сегментну структуру). При цьому враховуються особливості досліджуваного циклічного сигналу (його властивості). Для цього можуть бути використані методи, які реагують на зміну в циклічному сигналі його морфологічних особливостей (особливостей форми) циклів сигналу. Наприклад, при стохастичному підході, коли моделлю циклічного сигналу є циклічний кусково-стаціонарний випадковий процес, на першому етапі (для попередньої сегментації) пропонується застосувати відомі методи пошуку розладки випадкових процесів [31, 32, 34-37, 185].

Другий етап – оцінювання циклічної структури, полягає у знаходженні таких моментів часу або просторових відліків, для яких буде виконуватись умова (2.37) та (2.38) для сегментної циклічної структури. На цьому етапі відбувається визначення відліків, значення яких рівні за атрибутом (атрибутами) і врахування ізоморфізмів відліків сегментів-циклів, а також перевірка однотипності фазової структури на визначених (попередньо оцінених) циклах. Коректність визначення відліків меж сегментів-циклів є рівність відповідних їм значень за атрибутом. У такому разі вважається, що відліки меж сегментів-циклів коректно (правильно) визначені, коли також виконується й умова однакової фазової структури на кожному із визначених сегментів-циклів. Слід сказати, що на цьому етапі не відбувається ідентифікація сегментної циклічної структури, це відбувається на наступному етапі.

На третьому етапі здійснюється уточнення сегментної зонної структури та ідентифікація сегментної циклічної чи сегментної зонної структури. При цьому відбувається перевірка визначених відліків меж сегментів на попередньому етапі значення яких рівні за атрибутом (атрибутами). Якщо між визначеними (оціненими) відліками меж сегментів-циклів немає відліків на сусідніх сегментах, на яких фазова структура відрізняється, тоді приймається рішення про ідентифіковану циклічну структуру. Якщо такі відліки встановлені, то уточняється сегментна зонна структура. Для її уточнення здійснюється перевірка виконання умов (2.40), (2.41) для сегментної зонної структури. На цьому етапі здійснюється визначення відліків значення яких рівні за атрибутом (атрибутами) і

врахування ізоморфізмів відліків сегментів-зон, а також перевірка однотипності фазової структури на встановлених сегментах-зонах. Правильність визначення відліків меж сегментів-зон є рівність відповідних їм значень за атрибутом (за Евклідовою метрикою близькості). У такому разі вважається, що відліки меж сегментів-зон коректно визначені, коли також виконується й умова однакової фазової структури на кожному із визначених сегментів-зон. Після цієї процедури, оскільки встановлені межі сегментів-зон на сегментах-циклах, приймається рішення про те, що була ідентифікована сегментна зонна структура.

На четвертому етапі відбувається аналіз (оцінювання) ритму циклічного сигналу, визначається, який наявний ритм (постійний чи змінний) у досліджуваному циклічному сигналі (циклічній функції). Якщо ритм постійний, здійснюється оцінювання значення періоду. У випадку, коли ритм змінний, здійснюється оцінювання ритмічної структури (дискретної функції ритму) циклічного сигналу.

В такій структурі методології сегментації циклічних сигналів можна виділити дві складові. Перша частина (виділена пунктиром, див. рис. 3.1) є зміною – це перший блок (можуть використовуватись різні методи (порогові методи, методи пошуку розладки, методи на основі різницевих функцій, методи на основі хвильового перетворення і т.і.), які враховують особливості циклічних сигналів); друга частина є незмінною. Її обов'язково необхідно враховувати під час побудови нових методів сегментації (ідентифікації сегментних структур) циклічних сигналів.

Підсумуємо наведене вище, враховуючи описану узагальнену концепцію сегментації циклічних сигналів (методологію їх сегментації). По-перше, це система певних правил, принципів, операцій, які застосовуються під час аналізу циклічних сигналів та проведенні їх сегментації. Первинною є сегментна циклічна структура, а вторинною – сегментна зонна структура, яка входить у сегментну циклічну структуру й використовується при її ідентифікації. По-друге – це узагальнений теоретико-методологічний підхід до побудови методу сегментації для абстрактної циклічної функції, в якому шляхом уточнення математичної

моделі та її характеристик (атрибутів) можна конкретизувати параметри методу сегментації й будувати його для різних циклічних сигналів, використовуючи детермінований чи стохастичний підходи щодо обраної математичної моделі.

Перейдемо до розгляду узагальненого методу сегментації для циклічного сигналу, моделлю якого є абстрактна циклічна функція з урахуванням розробленої методології.

3.2. Метод сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є абстрактна циклічна функція із сегментною структурою

Процес сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є циклічна функція, полягає не тільки у розбитті його реалізації на певні сегменти й отримання області визначення його сегментів-циклів чи сегментів-зон. Тобто отримання множини відліків сегментної структури, а це також і ідентифікація її сегментної структури (сегментної циклічної чи сегментної зонної структури).

Розглянемо узагальнений теоретико-методологічний підхід (методологію) сегментації до циклічних сигналів. Нехай маємо досліджуваній циклічний сигнал, моделлю якого є абстрактна циклічна функція $F(t) \in \Psi, t \in \mathbf{W}$ із сегментною структурою. Згідно з першим етапом, структурної схеми методології сегментації (див. рис. 3.1) необхідно провести розбиття на сегменти, використовуючи феноменологічні особливості циклічного сигналу. При цьому встановлення належності отриманих сегментів до циклу чи до зони на першому етапі не проводиться. При сегментації такого циклічного сигналу можна казати лише узагальнено, оскільки для нього не конкретизовані ні математична модель (циклічна функція), ні її властивості (атрибути), немає інформації про характеристики відліків меж сегментів. Нагадаємо, що при використанні детермінованого підходу область значень циклічної функції $\Psi = \mathbf{R}$ (є множина дійсних чисел), а при стохастичному підході $\Psi = \mathbf{L}_2(\Omega, \mathbf{P})$ – є Гільбертовим простором випадкових величин, що задані на одному ймовірнісному просторі. Для прикладу, на першому етапі сегментації (попередня сегментація) можна

застосувати відомі методи, засновані на використанні, наприклад, порогового рівня при детермінованому підході щодо вибору математичної моделі [1, 8, 11, 41, 70, 71, 462, 346].

Таким чином, при попередній сегментації отримується множина часових чи просторових відліків меж сегментів $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{\tilde{t}_s, s = \overline{1, S}\}$, ідентифікація яких ще не проведена.

На другому етапі, згідно з методологією, спочатку визначаються відліки, які рівні за атрибутом (атрибутами). Тобто необхідно виконання умови (2.38). Оцінюється циклічна структура, критерій оцінювання – рівність значень за атрибутом (2.33). При цьому визначаються відліки моментів часу або простору (ізоморфні відліки циклічної структури), для яких значення рівні за атрибутами. Отримуються множини відліків моментів часу $\tilde{\mathbf{D}}_c = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, \tilde{C}}\}$. При цьому, коли використовується детермінований підхід для циклічного сигналу характерна рівність однофазних значень (ознака, властивість атрибута, використовується множина атрибутів – \mathbf{A}), а у випадку стохастичного підходу – це стохастична еквівалентність множини атрибутів \mathbf{A}_k .

Наступним етапом є уточнення та ідентифікація сегментної структури сегментної циклічної чи сегментної зонної.

На цьому етапі визначаються відліки моментів часу, які рівні за атрибутом, а також при яких не змінюється фазова структура значень циклічного сигналу на визначених (оцінених) сегментах. Якщо фазова структура значень не змінюється, у такому випадку визначені відліки відповідають межах сегментів-циклів $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$ і приймається рішення про те, що ідентифікована сегментна циклічна структура.

У випадку, коли фазова структура значень циклічного сигналу відрізняється на визначених сегментах, тоді визначається сегментна зонна структура $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, \tilde{C}}, j = \overline{1, \tilde{Z}}\}$. Після цього уточнюються отримані відліки за атрибутом, а також перевіряється на однаковість фазова структура на визначених сегментах-

зонах.

Після даного під етапу визначені відліки відповідають межах сегментів зон $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_{i,j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ і приймається рішення про те, що була ідентифікована сегментна зонна структура.

На останньому етапі оцінюється ритмічна структура, якщо ритм стабільний, оцінюється значення періоду (2.2) і визначається ритмічна структура для врахованого оціненого періоду (2.27). Якщо ритм змінний оцінюється ритмічна структура (2.25), (2.26) для ідентифікованої сегментної циклічної чи сегментної зонної структури циклічного сигналу відповідно.

З теорії циклічних функцій [201] відомо про наявність ізоморфізмів між однофазними відліками циклічної функції, а відповідно для циклічного сигналу, моделлю якого є циклічна функція, крок його дискретизації є нерівномірним. На практиці дискретизація досліджуваного аналогового (неперервного) циклічного сигналу в цифровій системі обробки даних, як правило, відбувається з рівномірним кроком дискретизації. Тому при побудові методів сегментації необхідно це враховувати шляхом пошуку та уточнення меж визначених сегментів-циклів чи сегментів-зон. Це враховано і буде показано в розроблених методах сегментації.

Далі розглянемо методи сегментації циклічних сигналів, які побудовані на основі розробленої методології сегментації (ідентифікації сегментних структур). Почнемо від найпростішого випадку, щоразу ускладнюючи методи. Розглянемо спочатку детермінований підхід, а потім – випадковий.

3.3. Метод сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу із відомою (ідентифікованою) сегментною структурою

Спочатку розглянемо випадок, коли моделлю досліджуваного циклічного сигналу є циклічна числова функція. При цьому апріорно відомо (ідентифіковано), що досліджуваний сигнал містить сегментну циклічну

структуру проте, її відліки є невідомими.

3.3.1. Метод сегментації циклічного сигналу з урахуванням відомої (ідентифікованої) сегментної циклічної структури. Нагадаємо, з означення Ж.2, додатка Ж, відомо, що детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу із сегментною структурою називається функція $f(t_k) \in \Psi = \mathbf{R}$, $t_k \in \mathbf{W} = \mathbf{D} = \{t_k, k = \overline{1, K}\}$, яку наведено у вигляді (через урахування циклів, сегментів-циклів), (Ж.11), $f(t_k) = \sum_{i \in \mathbf{Z}} f_i(t_k)$, $t_k \in \mathbf{W}$, де t_k - дискретні відліки циклічної числової функції [201].

На практиці завжди маємо справу зі скінченою кількістю дискретних відліків досліджуваного циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу із сегментною структурою, тобто $k = \overline{1, K}$. У формулі (Ж.11) $i \in \mathbf{Z}$, проте, проводячи опрацювання циклічного сигналу, в задачах діагностики чи прогнозу необхідно визначити цілу кількість циклів досліджуваного циклічного сигналу, тобто $i = \overline{1, C}$, де C - кількість його повних сегментів-циклів; $f_i(t_k)$ - відповідає i -му циклу детермінованої циклічної числової функції дискретного аргументу із сегментною структурою, яка визначається (Ж.12), $f_i(t_k) = f(t_k) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t_k)$, $i = \overline{1, C}$, $t_k \in \mathbf{W}$, де $I_{\mathbf{W}_i}(t_k)$ - індикаторна функція i -го сегменту-циклу, що дорівнює (Ж.13), $I_{\mathbf{W}_i}(t_k) = \begin{cases} 1, t_k \in \mathbf{W}_i, \\ 0, t_k \notin \mathbf{W}_i. \end{cases}$

Області визначення \mathbf{W}_i індикаторної функції i -го сегменту-циклу для випадку дискретного сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, визначаються (Ж.14), $\mathbf{W}_i = \{t_{i,l}, i = \overline{1, C}, l = \overline{1, L}\}$, де $t_{i,l}$ - відліки моментів часу, які відповідають i -му сегменту-циклу; L - кількість дискретних відліків на сегменті-циклі, $L = const$.

Множина відліків моментів часу, яка визначає межі i -го сегменту-циклу, визначається (Ж.15), $\hat{\mathbf{W}}_i = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$, де \hat{t}_i - відліки моментів часу, які відповідають межам сегментів-циклів.

Покажемо зв'язок між відліками моментів часу i -го сегменту-циклу (Ж.14)

та відліками моментів часу меж сегментів-циклів (Ж.15):

$$\begin{aligned} t_{i,1} &= \hat{t}_i, i = \overline{1, C}, \\ t_{i,L+1} &= \hat{t}_{i+1}, i = \overline{1, C}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

На рисунку 3.2, як приклад, схематично зображено детерміновану циклічну числову функцію дискретного аргументу із позначенням сегментної структури (сегментної циклічної структури), тривалостей циклів $\{T_i, i = \overline{1, C}\}$, які можуть бути визначені через встановлені відліки меж циклів за формулою (2.2). Для наочності відображення відповідних циклів на рисунку 3.2 наведено інтерполяцію значень циклічної числової функції дискретних відліків циклів – пунктирна лінія.

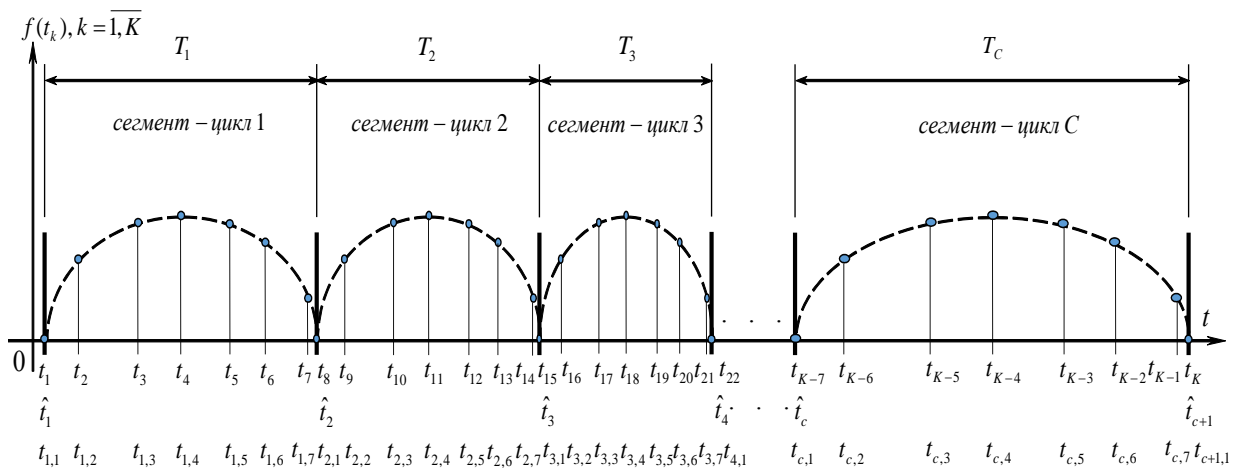


Рис. 3.2. Схематичне зображення детермінованої циклічної числової функції дискретного аргументу із позначенням сегментної циклічної структури

Постановка задачі сегментації для такого циклічного сигналу. За умови, що апіорно відомо (ідентифіковано) тип сегментної структури – сегментна циклічна структура, полягає у знаходженні невідомих параметрів: L - кількість дискретних відліків на циклі та C - кількість сегментів-циклів циклічного сигналу.

При цьому також апіорно відомо, що для детермінованої циклічної числової функції дискретного аргументу із сегментною структурою значення, які відповідають відлікам меж сегментів-циклів рівні (однофазні значення), тобто

рівні за атрибутом (2.28), $p(f(t)) = f(t)$. А кількість відліків на кожному циклі постійна ($L = const$), але при цьому невідома. Слід відзначити, що крок дискретизації у такого дискретного циклічного сигналу не є рівномірним.

Враховуючи методологію сегментації циклічних сигналів, наведемо послідовні кроки побудованого методу сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу із сегментною циклічною структурою.

1). Визначаємо множину відліків моментів часу $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{t_g, g = \overline{1, G}\}$, які відповідають межах сегментів-циклів (значення їх рівні, тобто відповідні значення функції однакові, властивість – циклічної числової функції):

$$t_g = \begin{cases} t_k, f(t_1) = f(t_k), \\ t_k - \text{не приймається, } f(t_1) \neq f(t_k), \end{cases}, k = \overline{1, K}, g = \overline{1, G}, \quad (3.2)$$

де G - кількість відліків, при яких рівні значення циклічного сигналу першому значенню $f(t_1)$, $G < K$; t_g – відлік моменту часу, при якому виконалася рівність (3.2). Перше значення $f(t_1)$ відповідає відліку межі початку першого циклу t_1 .

Після виконання перевірки (3.2) формується множина відліків моментів часу $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{t_g, g = \overline{1, G}\}$.

2). Для визначених відліків моментів часу, які відповідають межах сегментів-циклів, необхідно перевірити фазову структуру на отриманих сегментах за співвідношенням

$$\hat{t}_g = \begin{cases} t_g, f(t_{1+l}) = f(t_{g+l}), 1 \leq l < g + 1, \\ t_g - \text{не враховується, в іншому випадку,} \end{cases}, g = \overline{1, G-1}, \quad (3.3)$$

де t_g - відлік моменту часу, при якому виконалась умова (3.2); \hat{t}_g - відлік моменту часу для якого виконалась умова (3.3), для фазової структури; l - кількість відліків, які відповідають значенням (фазам), для яких проводиться перевірка

фазової структури. Після виконання перевірки формується множина відліків моментів часу $\tilde{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_g, g = \overline{1, G}\}$.

При такому розбитті кількість повних сегментів-циклів циклічної числової функції визначається

$$C = G - 1. \quad (3.4)$$

Таким чином, застосувавши вище описані кроки даного методу, ми визначили кількість сегментів-циклів циклічного сигналу. Відповідно визначена множина відліків, які відповідають межах циклів $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$.

Тепер необхідно визначити кількість дискретних відліків на циклі.

3). З цією метою знайдемо відліки моментів часу, які відповідають межах сегментів-циклів $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$ серед дискретних відліків досліджуваного сигналу $\mathbf{D} = \{t_k, k = \overline{1, K}\}$.

Оскільки ми маємо справу з дискретними відліками циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу, то в нашому випадку інформація про кількість дискретних відліків на циклі L прихована в індексах відліків. З метою визначення кількості дискретних відліків на циклі введемо позначення

$$t_r = t_g, t_q = t_{g+1}, g = \overline{1, G-1}, r, q = \overline{1, K}, r < q. \quad (3.5)$$

Враховуючи отримані індекси дискретних відліків моментів часу досліджуваного сигналу, визначимо кількість дискретних відліків на циклі

$$L = q - r. \quad (3.6)$$

Оскільки апріорно відомо для циклічних сигналів, моделями яких є циклічні

функції, що $L = const$, то для будь-яких взятих t_g і t_{g+1} , $g = \overline{1, G-1}$ отриманих індексів r, q буде виконуватися рівність (3.6).

Отримавши L та C , ми здійснили процедуру сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу із сегментною структурою. Також визначили сегментну структуру (сегментну циклічну структуру) $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$ відповідно враховуючи відліки сегментної циклічної структури, область визначення сегментів циклів $\mathbf{W}_i = \{t_{i,l}, i = \overline{1, C}, l = \overline{1, L}\}$.

Тепер розглянемо випадок, коли маємо справу з циклічним сигналом, для якого наперед відома (ідентифікована) його сегментна структура – сегментна зонна структура.

3.3.2. Метод сегментації циклічного сигналу з урахуванням відомої (ідентифікованої) сегментної зонної структури. Якщо досліджуваний сигнал має на кожному циклі сегменти-зони, то його математична модель – детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу може бути подана у такій формі (через врахування зон, сегментів-зон)

$$f(t_k) = \sum_{i \in \mathbf{Z}} \sum_{j=1}^Z f_j(t_k), t_k \in \mathbf{W}, \quad (3.7)$$

де Z - кількість сегментів-зон на кожному циклі циклічної числової функції; $f_j(t_k), t_k \in \mathbf{W}_{i_j}$ - j -та зона в i -му циклі детермінованої циклічної числової функції, що дорівнює

$$f_{i_j}(t_k) = f(t_k) \cdot I_{\mathbf{W}_{i_j}}(t_k) = f_i(t_k) \cdot I_{\mathbf{W}_{i_j}}(t_k), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, t_k \in \mathbf{W}, \quad (3.8)$$

де $I_{\mathbf{W}_{i_j}}(t_k)$ - індикаторна функція j -ї зони в i -му циклі, що дорівнює

$$I_{\mathbf{W}_j}(t_k) = \begin{cases} 1, & t_k \in \mathbf{W}_j, \\ 0, & t_k \notin \mathbf{W}_j. \end{cases} \quad (3.9)$$

Області визначення \mathbf{W}_j індикаторної функції j -ї зони в i -му циклі для випадку дискретного сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, визначаються

$$\mathbf{W}_j = \{t_{j,l}, l = \overline{1, L_j}\}, L = \sum_{j=1}^Z L_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, \quad (3.10)$$

де L - кількість дискретних відліків на циклі, $L = const$; L_j - кількість дискретних відліків на j -му сегменті-зоні.

Функція (Ж.12) подана у додатку Ж, що відповідає i -му циклу детермінованої циклічної числової функції, пов'язана з функцією (3.8), яка відповідає j -им сегментам-зонам детермінованої циклічної числової функції такою залежністю

$$f_i(t_k) = \sum_{j=1}^Z f_j(t_k), t_k \in \mathbf{W}, \forall i = \overline{1, C}. \quad (3.11)$$

Області визначення сегментів-зон та сегментів-циклів циклічної числової функції з сегментною структурою задовольняють таким співвідношенням

$$\mathbf{W}_i = \bigcup_{j=1}^Z \mathbf{W}_{i,j}, \bigcup_{i=1}^C \bigcup_{j=1}^Z \mathbf{W}_{i,j} = \mathbf{W}, \mathbf{W}_{i,j} \neq \emptyset, \mathbf{W}_{i_1} \cap \mathbf{W}_{i_2} = \emptyset, j_1 \neq j_2. \quad (3.12)$$

Покажемо зв'язок між відліками моментів часу i -го сегменту-циклу (Ж.15) та відліками моментів часу меж сегментів-зон:

$$\begin{aligned} \hat{t}_1 &= t_1, \hat{t}_1 = t_{1,1}, \hat{t}_i = t_{i,1} = t_i = t_{i,1}, i = \overline{1, C}, \\ \hat{t}_{i+1} &= t_{i,L+1} = t_{i+1} = t_{i+1,1}, i = \overline{1, C-1}, t_{i+1,1} = t_{i+1} = t_{i+1,1}, i = \overline{1, C-1}. \end{aligned} \tag{3.13}$$

Необхідно відзначити, що для такої сегментної структури (сегментної зонної структури) характерно те, що значення в моменти часу, які відповідають межах сегментів, рівні за атрибутом, але структура фаз (фазова структура) на сусідніх сегментах відрізняється. При цьому така структура фаз на сегментах повторюється на однотипних її сегментах, але в різних циклах циклічного сигналу.

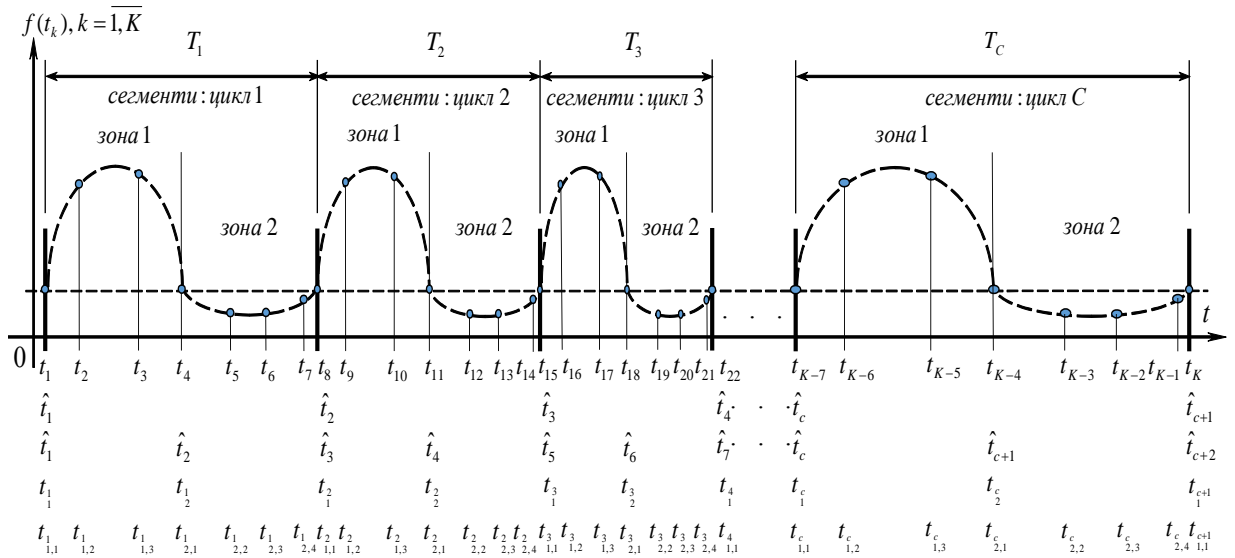


Рис. 3.3. Схематичне зображення циклічної числової функції дискретного аргументу із позначенням сегментної зонної структури

На рисунку 3.3. наведено, як приклад, схематичне зображення детермінованої циклічної числової функції дискретного аргументу із позначенням сегментної зонної структури, тривалостей циклів $\{T_i, i = \overline{1, C}\}$, які можуть бути визначені через встановлені відліки меж циклів за формулою (2.2). Позначені тривалості сегментів-зон $\left\{T_{i,j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\right\}$ та межі початків j -го сегмента $t_{i,j}$ та його закінчення $t_{i,j+1}$ у кожному циклі, які можуть бути визначені через

встановлені відліки меж сегментів-зон за формулою (2.13). Для наочності відображення відповідних сегментів-зон на рисунку 3.3 наведено інтерполяцію значень циклічної числової функції дискретних відліків зон – пунктирна лінія.

Постановка задачі сегментації такого циклічного сигналу, за умови, що апіорно відомо (ідентифіковано) тип сегментної структури – сегментна зонна структура, полягає у знаходженні невідомих параметрів: L - кількість дискретних відліків на циклі; L_j - кількість дискретних відліків на j -му сегменті-зони; S - кількість сегментів-циклів та Z - кількість сегментів-зон на циклі циклічної функції.

При цьому, також апіорно відомо, що для детермінованої циклічної числової функції дискретного аргументу із сегментною структурою значення, які відповідають відлікам меж сегментів-циклів та сегментів зон рівні (однофазні значення), тобто рівні за атрибутом (2.28), $p(f(t)) = f(t)$. А кількість відліків на кожному циклі постійна ($L = const$), а також кількість відліків на кожному сегменті-зоні постійна, тобто ($L_j = const, j = \overline{1, Z}$), але при цьому невідома.

Враховуючи методологію сегментації циклічних сигналів, наведемо наступні кроки методу сегментації циклічного сигналу моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу із сегментною зонною структурою.

1). Визначаємо множину відліків моментів часу $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{t_s, s = \overline{1, S}\}$, які відповідають межах сегментів-циклів та сегментів-зон (значення їх рівні, тобто значення функції однакові, властивість – циклічної числової функції):

$$t_s = \begin{cases} t_k, & f(t_1) = f(t_k), \\ t_k - \text{не приймається}, & f(t_1) \neq f(t_k), \end{cases}, k = \overline{1, K}, s = \overline{1, S}, \quad (3.14)$$

де S - кількість відліків, при яких рівні значення циклічного сигналу першому значенню $f(t_1)$, $S < K$; t_s - відлік моменту часу, при якому виконалася рівність (3.14). Перше значення $f(t_1)$ відповідає відліку межі початку першого циклу t_1 .

Після виконання перевірки (3.14) формується множина відліків моментів часу $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{t_s, s = \overline{1, S}\}$.

При такому розбитті кількість повних сегментів-циклів та сегментів-зон циклічного сигналу невідома. Тому необхідно встановити, які серед отриманих відліків відповідають межам сегментів-циклів, а які – межам сегментів-зон. Для цього необхідно перевірити фазову структуру на визначених сегментах. При цьому кількість відліків фазової структури на відповідних сегментах буде різною. Для перевірки фазової структури визначимо кількість відліків u , для яких будемо перевіряти фазову структуру на всіх сегментах-зонах.

2). Для визначених відліків моментів часу, які відповідають межам сегментів-зон необхідно перевірити фазову структуру на отриманих сегментах. Для цього перевіряємо фазову структуру між визначеними межами сегментів t_s та t_{s+1} .

Враховуючи, що кількість відліків на різних сегментах буде неоднакова, тому для визначення u введемо позначення.

Для першого досліджуваного сегмента,

$$t_{r1} = t_s, t_{q1} = t_{s+1}, s = \overline{1, S-1}, r1, q1 = \overline{1, K}, r1 < q1. \quad (3.15)$$

Для другого досліджуваного сегмента,

$$t_{r2} = t_{s+1}, t_{q2} = t_{s+2}, s = \overline{1, S-2}, r2, q2 = \overline{1, K}, r2 < q2. \quad (3.16)$$

Визначимо кількість відліків для сегментів, які аналізуємо:

$$U_1 = q1 - r1, U_2 = q2 - r2. \quad (3.17)$$

При виконанні умови $U_1 > U_2$ приймаємо $U = U_2$, а у випадку виконання умови $U_1 < U_2$ приймаємо $U = U_1$. Це необхідно з метою перевірки фазової

структури по меншій кількості відліків для сегментів-зон $u = \overline{1, U}$, які аналізуємо. Далі перевіряємо фазову структуру на сегментах-зонах за співвідношенням

$$\begin{cases} \hat{t}_g = t_s, & f(t_1 + u) = f(t_s + u), u = \overline{1, U}, g = \overline{1, G}, \\ t_z = t_{s+1}, & f(t_1 + u) \neq f(t_s + u), s = s + 1, z = z + 1, u = \overline{1, U}, z = \overline{1, \tilde{Z} - 1}, \end{cases} \quad (3.18)$$

де $s = \overline{1, S - 1}$; G - кількість відліків, при яких рівні значення циклічної числової функції першому значенню $f(t_1)$ і фазова структура однакова на відповідних сегментах; t_s - відлік моменту часу, при якому виконалась умова (3.14); \hat{t}_g - відлік моменту часу, для якого виконалась умова (3.18) для фазової структури; u - кількість відліків, які відповідають значенням (фазам), для яких проводиться перевірка фазової структури на сегментах. Після виконання перевірки формується множина відліків моментів часу $\tilde{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_g, g = \overline{1, G}\}$ та множина відліків моментів, які відповідають межах сегментів-зон $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{t_z, z = \overline{1, \tilde{Z}}\}$ між межами сегментів-циклів \hat{t}_g .

При такому розбитті кількість повних сегментів-циклів циклічної числової функції визначається за формулою (3.4).

Таким чином, застосувавши вищеописані кроки методу, ми визначили кількість сегментів-циклів $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$ циклічного сигналу. Відповідно визначена множина відліків, які відповідають межах сегментів-зон $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{t_z, z = \overline{1, \tilde{Z}}\}$.

3). Це необхідно визначити кількість дискретних відліків на циклі за формулами (3.5) та (3.6), а також кількість відліків на сегментах-зонах.

Отримавши L та C , ми здійснили процедуру сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу із сегментною структурою, визначили сегментну циклічну структуру. Проте, на початку підрозділу, було сказано, що апіорно відома структура такого циклічного сигналу – сегментна зонна структура. Сегментна зонна структура є

вкладеною у сегментну циклічну структуру, тобто виконується рівність

$$\mathbf{D}_s = \{t_s, s = \overline{1, S}\} = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\} \cup \{t_z, z = \overline{1, \tilde{Z}}\}. \quad (3.19)$$

Врахуємо відліки моментів часу відповідних меж сегментів-зон t_z на відповідних сегментах циклах $\hat{t}_i, \dots, t_z, \dots, \hat{t}_{i+1}$.

Якщо виконується умова для i -го циклу $\hat{t}_i < t_z < \hat{t}_{i+1}$, то тоді $z = z + 1$ (початкова умова $z = 0, i = 1, j = 1$), використовуючи відліки, які відповідають межам сегментів-зон (3.20). В іншому випадку проводимо аналіз для наступного циклу, тобто $i = i + 1, j = 1, i = \overline{1, C - 1}, z = \overline{1, \tilde{Z} - 1}$.

$$\hat{t}_j = t_z, z = \overline{1, \tilde{Z} - 1}, j = j + 1, \quad (3.20)$$

де \tilde{Z} - кількість відліків сегментів-зон.

4). Враховуючи визначену кількість відліків зон \tilde{Z} та кількість визначених циклів C , визначимо кількість зон на циклі. Для цього використаємо співвідношення

$$Z = \frac{\tilde{Z}}{C} + 1. \quad (3.21)$$

Отримавши кількість сегментів-зон на циклі Z циклічного сигналу, необхідно визначити кількість дискретних відліків на сегменті-зоні. З цією метою знайдемо відліки моментів часу, які відповідають межам сегментів-зон $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ серед дискретних відліків досліджуваного сигналу $\mathbf{D} = \{t_k, k = \overline{1, K}\}$.

Оскільки ми маємо справу з дискретними відліками, циклічного сигналу

моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу, то в нашому випадку інформація про кількість дискретних відліків на циклі L визначена, а кількість дискретних відліків на сегменті-зоні L_j прихована в індексах відліків сегментів-зон. З метою визначення кількості дискретних відліків на сегментах-зонах введемо позначення

$$t_r = t_{i_j}, t_q = t_{i_{j+1}}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, r, q = \overline{1, K}, r < q. \quad (3.22)$$

Враховуючи отримані індекси дискретних відліків моментів часу досліджуваного циклічного сигналу, визначимо кількість дискретних відліків на циклі

$$L_j = q_j - r_j, j = \overline{1, Z}. \quad (3.23)$$

Можна перевірити кількість дискретних відліків на циклі L , для них має виконуватися рівність

$$L = \sum_{j=1}^Z L_j. \quad (3.24)$$

Дана рівність має виконуватися для будь-якого сегмента-циклу, оскільки $L = const$.

Отримавши L та C , ми здійснили процедуру сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу із сегментною структурою визначили сегментну зонну структуру (зонно-циклічну структуру) $\hat{\mathbf{D}}_z = \{ \hat{t}_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \}$. Також визначили кількість дискретних відліків на j -му сегменті-зони L_j та кількість сегментів-зон на кожному циклі циклічної числової функції Z . Враховуючи відліки визначеної

сегментної зонної структури, область визначення сегментів зон $\mathbf{W}_i = \{t_{j,l}, l = \overline{1, L_j}\}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$. Застосувавши описані методи для сегментації циклічних сигналів, для яких апріорно відомо (ідентифіковано) сегментну циклічну чи сегментну зонну, отримаємо інформацію про відліки відповідних сегментів. Для сегментної зонної структури циклічного сигналу $\mathbf{D}_z = \{t_{i,j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, $t_i = t_{i,1}, i = \overline{1, Z}$, а для сегментної циклічної структури $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$. Проте на практиці при дослідженні циклічних сигналів, як правило, невідома, не ідентифікована їх сегментна структура, тому необхідно проводити її ідентифікацію. Отримавши інформацію про сегментну структуру, необхідно визначити дискретну ритмічну структуру за формулами (2.25) для сегментної циклічної структури та (2.26) для сегментної зонної структури.

Слід зазначити, що розроблені методи враховують нерівномірний крок дискретизації циклічних сигналів, проте на практиці реальні циклічні сигнали в цифрових системах обробки даних дискретизуються з рівномірним кроком. Тому опишемо метод сегментації циклічних сигналів, у яких крок дискретизації рівномірний і при цьому немає відомостей про їх сегментну структуру, тобто її потрібно ідентифікувати. Спочатку розглянемо випадок для математичної моделі у вигляді детермінованої циклічної числової функції з невідомою сегментною структурою.

3.4. Метод сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу та детермінована циклічна інтервальна функція дискретного аргументу із сегментною структурою

Даний метод описано в роботі [415], для циклічного сигналу математичною моделлю яких є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу з сегментною структурою, у якого крок дискретизації

рівномірний і при цьому немає відомостей про сегментну структуру. Тому потрібна її ідентифікація.

Розглянемо розроблений метод сегментації циклічних сигналів покроково. Щоб забезпечити однаковість результатів сегментації вважаємо, що досліджуваний сигнал пройшов попереднє опрацювання. При цьому була усунена трендова складова та сигнал синхронізований з початком відліку шкали (початок відліку циклу).

1). Оцінювання сегментної структури (попередня сегментація).

Вхідними даними є $f_d(t_k), k = \overline{1, K}, t_k \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$ – реалізація детермінованого циклічного сигналу. Для попередньої сегментації визначається адаптивний рівень за такою формулою:

$$f_{aver} = \frac{Max f_d(t_k) - Min f_d(t_k)}{2} + Min f_d(t_k), t \in \mathbf{W}, \quad (3.25)$$

де $Max f_d(t_k)$ - максимальне значення досліджуваної реалізації циклічного сигналу; $Min f_d(t_k)$ - мінімальне значення досліджуваної реалізації циклічного сигналу.

Визначаються індикаторні функції для сегментів, які будуть знаходитися вище чи нижче адаптивного рівня (3.25):

$$I_{\tilde{\mathbf{W}}_1}(t_k) = \begin{cases} 0, & f_d(t_k) \leq f_{aver} \\ 1, & f_d(t_k) > f_{aver} \end{cases}, \tilde{\mathbf{W}}_1 = \{t_q\}, q = \overline{1, Q}, \quad (3.26)$$

$$I_{\tilde{\mathbf{W}}_2}(t_k) = \begin{cases} 0, & f_d(t_k) \geq f_{aver} \\ 1, & f_d(t_k) < f_{aver} \end{cases}, \tilde{\mathbf{W}}_2 = \{t_r\}, r = \overline{1, R}, \quad (3.27)$$

де $\tilde{\mathbf{W}}_1, \tilde{\mathbf{W}}_2$ - області визначення індикаторних функцій (3.26) та (3. 27); t_q, t_r - дискретні часові відліки для відповідних областей визначення сегментів.

Для областей визначення сегментів $\tilde{\mathbf{W}}_1$ та $\tilde{\mathbf{W}}_2$ справедлива умова

$$\tilde{\mathbf{W}}_1 \cup \tilde{\mathbf{W}}_2 = \mathbf{W}. \quad (3.28)$$

Сформуємо такі функції, які відображають області сегментів, де індикаторні функції набувають значення, що дорівнює одиниці:

$$\tilde{f}_1(t_k) = f_d(t_k) \cdot I_{\tilde{\mathbf{W}}_1}(t_k), t_k \in \mathbf{W}, \quad \tilde{f}_2(t_k) = f_d(t_k) \cdot I_{\tilde{\mathbf{W}}_2}(t_k), t_k \in \mathbf{W}. \quad (3.29)$$

На етапі попередньої сегментації вибираємо перший відлік із реалізацій (3.29) за такими умовами:

$$\text{Якщо } t_q < t_r, \quad q=1, r=1, \text{ то } \tilde{t}_1 = t_q, \quad q=1. \quad (3.30)$$

$$\text{Тоді у випадку } \tilde{t}_s = t_q, \quad s=2, \dots \text{ якщо } f_d(\tilde{t}_1) = \tilde{f}_1(t_q), \quad q = \overline{2, Q}. \quad (3.31)$$

$$\text{Якщо } t_q > t_r, \quad q=1, r=1, \text{ то } \tilde{t}_1 = t_r, \quad r=1. \quad (3.32)$$

$$\text{Тоді у випадку } \tilde{t}_s = t_r, \quad s=2, \dots \text{ якщо } f_d(\tilde{t}_1) = \tilde{f}_2(t_r), \quad r = \overline{2, R}. \quad (3.33)$$

Після проведення цієї процедури отримаємо попереднє розбиття циклічного сигналу. При цьому вихідними даними є $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{\tilde{t}_s, s = \overline{1, S}\}$ – множина відліків моментів часу сегментів (сегментів циклів та сегментів зон). Наступним кроком є оцінювання циклічної структури.

2). Оцінювання циклічної структури (сегментної циклічної структури).

На даному кроці вхідними даними є $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{\tilde{t}_s, s = \overline{1, S}\}$ – множина часових відліків сегментів. Оскільки початок відліку досліджуваної реалізації

синхронізовано з початком відліку першого циклу, то приймаємо \tilde{t}_1 - відлік початку циклу в досліджуваному сигналі, тобто $\hat{t}_1 = \tilde{t}_i = \tilde{t}_s, i, s = 1$ - відлік початку першого циклу.

Наступним кроком є оцінювання відліків циклів за атрибутом згідно з таблицею 3.1. Можливі два варіанти для оцінювання за атрибутом. Для детермінованої циклічної числової функції атрибут – рівність значень, та для циклічної інтервальної функції, для якої значення знаходяться в діапазоні $2 \cdot \Delta$, де Δ - значення діапазону можливих значень, задається на основі отриманих експериментальних статистичних даних виходячи із тих циклічних сигналів, які опрацьовуються в конкретній предметній області.

Таблиця 3.1

Використання атрибутів для уточнення циклічної структури

Атрибут	Аналітичний запис
1. Рівність значень	$p(f_d(t_k)) = f_d(t_k)$
2. Значення знаходяться в діапазоні значень	$p(f_d(t_k)) = f_d(t_k) - \Delta \leq f_d(t_k) \leq f_d(t_k) + \Delta$, тривалість діапазону $2 \cdot \Delta$ можливих значень

На цьому етапі необхідно виконання умов рівності за атрибутом (3.34) і виконання ізоморфізму та бієкції відліків циклів (3.35), тобто

$$\tilde{t}_g = \begin{cases} \tilde{t}_s, \text{ якщо } p(f_d(\hat{t}_1)) = p(f_d(\tilde{t}_s)) \in \mathbf{A}, g = 2, \dots, s = \overline{2, S}, \\ \tilde{t}_s - \text{ відлік не враховується, в іншому випадку,} \end{cases} \quad (3.34)$$

перевіряється фазова структура на сегментах

$$\tilde{t}_i = \begin{cases} \tilde{t}_g, \text{ якщо } \begin{cases} p(f_d(\hat{t}_1 + l)) = p(f_d(\tilde{t}_g + l)), g = \overline{2, G-1}, \tilde{t}_g \leq l \leq \tilde{t}_{g+1}, \\ \hat{t}_1 + l < \tilde{t}_g + l, g = \overline{2, G-1}, l - \text{ відліки в межах сегмента -} \\ \text{циклу,} \\ \tilde{t}_g - \text{ відлік не враховується, в іншому випадку.} \end{cases} \end{cases} \quad (3.35)$$

Вихідними даними цього етапу є $\tilde{\mathbf{D}}_c = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, C}\}$ – множина часових

відліків, які відповідають початкам циклів; \tilde{C} - кількість оцінених циклів на даному етапі, при цьому сегменти зони на циклах не уточнені.

3). Ідентифікація сегментної структури (сегментної циклічної структури чи сегментної зонної структури) та уточнення відліків сегментної зонної структури.

На етапі уточнення сегментної зонної, а відповідно і циклічної структури вхідними даними є $\tilde{\mathbf{D}}_c = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, \tilde{C}}\}$ та $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{\tilde{t}_s, s = \overline{1, S}\}$.

Даний етап розбивається на два під етапи. Формується множина відліків часу $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_j, j = \overline{1, C}, j \in \mathbf{Z}\}$, які знаходяться між часовими відліками меж циклів (ця множина буде уточнюватися).

3.1). Ідентифікація сегментної структури.

При ідентифікації сегментної циклічної чи сегментної зонної структур перевіряються дві умови: якщо для отриманих відліків та відповідних їм значень виконується рівність $p(f_d(\tilde{t}_1)) = p(f_d(\tilde{t}_2)) = \dots = p(f_d(\tilde{t}_i)) = \dots = p(f_d(\tilde{t}_{\tilde{C}})), i = \overline{1, \tilde{C}}$, тоді $\hat{\mathbf{D}}_c = \tilde{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i = \tilde{t}_i, i = \overline{1, C = \tilde{C}}\}$, отже ідентифікована сегментна циклічна структура – $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$, у такому випадку переходимо до аналізу ритму пункт 4) цього підрозділу. Якщо виконується рівність $p(f_d(\tilde{t}_1)) = p(f_d(\tilde{t}_3)) = p(f_d(\tilde{t}_5)) = \dots = p(f_d(\tilde{t}_i)) = \dots = p(f_d(\tilde{t}_{\tilde{C}})), i = \overline{1, \tilde{C}}$, тоді $p(f_d(\tilde{t}_1)), p(f_d(\tilde{t}_3)), p(f_d(\tilde{t}_5))$ ідентифікуються як відліки сегментів-циклів, а відповідно $p(f_d(\tilde{t}_2)), p(f_d(\tilde{t}_4))$ – як відліки сегментів-зон, що є розв'язком завдання ідентифікації сегментної зонної структури. Далі оцінюється сегментна зонна структура. Врахувавши постановку завдання сегментації (2.40), (2.41), перевіряється умова рівності за атрибутом (3.36), і виконання умов ізоморфізму відліків зон (3.37).

Приймаємо $\tilde{t}_j = \tilde{t}_i, i, j = 1$ як відлік початку першої зони в першому циклі.

$$\tilde{t}_j^g = \begin{cases} \tilde{t}_j, & \text{якщо } p(f_d(\hat{t}_1)) = p(f_d(\tilde{t}_s)) \in \mathbf{A}, g = 2, \dots, s = \overline{2, S}, j = 2, \dots \\ \tilde{t}_j & \text{– відлік не враховується, в іншому випадку,} \end{cases} \quad (3.36)$$

перевіряється фазова структура на сегментах

$$\tilde{t}_i = \begin{cases} \tilde{t}_j, \text{ якщо } \begin{cases} p(f(\hat{t}_1 + l)) = p(f(\tilde{t}_g + l)), g = \overline{2, G-1}, \tilde{t}_g \leq l \leq \tilde{t}_{g+1}, i = 1 \dots \\ \hat{t}_1 + l < \tilde{t}_g + l, g = \overline{2, G-1}, l - \text{відліки в межах сегмента} - \\ \text{зони,} \\ \tilde{t}_g - \text{відлік не враховується, в іншому випадку.} \end{cases} \end{cases} \quad (3.37)$$

У сегментній структурі постулюється, що кількість відліків сегментів-зон на кожному циклі однакова, тому і кількість зон на циклах теж має бути однакова. Враховуючи це для множини $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, \tilde{Z} + 1}\}$, яка включає лише відліки сегментів-зон, де \tilde{Z} - кількість відліків зон, які будуть уточнюватися.

Справедливо наступне: якщо кількість уточнених відліків зон на кожному циклі однакова, то кількість зон на циклах однакова і дорівнює $Z_i = Z$, тоді $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, C}, j = Z_i = Z\}$, де Z - кількість зон, для яких виконалася рівність за атрибутом між відліками меж циклів; Z_i - кількість зон на i -му циклі.

Об'єднуємо множину відліків циклів $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$ і отриману множину відліків сегментів зон $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, C}, j = Z_i = Z\}$. Отримуємо множину відліків $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, яка враховує як відліки циклів, так і відліки зон.

$$\hat{\mathbf{D}}_c \cup \tilde{\mathbf{D}}_z = \hat{\mathbf{D}}_z \quad (3.38)$$

Переходимо до пункту 4) цього підрозділу.

Якщо кількість відліків зон на кожному циклі не однакова (це може бути пов'язано із вибором частоти дискретизації досліджуваного сигналу), як наслідок нерівності значень за атрибутом відліків меж сегментів-зон, тоді необхідно уточнити ці відліки, як описано у пункті 3.2) цього підрозділу.

3.2). Уточнення відліків сегментів-зон.

На даному етапі вхідними даними є $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, \tilde{Z}}\}$ та відліки, що

уточнюються \tilde{t}_s, \tilde{t}_j .

При уточненні відліків необхідно задати діапазон уточнення, який дорівнює $2 \cdot e$, де e - кількість відліків для уточнення. Дана величина задається на основі отримання експериментальних статистичних даних виходячи із тих циклічних сигналів, які опрацьовуються в конкретній предметній області.

Таблиця 3.2

Уточнення відліків сегментів зон із використанням метрики близькості значень відліків цих сегментів

Метрика близькості (абсолютна)	Метрика близькості (Евклідова)
\tilde{t}_s - відлік, що уточнюється, t_e - відлік для уточнення, $\min \rho = (f_d(\tilde{t}_s) - f_d(t_e)) + (\tilde{t}_s - t_e) $	\tilde{t}_s - відлік, що уточнюється, t_e - відлік для уточнення, $\min \rho = \sqrt{(f_d(\tilde{t}_s) - f_d(t_e))^2 + (\tilde{t}_s - t_e)^2}$

Умови вибору відліків для уточнення:

Якщо відлік, який уточнюється, знаходиться в середині реалізації досліджуваного сигналу

$$t_e = \begin{cases} t_{s-e}, & s \geq 1+e, \\ t_{s+e}, & s \leq S-e. \end{cases} \quad (3.39)$$

Якщо відлік, який уточнюється, знаходиться в кінці чи на початку реалізації досліджуваного сигналу

$$t_e = \begin{cases} t_{s-e}, & s = S, \\ t_{s+e}, & s = 1. \end{cases} \quad (3.40)$$

Після уточнення відліків зон об'єднуємо множини відліків циклів $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$ й отримані уточнені відліки зон $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_j, j = \overline{1, C}, j = Z_i = Z\}$.

Отримуємо $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ – множина відліків, яка враховує як відліки циклів так і відліки зон.

Вихідними даними на цьому етапі є $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, де Z – кількість оцінених зон або $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$, де C – кількість оцінених циклів.

4). Аналіз ритму.

Ритм у циклічних сигналах може бути постійним чи змінним. Наприклад, коли ми маємо справу з постійним (стабільним) ритмом, то величини часових (просторових) відстаней, проміжків між однофазними значеннями є постійними величинами, а тривалості циклів можна розглядати як тривалості періоду, як це у випадку періодичних сигналів (циклічних сигналів). У випадку коли, відстані між однофазними значеннями в різних циклах відрізняються, тобто будуть різні за величиною тривалості циклів, то маємо справу з сигналом, який характеризується змінним ритмом.

Вхідними даними цього етапу є сегментна зонна структура $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ або сегментна циклічна структура $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$.

Ідентифікувавши відповідну сегментну структуру, переходимо до аналізу (оцінювання) ритму, який може проводитись або за пунктом 4.1 або за пунктом 4.2 цього підрозділу.

4.1). Якщо $t_{i+1} - t_i = const = T - \text{період}$ або $t_{i+1} - t_i = const$, $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$ – постійний ритм, тобто $f_d(t_k) = f_d(t_k + n \cdot T)$.

Проводимо оцінювання значення періоду за формулою

$$\hat{T} = t_{i+1} - t_i \text{ або } \hat{T} = t_{i+1} - t_i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}. \quad (3.41)$$

Можна подати дискретну ритмічну структуру, яка визначена через оцінений період:

- для відліків сегментів-циклів аналогічно до (2.27)

$$\hat{T}(t_i, n) = n \cdot \hat{T}, t_i \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, n \in \mathbf{Z};$$

- для відліків сегментів-зон аналогічно до (2.27),

$$\hat{T}(t_{i_j}, n) = n \cdot \hat{T}, t_{i_j} \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, n \in \mathbf{Z}.$$

4.2. Якщо $t_{i+1} - t_i \neq const$ або $t_{j+1} - t_j \neq const, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$ – змінний ритм, тобто $f_d(t_k) \neq f_d(t_k + n \cdot T)$, отже $f_d(t_k) = f_d(t_k + T(t_k, n))$.

Проводимо оцінювання дискретної ритмічної структури:

- для відліків сегментів-зон (2.26), $\hat{T}(t_i, n) = t_{i+n} - t_i, t_i \in \mathbf{W},$

$i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, n \in \mathbf{Z};$

- для відліків сегментів-циклів (2.25), $\hat{T}(t_i, n) = t_{i+n} - t_i, t_i \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, n \in \mathbf{Z}.$

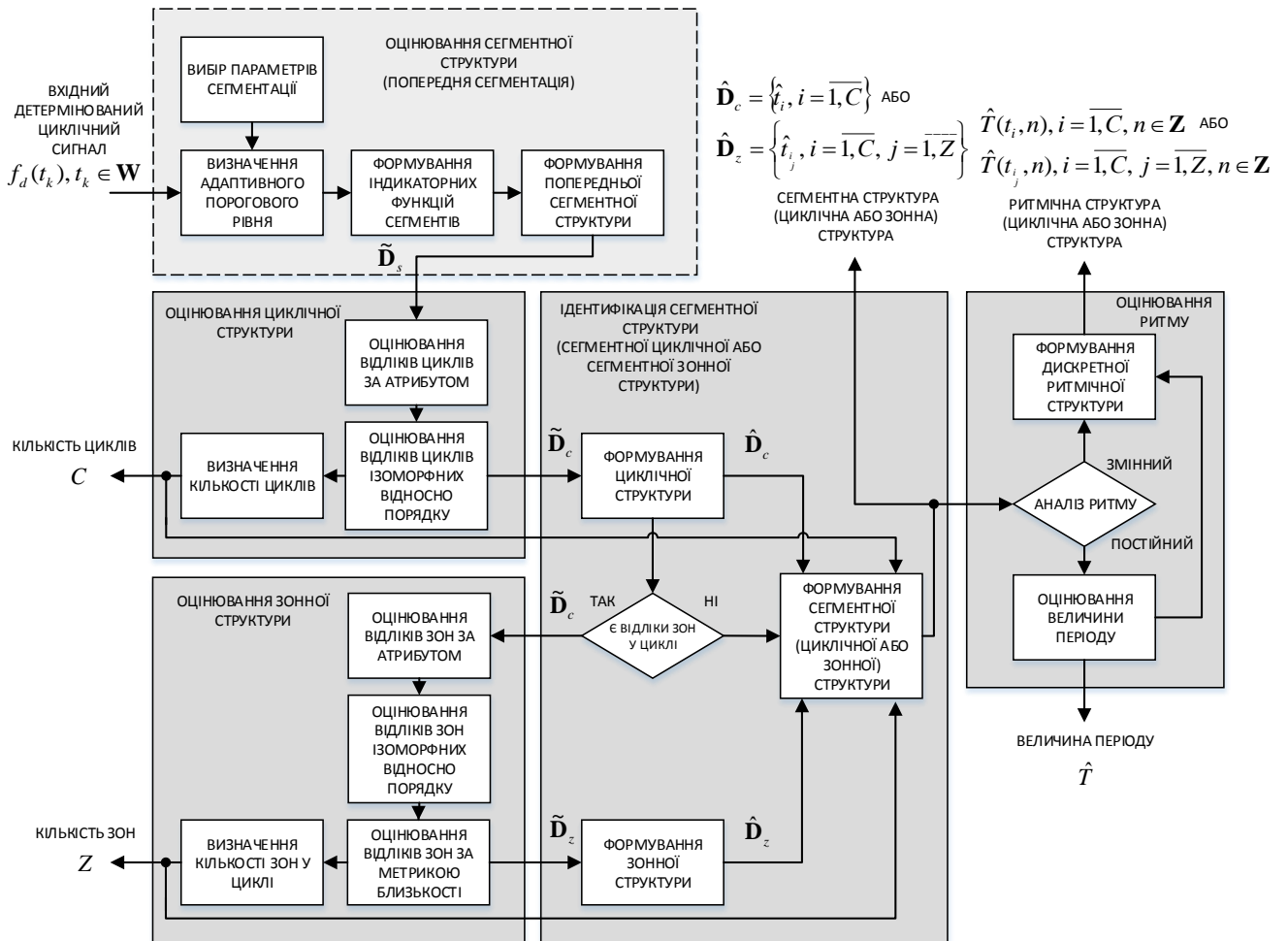


Рис. 3.4. Структурна схема алгоритмічного забезпечення методу сегментації детермінованих циклічних сигналів

Враховуючи описаний вище алгоритм, на рисунку 3.4 наведено структурну схему алгоритмічного забезпечення розробленого методу сегментації. Даний метод реалізовано у вигляді програмного забезпечення [298] мовою програмування Delphi, фрагмент програми наведено в додатку Р.

Розроблений метод дозволяє отримувати інформацію про сегментну структуру: $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ або $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$, ідентифікувавши її, та оцінити ритм (ритмічну структуру), у випадку стабільного ритму визначити значення періоду, а у випадку змінного – оцінити дискретну ритмічну структуру.

3.4.1. Результати застосування методу сегментації циклічних сигналів, моделями якого є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу та детермінована циклічна інтервальна функція дискретного аргументу із сегментною структурою, оцінювання точності методу їх сегментації. З метою оцінювання точності розробленого методу сегментації були змодельовані тестові реалізації циклічних сигналів, моделями яких є детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу та детермінована циклічна інтервальна числова функція дискретного аргументу із сегментною структурою. Окремі результати наведено у роботах [176, 179, 415].

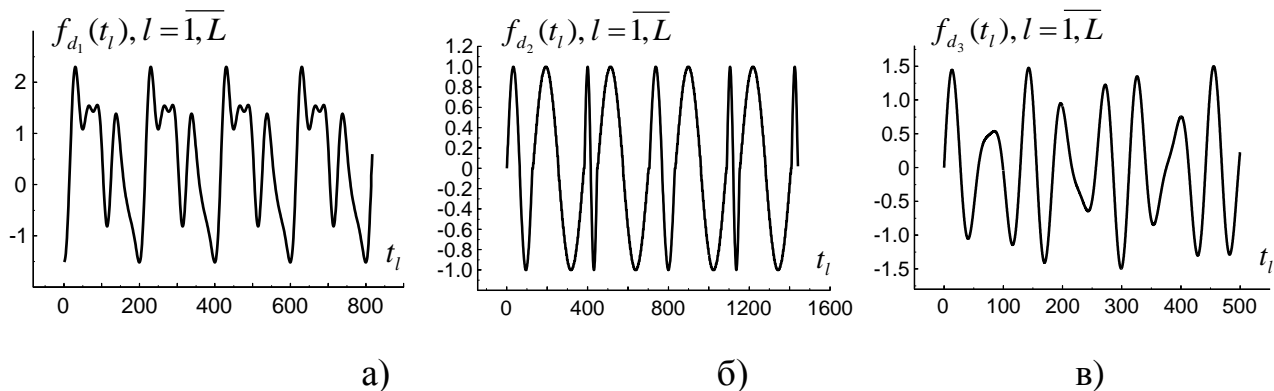


Рис. 3.5. Змодельовані тестові циклічні сигнали для оцінювання точності методу сегментації: а) періодичний циклічний сигнал (атрибут – рівність значень); б) циклічний сигнал (атрибут – рівність значень); в) циклічний сигнал (атрибут – значення в діапазоні $2 \cdot \Delta$)

У змодельовані реалізації закладалась інформація про ритмічну структуру, яка враховує та відображає через її відліки інформацію про сегментну структуру (сегментну циклічну чи сегментну зонну структури). При цьому у досліджуваних циклічних сигналах їх ритмічні структури окремо враховують як змінний, так і постійний (стабільний) ритм. Крім цього, у змодельованих циклічних сигналах були враховані різні атрибути. Окремі приклади результатів змодельованих тестових реалізацій циклічних сигналів наведено на рисунку 3.5, реалізації циклічних сигналів наведено в умовних одиницях. На рисунку 3.6 наведено ритмічні структури змодельованих тестових реалізацій циклічних сигналів.

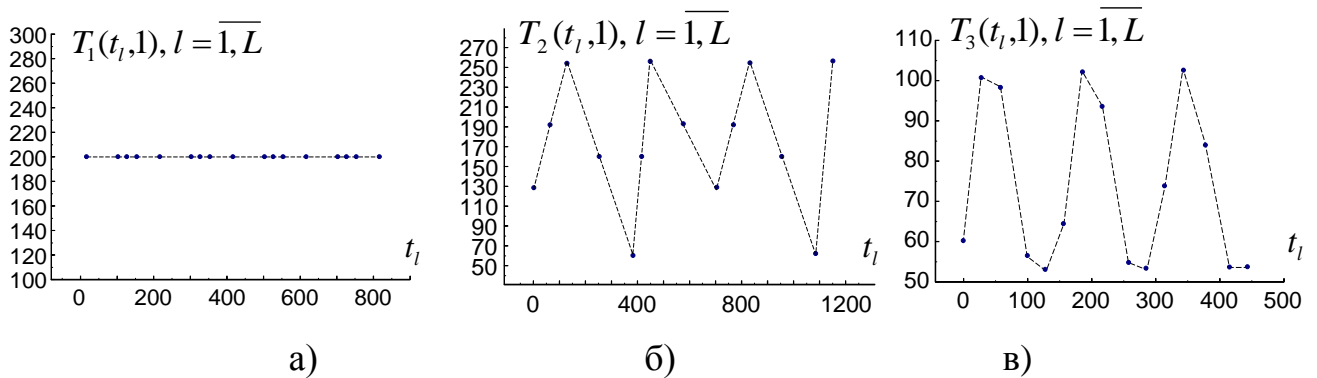


Рис. 3.6. Дискретні ритмічні структури змодельованих тестових циклічних сигналів: а) для періодичного циклічного сигналу (період $T = 200$, атрибут – рівність значень); б) для циклічного сигналу (атрибут – рівність значень); в) для циклічного сигналу (атрибут - значення в діапазоні $2 \cdot \Delta$), пунктирна лінія – неперервна кусково-лінійна функція ритму

Застосувавши розроблений метод сегментації до змодельованих тестових реалізацій, отримали сегментні структури та оцінили їх ритмічні структури, результати наведено на рисунку 3.7.

Оскільки частинним випадком циклічного сигналу зі стабільним ритмом може бути сигнал, моделю якого є періодична детермінована функція, то даний метод може бути використаний як для сегментації, так і для оцінювання значення періоду детермінованої періодичної функції.

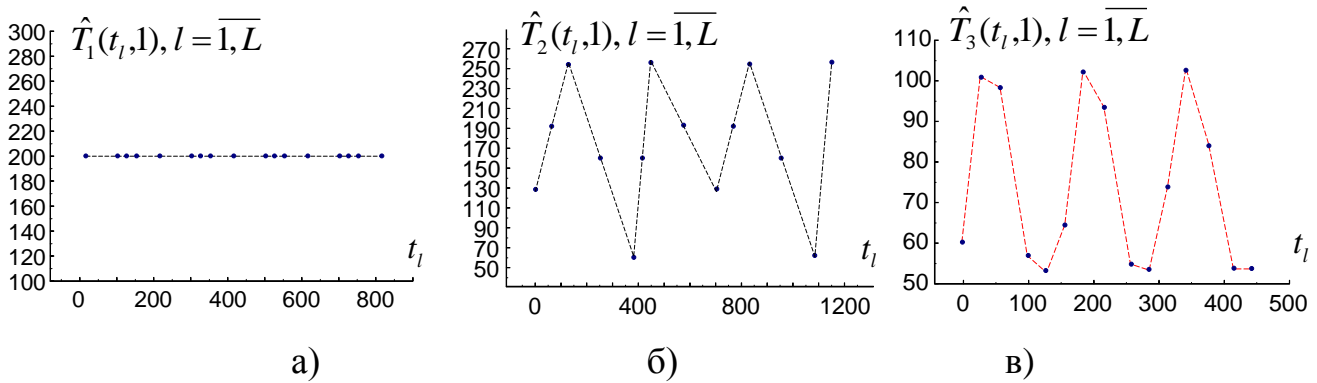


Рис. 3.7. Визначені дискретні ритмічні структури змодельованих тестових циклічних сигналів методом їх сегментації: а) для періодичного циклічного сигналу (атрибут – рівність значень), визначений період повторення (період $T = 200$); б) для циклічного сигналу (атрибут – рівність значень); в) для циклічного сигналу (атрибут – значення в діапазоні $2 \cdot \Delta$), пунктирна лінія – неперервна функція ритму

При сегментації циклічного сигналу, математичною моделлю якого є детермінована періодична функція, якщо це відомо, немає необхідності у визначенні всієї сегментної структури, оскільки іноді достатньо визначити період одним із відомих методів [276] і ми зможемо визначити сегментну структуру (сегментну циклічну структуру) для циклічних періодичних сигналів, врахувавши її через отримане значення періоду.

Для кількісного оцінювання точності методів сегментації визначалися середньоквадратичні абсолютна та відносна похибки за формулами (3.42) та (3.43).

Абсолютна похибка сегментації визначалася за формулою

$$\Delta(t_k) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (t_l - \hat{t}_l)^2}, \quad k = \overline{1, L}. \quad (3.42)$$

Відносна похибка сегментації визначались за формулою

$$\delta(t_k) = \frac{\Delta(t_k)}{\sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{t}_l^2}} \cdot 100\%, \quad k = \overline{1, L}, \quad (3.43)$$

де t_l - елемент змодельованої дискретної ритмічної структури (використаної для моделювання циклічного сигналу); \hat{t}_l - елемент визначеної дискретної ритмічної структури методом сегментації; L - кількість відліків дискретної ритмічної структури, $l = \overline{1, L}$; t_k - відлік для абсолютної та відносної похибок, $k = \overline{1, L}$.

На рисунках 3.8 та 3.9 наведено результати визначення абсолютних та відносних похибок сегментації.

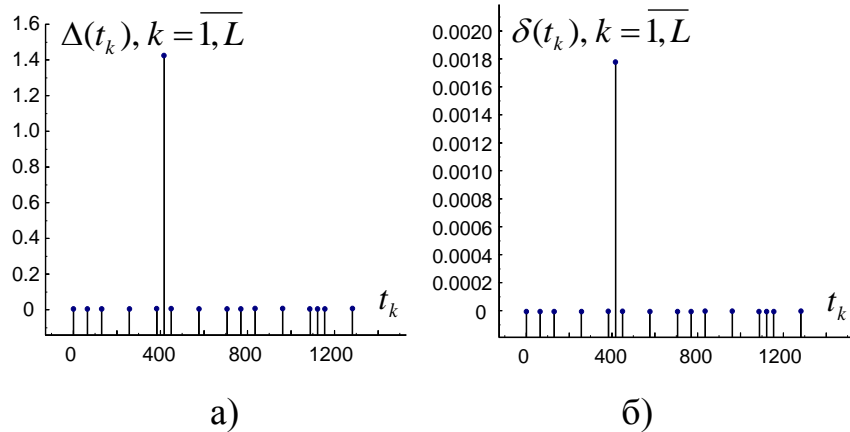


Рис. 3.8. Середньоквадратичні абсолютна та відносна похибки визначених елементів дискретної ритмічної структури для циклічного сигналу (атрибут – рівність значень): а) абсолютна похибка; б) відносна похибка

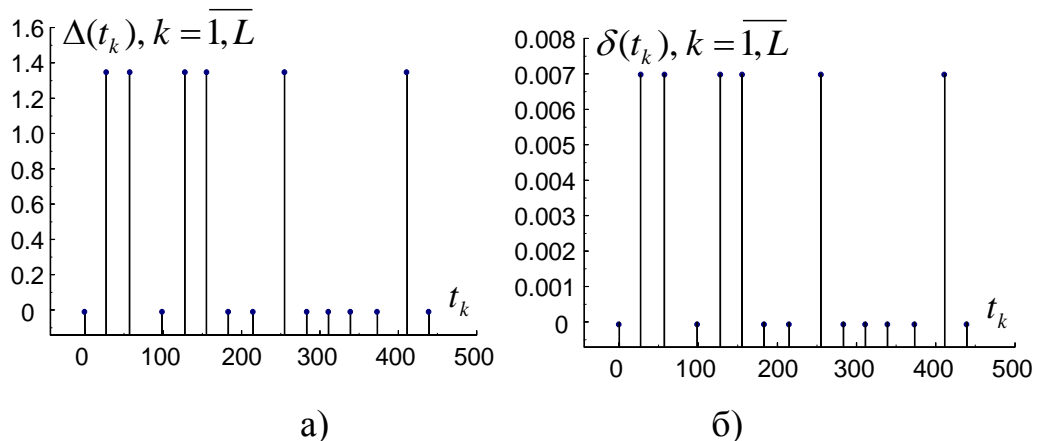


Рис. 3.9. Середньоквадратичні абсолютна та відносна похибки визначених елементів дискретної ритмічної структури для циклічного сигналу (атрибут – значення в діапазоні $2 \cdot \Delta$): а) абсолютна похибка; б) відносна похибка

З отриманих результатів похибок виявлено, що у випадку сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція (атрибут – рівність значень, ритм – змінний) похибка неточності визначення межі сегменту складає 0,18% (див. рис. 3.8, б). При сегментації циклічного сигналу у якого ритм – постійний, а атрибут – рівність значень (періодичний сигнал) розроблений метод не дає похибок визначення меж сегментів. У випадку сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є детермінована циклічна інтервальна функція (атрибут – значення в межах діапазону, ритм – змінний) похибка неточності визначення межі сегменту складає 0,7% (див. рис. 3.9, б).

В таблиці 3.3 зведено отримані максимальні значення середньоквадратичних похибок для наведених досліджуваних змодельованих циклічних сигналів.

Таблиця 3.3

Похибки визначених відліків дискретних ритмічних структур циклічних сигналів

Сегментація циклічних сигналів	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %
1	2	3
Періодичні сигнали (атрибут – рівність значень)	0	0
Циклічні сигнали (атрибут – рівність значень)	1,45	0,18
Циклічні сигнали (атрибут – значення в діапазоні)	1,39	0,7

З отриманих даних (див. табл. 3.3) випливає, що точність застосування розробленого методу сегментації детермінованого циклічного сигналу дискретного аргументу із сегментною структурою для випадку стабільного ритму є високою. У випадку сегментації циклічного сигналу, в якого значення знаходяться в деякому діапазоні (діапазоні атрибутів), точність менша, проте відносна середньоквадратична похибка не перевищує 5% для досліджуваних тестових циклічних сигналів.

Далі розглянемо метод сегментації циклічних сигналів, моделями яких є циклічні випадкові процеси.

3.5. Метод сегментації циклічного сигналу, моделлю якого є циклічний випадковий процес дискретного аргументу з сегментною структурою

Даний метод описано в роботі [426] для циклічних сигналів, які можуть бути описані математичною моделлю у вигляді циклічного випадкового процесу дискретного аргументу із сегментною структурою, у якого крок дискретизації рівномірний і при цьому немає відомостей про сегментну структуру, тому потрібно провести її ідентифікацію.

При побудові методів сегментації для циклічних випадкових процесів важливо знати інформацію про їх імовірнісні характеристики, зокрема мати відомості про особливості імовірнісних характеристик у ті моменти часу, які відповідають межах його відповідних сегментів. У випадку, коли циклічний випадковий процес є кусково-стаціонарним випадковим процесом, задача його сегментації може бути розв'язана шляхом використання відомих методів пошуку розладки кусково-стаціонарного випадкового процесу [31, 32, 34-37, 170, 172, 185, 428].

Для сегментації на попередньому етапі будемо використовувати методи із залученням теорії розладки випадкових процесів, певним чином адаптувавши їх для цієї задачі. При цьому методи пошуку розладки випадкових процесів необхідно вибирати саме ті які реагують на різку зміну ймовірнісних характеристик випадкових процесів, наприклад, математичного сподівання чи дисперсії.

Розглянемо розроблений метод сегментації для циклічних сигналів із сегментною структурою, математичною моделлю яких є циклічний випадковий процес, покроково. Щоб забезпечити однаковість результатів сегментації вважаємо, що досліджуваний сигнал пройшов попереднє опрацювання, при якому була усунена трендова складова, та сигнал синхронізований з початком відліку

шкали (початок відліку циклу).

1). Оцінювання сегментної структури (попередня сегментація).

Вхідними даними є $\xi_{\omega}(t_k), t_k \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$ – дискретна реалізація циклічного стохастичного сигналу. Для попередньої сегментації визначається статистика [31, 32, 34–37, 185]

$$S(t_m) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_{\omega}(t_k) - \frac{1}{K-m} \sum_{k=m+1}^K \xi_{\omega}(t_k), \quad m = \overline{1, K-1}, \quad k = \overline{1, K}, \quad t_k \in \mathbf{W}, \quad (3.44)$$

де $S(t_m)$ - значення статистики в дискретний m -й момент часу, яка є чутливою до змін математичного сподівання випадкового процесу; K - кількість відліків зареєстрованої реалізації; $\xi_{\omega}(t_k)$ - значення дискретизованої реалізації в k -й момент часу.

Після обчислення статистики проводиться пошук її локальних екстремумів одним із відомих методів [5, 17, 49, 310, 311]. Отримується множина моментів часу, які відповідають екстремумам статистики,

$$\mathbf{S}_u = \{\tilde{t}_u, u = \overline{1, U}\}, \quad (3.45)$$

Множина моментів часу, які відповідають максимумам статистики,

$$\mathbf{S}_{\max} = \{\hat{t}_q, q = \overline{1, Q}\}. \quad (3.46)$$

Множина моментів часу, які відповідають мінімумам статистики,

$$\mathbf{S}_{\min} = \{\check{t}_r, r = \overline{1, R}\}. \quad (3.47)$$

Для множин (3.46) та (3.47) справедлива рівність

$$\mathbf{S}_u = \mathbf{S}_{\max} \cup \mathbf{S}_{\min}, U = Q + R. \quad (3.48)$$

Застосована статистика (3.44) реагує на різкі зміни математичного сподівання і добре зарекомендувала себе при визначенні моментів часу розладок стохастичного сигналу, моделю якого є кусково-стаціонарний випадковий процес (ЕКС, електроенцефалограма та інші). Після отримання множин (3.46) та (3.47) визначаємо, яку із отриманих множин будемо використовувати при подальших кроках сегментації.

На етапі попередньої сегментації вибираємо перший відлік за такими умовами:

$$\text{Якщо } \hat{t}_q < \check{t}_r, \quad q = 1, r = 1, \text{ то } \tilde{t}_1 = t_k, \quad k = 1. \quad (3.49)$$

$$\text{Тоді } \tilde{t}_s = \hat{t}_q, \quad s = 2, \dots, q = 1, \dots, \text{ використовуємо множину } \mathbf{S}_{\max}. \quad (3.50)$$

$$\text{Якщо } \hat{t}_q > \check{t}_r, \quad q = 1, r = 1, \text{ то } \tilde{t}_1 = t_k, \quad k = 1. \quad (3.51)$$

$$\text{Тоді } \tilde{t}_s = \check{t}_r, \quad s = 2, \dots, r = 1, \dots, \text{ використовуємо множину } \mathbf{S}_{\min}. \quad (3.52)$$

Після цієї процедури отримаємо попереднє розбиття циклічного сигналу, при цьому вихідними даними є $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{\tilde{t}_s, s = \overline{1, S}\}$ – множина відліків моментів часу сегментів (сегментів циклів та сегментів зон). Наступним кроком є оцінювання циклічної структури.

2). Оцінювання циклічної структури (сегментної циклічної структури).

На даному кроці вхідними даними є $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{\tilde{t}_s, s = \overline{1, S}\}$ – множина часових відліків сегментів. Оскільки початок відліку досліджуваного сигналу синхронізовано з початком відліку першого циклу, то приймаємо \tilde{t}_1 – як відлік

початку циклу в досліджуваному сигналі, тобто $\hat{t}_1 = \tilde{t}_i = \tilde{t}_s, i, s = 1$ – відлік початку першого циклу.

Наступним кроком оцінюємо відліки циклів за атрибутами згідно з таблицею 3.4. Оскільки відомо, що для досліджуваних циклічних сигналів їх значення мають нормальний закон розподілу [90, 177, 185, 292, 213]. Тому діапазон пошуку однофазних значень будемо задавати $\Delta = 3 \cdot \sqrt{d}$, де d – величина розкиду значень для досліджуваного сигналу. Дана величина задається на основі отримання експериментальних статистичних даних виходячи із тих циклічних сигналів які опрацьовуються в конкретній предметній області. При цьому діапазон значень знаходиться в межах інтервалу довіри і впливає на точність результатів сегментації. Число три в даній формулі вибране для побудови меж інтервалу за аналогією до інтервалу довіри з урахуванням ймовірності ($p = 0,997$) [143, 321].

Таблиця 3.4

Використання атрибутів для уточнення циклічної структури

Атрибути	Аналітичний запис
Значення знаходяться в діапазоні значень	$p(\xi_\omega(t_s)) = \xi_\omega(\hat{t}_1) - \Delta \leq \xi_\omega(t_s) \leq \xi_\omega(\hat{t}_1) + \Delta$, тривалість діапазону $2 \cdot \Delta$ можливих значень

На цьому етапі необхідно виконання умов рівності за атрибутами (3.53) і виконання ізоморфізму відліків циклів (3.54), тобто

$$\tilde{t}_g = \begin{cases} \tilde{t}_s, \text{ якщо } p(\xi_\omega(\hat{t}_1)) = p(\xi_\omega(\tilde{t}_s)) \in \mathbf{A}, g = 2, \dots, s = \overline{2, S}, \\ \tilde{t}_s - \text{відлік не враховується, в іншому випадку,} \end{cases} \quad (3.53)$$

перевіряється фазова структура на сегментах,

$$\tilde{t}_i = \begin{cases} \tilde{t}_g, \text{ якщо } \begin{cases} p(\xi_\omega(\hat{t}_1 + l)) = p(\xi_\omega(\tilde{t}_g + l)), g = \overline{2, G-1}, \tilde{t}_g \leq l \leq \tilde{t}_{g+1}, \\ \hat{t}_1 + l < \tilde{t}_g + l, g = \overline{2, G-1}, l - \text{відліки в межах сегмента} - \\ \text{циклу,} \\ \tilde{t}_g - \text{відлік не враховується, в іншому випадку.} \end{cases} \end{cases} \quad (3.54)$$

Вихідними даними цього етапу є $\tilde{\mathbf{D}}_c = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, \tilde{C}}\}$ – множина часових відліків, які відповідають початкам циклів.

2.1). Уточнення відліків сегментів-циклів.

На даному етапі вхідними даними є $\tilde{\mathbf{D}}_c = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, \tilde{C}}\}$ та відліки, що уточнюються \tilde{t}_s, \tilde{t}_i .

При уточненні відліків необхідно врахувати діапазон уточнення, який задається в межах $\tilde{t}_i < t_e < \tilde{t}_{i+1}$, де t_e – відлік для уточнення, де e – кількість відліків для уточнення.

Таблиця 3.5

Уточнення відліків сегментів циклів із використанням метрики близькості значень відліків цих сегментів

Метрика близькості (абсолютна)	Метрика близькості (Евклідова)
\tilde{t}_s - відлік, що уточнюється, t_e - відлік для уточнення, $\min \rho = (\xi_\omega(\tilde{t}_s) - \xi_\omega(t_e)) + (\tilde{t}_s - t_e) $	\tilde{t}_s - відлік, що уточнюється, t_e - відлік для уточнення, $\min \rho = \sqrt{(\xi_\omega(\tilde{t}_s) - \xi_\omega(t_e))^2 + (\tilde{t}_s - t_e)^2}$

Умови вибору відліків для уточнення за формулами (3.39) та (3.40).

Вихідними даними цього етапу є $\tilde{\mathbf{D}}_c = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, \tilde{C}}\}$ – множина часових відліків, які відповідають уточненим початкам циклів; \tilde{C} - кількість оцінених циклів на даному етапі, при цьому сегменти зони на циклах не уточнені.

3). Ідентифікація сегментної структури (сегментної циклічної структури чи сегментної зонної структури) та уточнення відліків сегментної зонної структури.

На етапі уточнення сегментної зонної, а відповідно й циклічної структури вхідними даними є $\tilde{\mathbf{D}}_c = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, \tilde{C}}\}$ та $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{\tilde{t}_s, s = \overline{1, S}\}$.

Даний етап розбивається на два підетапи. Формується множина відліків часу $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_j, i = \overline{1, \tilde{C}}, j \in \mathbf{Z}\}$, які знаходяться між часовими відліками меж циклів

(ця множина буде уточнюватися).

3.1). Ідентифікація сегментної структури.

При ідентифікації сегментної циклічної чи сегментної зонної структури перевіряються дві умови: якщо для отриманих відліків та відповідних їм значень виконується рівність $p(\xi_\omega(\tilde{t}_1)) = p(\xi_\omega(\tilde{t}_2)) = \dots = p(\xi_\omega(\tilde{t}_i)) = \dots = p(\xi_\omega(\tilde{t}_{\overline{C}})), i = 1, \overline{C}$, тоді $\hat{\mathbf{D}}_c = \tilde{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i = \tilde{t}_i, i = 1, \overline{C} = \overline{C}\}$. Отже ідентифікована сегментна циклічна структура – $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = 1, \overline{C}\}$, у такому випадку переходимо до аналізу ритму пункт 4). Якщо виконується рівність $p(\xi_\omega(\tilde{t}_1)) = p(\xi_\omega(\tilde{t}_3)) = p(\xi_\omega(\tilde{t}_5)) = \dots = p(\xi_\omega(\tilde{t}_i)) = \dots, \dots = p(\xi_\omega(\tilde{t}_{\overline{C}})), i = 1, \overline{C}$, тоді $p(\xi_\omega(\tilde{t}_1)), p(\xi_\omega(\tilde{t}_3)), p(\xi_\omega(\tilde{t}_5))$ ідентифікуються як відліки сегментів-циклів, а відповідно $p(\xi_\omega(\tilde{t}_2)), p(\xi_\omega(\tilde{t}_4))$ – як відліки сегментів-зон, що є розв'язком завдання ідентифікації сегментної зонної структури. Далі оцінюється сегментна зонна структура. Врахувавши постановку завдання сегментації (2.40), (2.41), перевіряється умова рівності за атрибутом (3.55), і виконання умови днакової фазової структури на сегментах (3.56).

Приймаємо $\tilde{t}_i = \tilde{t}_j, i, j = 1$ – як відлік початку першої зони в першому циклі.

$$\tilde{t}_j^g = \begin{cases} \tilde{t}_k^j, \text{ якщо } p(\xi_\omega(\hat{t}_1)) = p(\xi_\omega(\tilde{t}_k)) \in \mathbf{A}, g = 2, \dots, k = \overline{2}, \overline{K}, j = 2, \dots \\ \tilde{t}_j^g - \text{ відлік не враховується, в іншому випадку,} \end{cases} \quad (3.55)$$

перевіряється фазова структура на сегментах,

$$\tilde{t}_j^g = \begin{cases} \tilde{t}_j^g, \text{ якщо } \begin{cases} p(\xi_\omega(\hat{t}_1 + l)) = p(\xi_\omega(\tilde{t}_g + l)), g = \overline{2}, \overline{G-1}, \tilde{t}_g \leq l \leq \tilde{t}_{g+1}, \\ \hat{t}_1 + l < \tilde{t}_g + l, g = \overline{2}, \overline{G-1}, l - \text{ відліки в межах сегмента -} \\ \text{зони,} \\ \tilde{t}_j^g - \text{ відлік не враховується, в іншому випадку.} \end{cases} \end{cases} \quad (3.56)$$

В сегментній структурі постулюється, що кількість відліків сегментів зон на кожному циклі однакова, отже і кількість зон на циклах теж має бути однакова.

Враховуючи це для множини $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, \tilde{Z} + 1}\}$, яка включає лише відліки сегментів-зон, де \tilde{Z} - кількість відліків зон, які будуть уточнюватися.

Справедливо наступне: якщо кількість уточнених відліків зон на кожному циклі однакова, то кількість зон на циклах однакова й дорівнює $Z_i = Z$, тоді $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_j, i = \overline{1, C}, j = Z_i = Z\}$, де Z - кількість зон, для яких виконалася рівність за атрибутом між відліками меж циклів; Z_i - кількість зон на i -му циклі.

Об'єднуємо множину відліків циклів $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$ й отриману множину відліків сегментів зон $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_j, i = \overline{1, C}, j = Z_i = Z\}$. Отримуємо множину відліків $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, яка враховує як відліки циклів, так і відліки зон (3.38).

Переходимо до пункту 4) цього підрозділу.

Якщо кількість відліків зон на кожному циклі не однакова (це може бути пов'язано із вибором частоти дискретизації досліджуваного сигналу), як наслідок нерівності значень за атрибутом, тоді необхідно уточнити відліки зон згідно з пунктом 3.2) цього підрозділу.

3.2). Уточнення відліків сегментів-зон.

На даному етапі вхідними даними є $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, \tilde{Z}}\}$ та відліки, що уточнюються, \tilde{t}_s, \tilde{t}_j .

При уточненні відліків необхідно задати діапазон уточнення, який дорівнює $2 \cdot e$, де e - кількість відліків для уточнення. При уточненні відліків використовуємо метрики, наведені в таблиці 3.6, та формули (3.39) та (3.40), але для випадку відліків, які враховують сегментну циклічну та сегментну зонну структури.

Після уточнення відліків зон об'єднуємо множини відліків циклів $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$ й отримані уточнені відліки зон $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_j, i = \overline{1, C}, j = Z_i = Z\}$. Отримуємо $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ - множину відліків, яка враховує як відліки

циклів, так і відліки зон.

Вихідними даними на цьому етапі є $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, де Z - кількість оцінених зон, або $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$, де C - кількість оцінених циклів.

4). Аналіз ритму.

Ритм у циклічних сигналах може бути постійним чи змінним. Наприклад, коли маємо справу з постійним (стабільним) ритмом, то величини часових (просторових) відстаней, проміжків між однофазними значеннями є постійними величинами, а тривалості циклів можна розглядати як тривалості періоду, як це у випадку періодичних детермінованих сигналів (циклічних сигналів). У випадку, коли відстані між однофазними значеннями в різних циклах відрізняються, тобто будуть різні за величиною тривалості циклів, то маємо справу із сигналом, який характеризується змінним ритмом.

Вхідними даними цього етапу є сегментна зонна структура $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ або сегментна циклічна структура $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$.

Ідентифікувавши сегментну структуру, переходимо до аналізу (оцінювання) ритму, який може проводитись або за пунктом 4.1) або за пунктом 4.2) цього підрозділу.

4.1). Якщо $t_{i+1} - t_i = const = T - \text{період}$ або $t_{j+1} - t_j = const$, $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$ - постійний ритм, тобто $\xi_\omega(t_k) = \xi_\omega(t_k + n \cdot T)$.

Проводимо оцінювання значення періоду за формулою (3.41). Можна подати дискретну ритмічну структуру, яка визначена через оцінений період, скориставшись формулою (2.27) для випадку відліків сегментів-зон або відліків сегментів-циклів.

4.2). Якщо $t_{i+1} - t_i \neq const$ або $t_{j+1} - t_j \neq const$, $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$ - змінний ритм, тобто $\xi_\omega(t_k) \neq \xi_\omega(t_k + n \cdot T)$, отже $\xi_\omega(t_k) = \xi_\omega(t_k + T(t, n))$.

Проводимо оцінювання ритмічної структури (дискретної функції ритму) за формулами (2.26) чи (2.25) відповідно для відліків сегментної зонної структури чи відліків сегментної циклічної структури.

Враховуючи розроблений метод сегментації, на рисунку 3.10 зображено структурну схему його алгоритмічного забезпечення. Даний метод реалізовано у вигляді програмного забезпечення [299] мовою програмування Delphi, фрагмент програми наведено в додатку С.

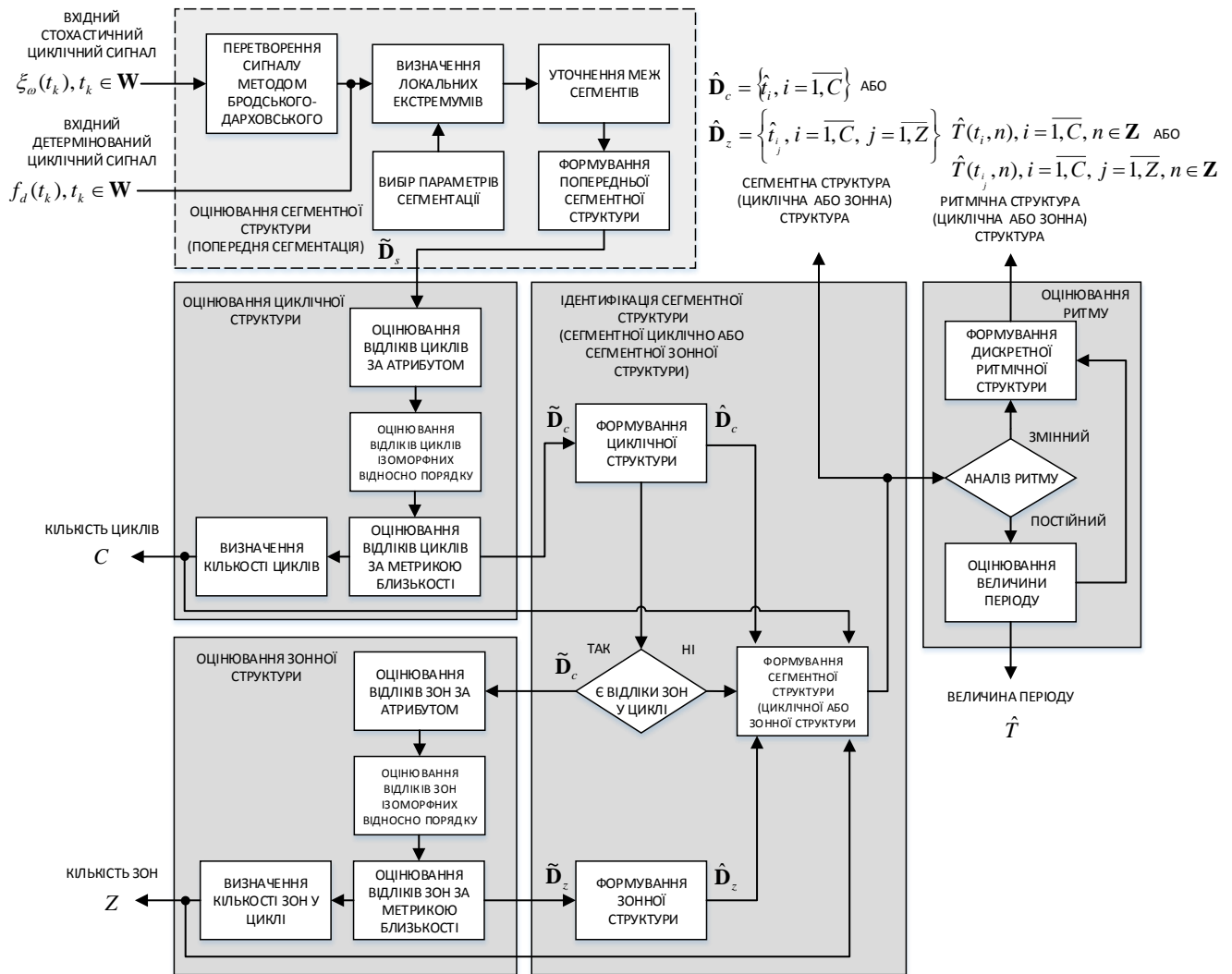


Рис. 3.10. Алгоритмічне забезпечення методу сегментації випадкових (стохастичних) циклічних сигналів

Розроблений метод дозволяє отримати інформацію про сегментну структуру $\hat{\mathbf{D}}_z = \{\hat{t}_j, j = \overline{1, Z}\}$ або $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$ ідентифікувавши її, провести оцінювання ритму, у випадку стабільного ритму – оцінити значення періоду, а у випадку змінного ритму – оцінити дискретну ритмічну структуру. Крім цього, даний метод частково включає в себе попередній метод і дозволяє (опціонально)

проводити сегментацію детермінованих циклічних сигналів, враховуючи відомі методи визначення локальних екстремумів [5, 17, 49, 310, 311]. Це передбачено у блоці оцінювання сегментної структури.

3.5.1. Результати застосування методу сегментації циклічних сигналів, моделями яких є циклічні випадкові процеси із сегментною структурою, оцінювання точності методу їх сегментації. Для оцінювання точності розробленого методу сегментації були змодельовані тестові реалізації циклічних сигналів та взяті реальні циклічні сигнали для яких була наперед відома сегментна структура, окремі результати наведені у роботі [426], які зображено на рисунку 3.11. Реалізації змодельованих циклічних сигналів наведено в умовних одиницях. У змодельовані реалізації закладалась інформація про ритмічну структуру, яка враховує та відображає через її відліки інформацію про сегментну структуру (сегментну циклічну чи сегментну зонну структури). При цьому у досліджуваних циклічних сигналах їх ритмічні структури окремо враховують як змінний, так і постійний (стабільний) ритм. Крім цього, у змодельованих циклічних сигналах були враховані різні атрибути.

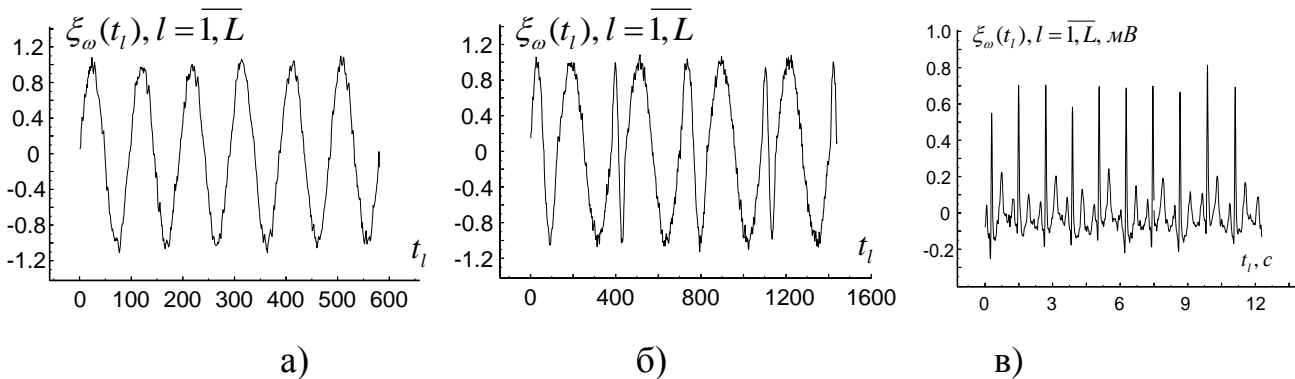


Рис. 3.11. Змодельовані тестові та реалізація реального циклічного сигналу для оцінювання точності методу сегментації стохастичних циклічних сигналів (атрибути – математичне сподівання, дисперсія): а) циклічний стохастичний сигнал (постійний ритм); б) циклічний стохастичний сигнал (змінний ритм); в) реалізація електрокардіосигналу, діагноз – умовно здорова людина

Циклічні сигнали моделювалися з урахуванням ритмічних структур,

зображені на рисунку 3.12.

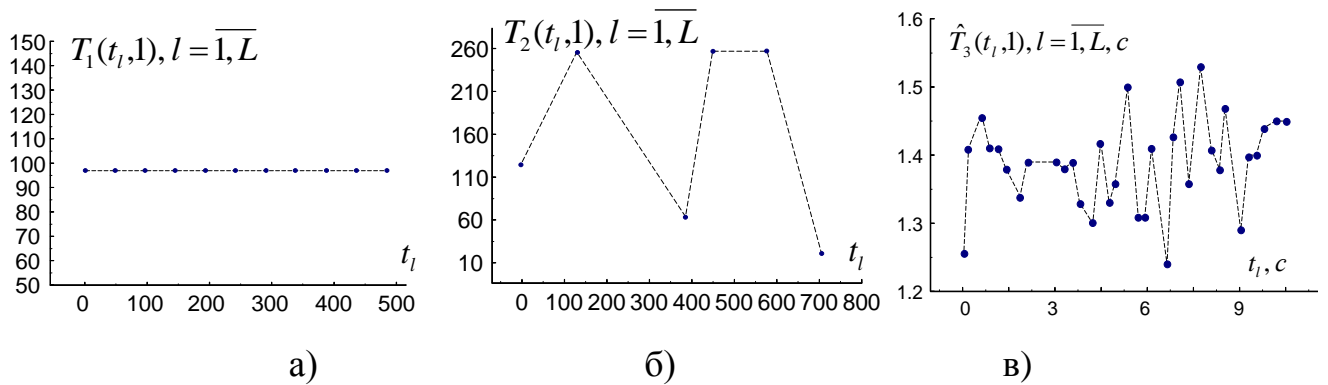


Рис. 3.12. Дискретні ритмічні структури змодельованих тестових та реального циклічного сигналу: а) циклічний стохастичний сигнал (постійний ритм, період ($T = 97$)); б) циклічний стохастичний сигнал (змінний ритм); в) реалізація електрокардіосигналу, діагноз – умовно здорова людина, пунктирна лінія – неперервна функція ритму, кусково-лінійна

Застосувавши розроблений метод сегментації до тестових циклічних сигналів, ідентифікували сегментні структури та оцінивши їх ритмічні структури провели оцінювання похибок сегментації. Окремі результати наведено на рисунку 3.13.

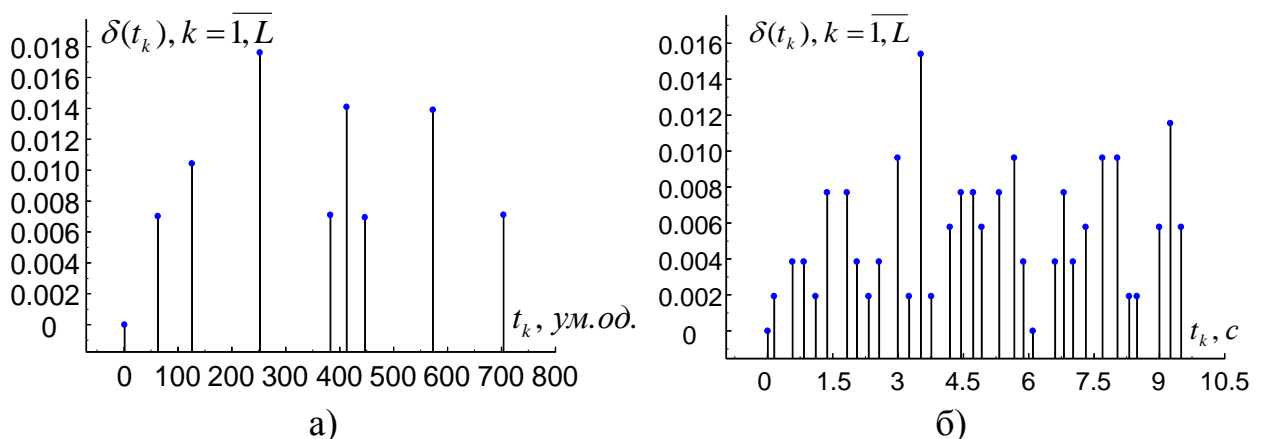


Рис. 3.13. Середньоквадратичні відносні похибки визначених елементів дискретної ритмічної структури для циклічних сигналів: а) циклічний стохастичний сигнал (змінний ритм); б) реалізація електрокардіосигналу, діагноз – умовно здорова людина

Для кількісного оцінювання точності методів сегментації визначалися середньоквадратичні абсолютна та відносна похибки за формулами (3.42) та (3.43).

З отриманих результатів похибок виявлено, що у випадку сегментації циклічного стохастичного сигналу, моделлю якого є циклічний випадковий процес (ритм – змінний) похибка неточності визначення межі сегменту складає 1,8% (див. рис. 3.13, а). При сегментації стохастичного циклічного сигналу у якого ритм – постійний (стохастично періодичний сигнал) розроблений метод не дав похибок визначення меж сегментів для досліджуваних змодельованих реалізацій. У випадку сегментації реального стохастичного циклічного сигналу, моделлю якого є циклічний випадковий процес, електрокардіосигнал (ритм – змінний) похибка неточності визначення межі сегменту складає 2,1%.

В таблиці 3.6 зведено отримані максимальні значення середньоквадратичних абсолютних та відносних похибок для досліджуваних змодельованих та реального циклічного сигналу.

Таблиця 3.6

Похибки визначених відліків дискретних ритмічних структур циклічних сигналів

Сегментація стохастичних циклічних сигналів	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %
Циклічний стохастичний сигнал (постійний ритм)	0	0
Циклічний стохастичний сигнал (змінний ритм)	8,2	1,8
Циклічний стохастичний сигнал (змінний ритм), реалізація електрокардіосигналу	11,4	2,1

З отриманих даних (див. табл. 3.7) випливає, що точність застосування розробленого методу сегментації випадкового циклічного сигналу дискретного аргументу із сегментною структурою для випадку стабільного ритму є високою. У випадку сегментації циклічного стохастичного сигналу точність менша, але

відносна похибка не перевищує 8% для досліджуваних тестових та реальних циклічних сигналів (електрокардіосигналів).

Проведемо дослідження з метою підтвердження збільшення точності при застосуванні розроблених методів сегментації у порівнянні із відомими методами. З цією метою розглянемо окремі типові представники класів відомих методів сегментації. Необхідно відмітити, оскільки розроблені у роботі методи сегментації покликані забезпечувати універсальність у тому сенсі, що дозволяють проводити визначення меж сегментів для різних циклічних сигналів не прив'язуючись до їх морфологічних характеристик (характеристик форми сегментів) у різних предметних областях. Наприклад, для області кардіометрії проводити сегментацію електрокардіосигналу, магнітокардіосигналу, реокардіосигналу та інших, а для області механіки – циклічних процесів, що виникають на поверхні металів і викликані механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливом на неї. Тому серед відомих методів сегментації будемо вибирати, саме ті, які дозволяють чи можуть бути використані (поширені) на інші циклічні сигнали в інших областях, які не прив'язуються ні до структури циклічного сигналу, ні до його особливостей форми (морфологічних характеристик). Серед оглянутих відомих класів методів сегментації (у першому розділі) для порівняння були вибрані представники класу методів, які ґрунтуються на визначенні похідних першого та другого порядків (різницевих функцій першого та другого порядків) та методу, що ґрунтується на визначенні розладок при сегментації циклічних сигналів. Хоча в літературних джерелах говориться про високу точність та завадостійкість методів на основі хвильового перетворення їх не будемо включати у порівняння з іншими методами, оскільки ефективність таких методів суттєво залежать від вибору масштабних коефіцієнтів та материнського вейвлета, який має бути наближеним до типового циклу, зокрема, електрокардіосигналу [121]. Тому такі методи значною мірою залежать від морфологічних особливостей циклу досліджуваного циклічного сигналу, зокрема при опрацюванні електрокардіосигналу і виборі материнського вейвлета «bior1.5», у випадку коли структура циклу електрокардіосигналу буде мати

роздвоєні чи розтроєні R-сегменти, зумовлені певним видом патології, або у випадку зміщення сегмента-ST вверх (див додаток А, підпункт А.3) клас таких методів буде давати некоректні результати сегментації. Класи методів в основі яких покладено визначення амплітудних характеристик циклічних сигналів чи методи на основі еталонів суттєво залежать від морфологічних характеристик досліджуваних циклічних сигналів, те саме можна сказати за комбіновані, гібридні методи з використанням фільтрів. У таблиці 3.7 зведені результати порівняння методів сегментації циклічних сигналів, зокрема реалізацій електрокардіосигналів розробленим та відомими методами.

Таблиця 3.7

Порівняння результатів сегментації електрокардіосигналів розробленим та відомими методами

Сегментація циклічних сигналів	Кількість опрацьованих циклічних сигналів	Відносна максимальна похибка, не більше, %
Відомий метод сегментації на основі різницевої функції першого порядку [287]	38	15
Відомий метод сегментації на основі різницевих функцій першого та другого порядку [1]	35	12
Відомий метод сегментації на основі визначення розладки в ЕКС [185]	33	10
Розроблений метод сегментації	47	8

З отриманих результатів відносна похибка визначення меж сегментів розробленого методу менша у порівнянні з відомими методами сегментації (електрокардіосигналів), побудованих на основі першої та другої похідних (різницевих функцій) та стохастичного методу на основі пошуку розладок в ЕКС. Відносна похибка сегментації відомих методів для досліджуваних реалізацій складає 10-15% [1, 185, 301, 287].

Проводячи порівняльний аналіз методів акцент дослідження ставився на

визначення точності методів визначення меж сегментів (при цьому інформація про межі сегментів досліджуваних електрокардіосигналів була відома наперед). При глибокому аналізі методів необхідно також враховувати такі параметри методів як чутливість та ефективність. необхідні і інші дослідження на чутливість, специфічність та ефективність. Чутливість методів (sensitivity) – це ймовірність розпізнавання довільного R-сегмента (та інших сегментів), виражена у відсотках, специфічність (specificity) – ймовірність того, що довільний виділений R-сегмент (чи інший сегмент) є істинним та ефективність (efficiency) – ймовірність визначення методом правильного результату [301], питання таких досліджень лишається відкритим. У тестові реалізації циклічних сигналів як модельовані (сегментна структура в які закладалась в методах їх моделювання) так і реальні (сегментна структура в яких наперед була визначена лікарем-експертом) виключались наявність артефактів структури, щоб забезпечити однаковість під час опрацювання та трактування отриманих результатів.

Далі розглянемо метод сегментації циклічних сигналів, моделями яких є циклічні випадкові процеси із сегментною структурою, такі, як циклічні білі шуми, процеси із незалежними циклічними приростами та інші.

3.6. Модифікація блоку оцінювання сегментної структури циклічних сигналів, моделями яких є циклічні випадкові процеси із сегментною структурою, оцінювання похибок методу їх сегментації

Покажемо, як можна будувати методи сегментації циклічних сигналів, модифікувавши та замінивши блок «Оцінювання сегментної структури», що наведений у структурній схемі (див. рис. 3.1) методології сегментації для потреб урахування різних імовірнісних характеристик у розробляємих методах сегментації реалізацій циклічних випадкових процесів. На рисунку 3.14 наведена модифікована структурна схема даного блоку. Така структура дозволяє, використовуючи дві позиції ключа, вибираючи при цьому, на які зміни імовірнісних характеристик буде реагувати метод попередньої сегментації при

опрацюванні циклічних сигналів, моделями яких є циклічні випадкові процеси.

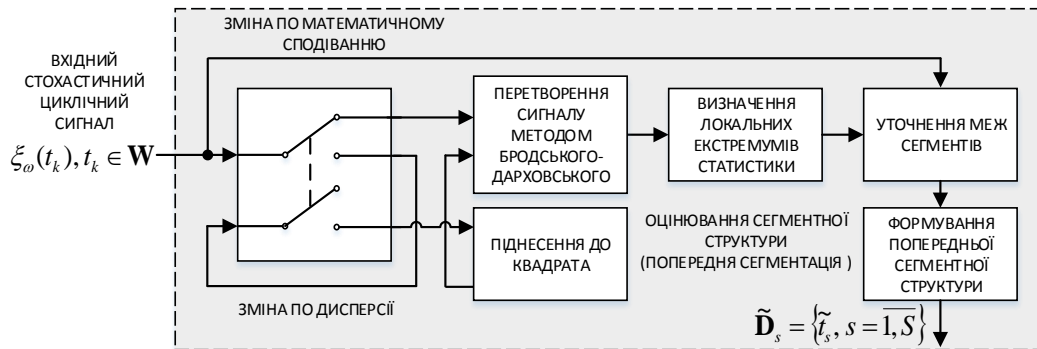


Рис. 3.14. Структурна схема блоку оцінювання сегментної структури (попередня сегментація) для сегментації реалізацій випадкових процесів з можливістю вибору тих ймовірнісних характеристик, за яким відбувається різка зміна (математичне сподівання чи дисперсія)

За умови вибору верхньої позиції перемикача, метод буде реагувати на зміну математичного сподівання в реалізаціях досліджуваного сигналу, а за умови вибору нижньої позиції перемикача, циклічний сигнал, на реалізаціях якого спостерігається різка зміна по дисперсії, попередньо перетворюється, шляхом піднесення його значень до квадрата, наприклад, як це наведено в роботі [337]. Далі використовується описаний вище підхід на основі застосування статистики Бродського-Дарховського [426] в розробленому методі сегментації.

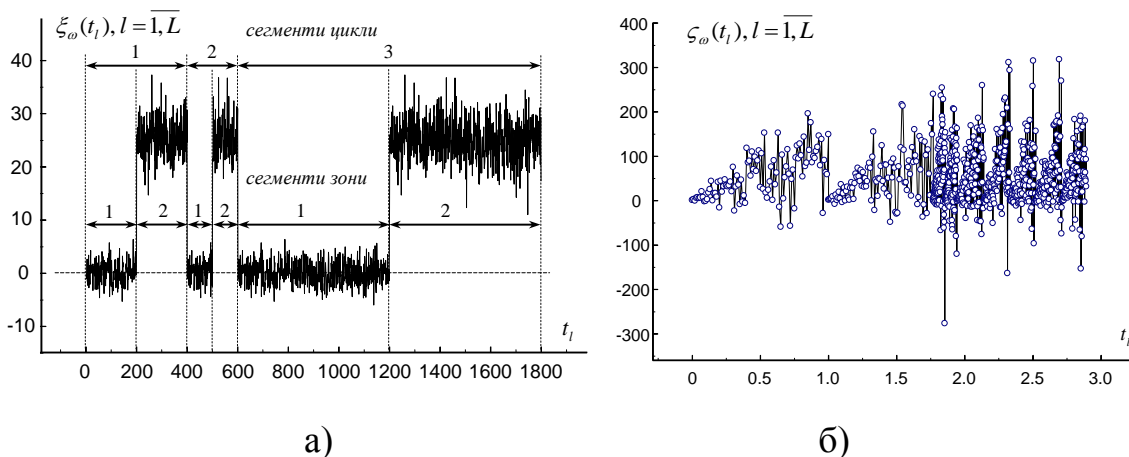


Рис. 3.15. Змодельовані тестові циклічні сигнали для оцінювання точності методу сегментації (атрибути – математичне сподівання, дисперсія): а) циклічний кусково-стаціонарний випадковий процес; б) реалізація циклічного білого шуму

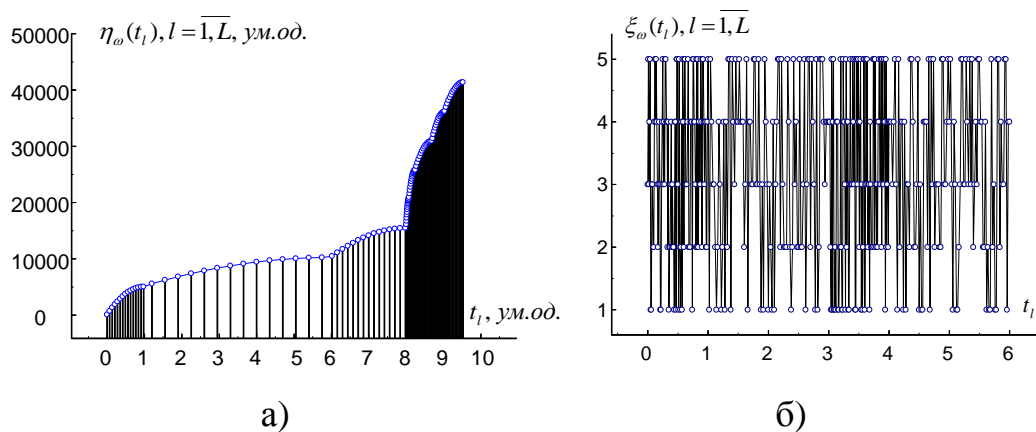


Рис. 3.16. Змодельовані тестові циклічні сигнали для оцінювання точності методу сегментації (атрибути – математичне сподівання, дисперсія): а) реалізація процесу із незалежними циклічними приростами; б) реалізація циклічного марковського випадкового процесу (ланцюг Маркова, кількість станів рівно 5)

Модифікувавши даний блок і врахувавши інші статистики залежно від потреб сегментації циклічних сигналів. Для прикладу, на рисунках 3.15 та 3.16, наведено змодельовані різні тестові реалізації циклічних сигналів моделями яких є циклічні випадкові процеси.

На рисунку 3.19 зображено ритмічні структури, які закладались у змодельовані тестові реалізації циклічних сигналів, моделями яких є циклічні випадкові процеси (див. рис. 3.15 та 3.16).

Слід відзначити, що для тих реалізацій випадкових процесів, у яких відбувається різка зміна таких імовірнісних характеристик, як математичне сподівання чи дисперсія, розроблений метод сегментації з урахуванням структури (див. рис. 3.14), вирішує поставлене завдання, наприклад, для випадку сегментації циклічного білого шуму (у реалізаціях якого відбувається різка зміна дисперсії). А для випадку сегментації реалізацій процесу із незалежними циклічними приростами, для прикладу, наведеної на рисунку 3.16, а) використання запропонованої статистики в такому методі не буде давати очікувані результати, оскільки значення в такій реалізації постійно зростають. Тому розроблено модифікований блок «Оцінювання сегментної структури (попередньої сегментації)», використовуючи в ньому процедуру усунення трендової

компоненти. Розроблена структура для сегментації реалізацій випадкового процесу із незалежними циклічними приростами наведена на рисунку 3.17.

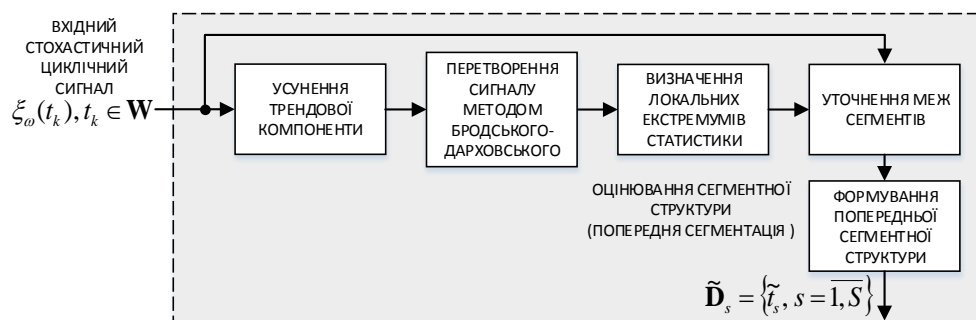


Рис. 3.17. Структурна схема блоку оцінювання сегментної структури (попередня сегментація) для проведення сегментації реалізацій випадкового процесу із незалежними циклічними приростами

Результат усунення тренду з досліджуваної реалізації випадкового процесу із незалежними циклічними приростами наведено на рисунку 3.18 (циклічна компонента). Далі сегментується розробленим методом, отримується сегментна структура та визначається його ритмічна структура, результат її визначення наведено на рисунку 3.19, в).

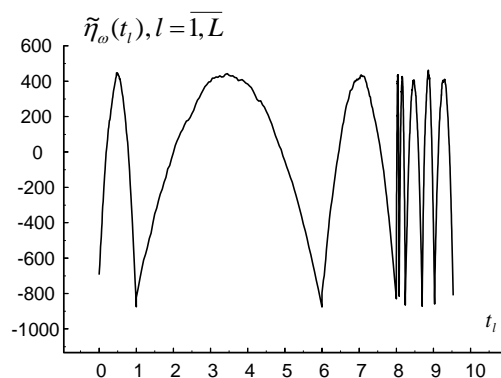


Рис. 3.18. Результат усунення тренду з досліджуваної реалізації випадкового процесу із незалежними циклічними приростами (циклічна компонента)

У випадку дослідження реалізацій таких випадкових процесів, як, наприклад, Марківські випадкові процеси чи ланцюги Маркова необхідно

враховувати інформацію про інші ймовірнісні характеристики, в методах сегментації, які розробляються. Для марківських випадкових процесів такою інформацією є матриця ймовірностей переходів. При сегментації реалізацій таких циклічних випадкових процесів інформація про повторювану циклічну структуру прихована не в значеннях реалізації ЦВП, як це, наприклад, у випадку ЦВП із незалежними значеннями (циклічного білого шуму), а в матрицях ймовірностей переходів. Тому для проведення сегментації реалізацій марківського процесу пропонується використовувати наступний підхід.

Розглянемо дискретний циклічний ланцюг Маркова $\xi_{\omega}(t_k), k = \overline{1, K}$, [278–283]. Для такого процесу відомо, що матриці ймовірностей переходу $\Pi(l) = \|p_{q,r}(l)\|$, де $p_{q,r}(l)$ ймовірність переходу зі стану q в стан r , будуть повторюватися на циклах, як для випадку періодичного ланцюга Маркова наведеного в роботі [284]. Необхідно провести оцінювання множини матриць ймовірностей переходів $\{\Pi(l), l = \overline{1, L}\}$, де L - кількість відліків на циклі такого циклічного випадкового процесу. З метою попередньої сегментації використаємо «ведучий» відлік, в якості «ведучого» відліку (відлік, який буде задавати межу сегмента-циклу чи сегмента-зони) і дозволить попередньо розбити на сегменти досліджувану реалізацію ЦВП. Таким ведучим відліком, за аналогією, до ведучого відліку, який використовувався в описаних вище методах сегментації і який відповідав відліку початку першого циклу, використаємо перший відлік, який відповідає значенню (стану), що зустрічається у досліджуваній реалізації ланцюга маркова. Крім цього, відомі початкові ймовірності станів $p_l, l = \overline{1, L}$.

При такому підході можливі два випадки: перший, коли маємо дискретний за часом строго циклічний марківський ланцюг (строга циклічність полягає у розумінні, того що відліки процесу мають нерівномірний крок дискретизації. При цьому кількість відліків на кожному циклі однакова і дорівнює L). У такому випадку необхідно:

1). Попередньо розбити досліджувану реалізацію на сегменти, використовуючи для цього «ведучий» відлік. При цьому розбитті необхідно

враховувати, щоб кількість відліків на отриманих сегментах була однаковою (визначається експериментально). Далі необхідно провести оцінювання матриць ймовірностей переходів. Прикладом оцінювання матриць ймовірностей переходів для випадку періодичного ланцюга Маркова може бути робота [284], проте в ній передбачається, що період марківського процесу наперед відомий і залишається провести оцінювання матриці ймовірностей переходів.

2). Наступний крок даного підходу полягає у перевірці коректності отриманої сегментної структури. При цьому перевіряються встановлені межі сегментів-циклів чи сегментів-зон. Для цього пропонується використовувати наступний підхід: досліджувану реалізацію поділяють на окремі частини й оцінюють множини матриць ймовірностей переходу окремо на частинах отриманих сегментів. Як критерій правильності визначення, наприклад, межі сегмента-циклу пропонується використовувати рівність чи мінімальне відхилення ε норми матриці (норма Фробеніуса) ймовірностей переходів, яка визначається

$$\|P_i\|_2 = \sqrt{\sum_{q=1}^q \sum_{r=1}^r p_{q,r}^2}, \text{ а саме відхилення визначається таким чином: } |P_i| - |P_u| \leq \varepsilon, \text{ де}$$

$|P_i|$ - норма матриці для сегмента i -го циклу; $|P_u|$ - норма матриці для сегмента досліджуваного u -го циклу, врахувавши, що кількість відліків на сегменті-циклі чи сегменті-зоні має бути однаковою. При виконанні умов рівності норми матриць ймовірностей переходу (або якщо різниці матриць будуть менше деякого заданого відхилення ε) отримують сегментну-циклічну чи сегментну-зонну структури досліджуваного циклічного ланцюга Маркова. Звісно, запропонований підхід не є повноцінним методом сегментації реалізацій марківських випадкових процесів (ланцюгів Маркова). Це лише запропонований підхід, який може бути розвинений і доведений до реалізації методу в подальших наукових дослідженнях.

Другий випадок – коли ми маємо реалізацію дискретного циклічного марківського процесу (циклічного ланцюга Маркова), у якого крок дискретизації рівномірний. При цьому необхідно провести оцінювання відліків меж сегментів-циклів чи сегментів-зон, перевіряючи норми матриць ймовірностей переходів. Як відзначалося раніше, вони мають бути однакові на сегментах-циклах чи

сегментах-зонах. Таку задачу складно однозначно розв'язати, оскільки необхідно вибрати із усіх відліків реалізації такі, які будуть відповідати однофазним значенням (рівні чи наближено рівні) в сенсі норми матриць ймовірностей переходів відповідним відлікам в інших сегментах-циклах чи сегментах-зонах. Запропонована перевірка, як для випадку строго циклічного марківського процесу (ланцюга Маркова), буде вимагати значних обчислювальних потужностей (необхідно обчислювати та перевіряти матриці ймовірностей переходу між відліками меж сегментів-циклів чи сегментів-зон), тому розв'язок задачі в такій постановці залишається відкритим для подальших наукових досліджень.

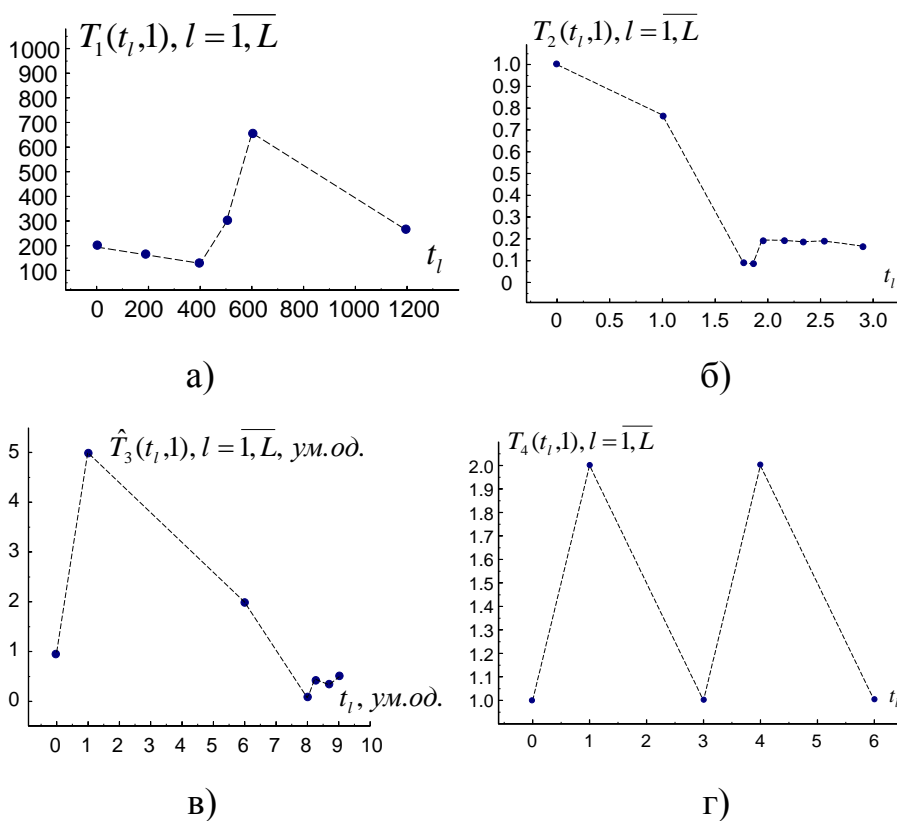


Рис. 3.19. Дискретні ритмічні структури змодельованих тестових циклічних випадкових процесів (атрибути – математичне сподівання, дисперсія): а) для циклічного кусково-стаціонарного випадкового процесу; б) для циклічного білого шуму; в) для випадкового процесу із незалежними циклічними приростами; г) для циклічного марковського випадкового процесу (ланцюг Маркова, кількість станів рівно 5), пунктирна лінія – неперервна функція ритму

Розглядаючи перший випадок і застосувавши запропонований підхід (перевіривши норми матриць ймовірностей переходів), отримали ритмічну структуру, наведену на рисунку 3.20, г). Як приклад, наведено визначену дискретну ритмічну структуру циклічного випадкового ланцюга Маркова, для якого виконується строга циклічність (кількість відліків на цикл однакова для всіх циклів).

Враховуючи модифіковані структури блоку «Оцінювання сегментної структури (попередня сегментація)» і застосувавши розроблений метод сегментації до тестових циклічних сигналів, отримали сегментні структури та оцінили їх ритмічну структуру відомим методом на основі кусково-лінійної інтерполяції. Результати наведені на рисунку 3.20.

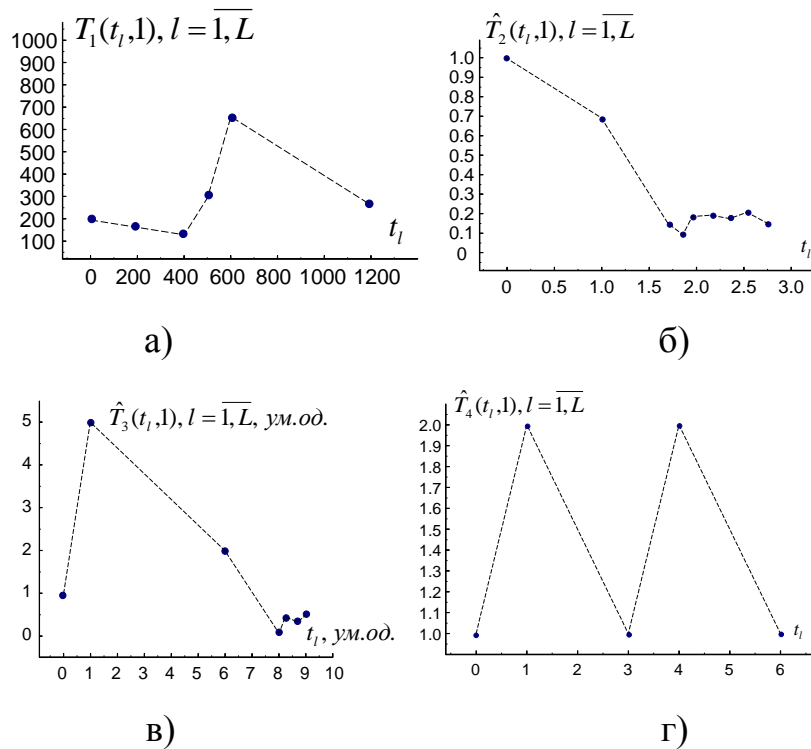


Рис. 3.20. Визначені дискретні ритмічні структури змодельованих реалізацій тестових циклічних випадкових процесів розробленим методом сегментації (атрибути – математичне сподівання, дисперсія): а) для циклічного кусково-стаціонарного випадкового процесу; б) для циклічного білого шуму; в) для процесу із незалежними циклічними приростами; г) для циклічного марковського випадкового процесу (ланцюг Маркова, кількість станів рівно 5), пунктирна лінія – неперервна функція ритму, кусково-лінійна

Для кількісного оцінювання точності методів сегментації визначалися середньоквадратичні абсолютна та відносна похибки за формулами (3.42) та (3.43). На рисунку 3.21, як приклад, наведено результати визначених абсолютної та відносної похибок для розробленого методу сегментації циклічних випадкових процесів із сегментною структурою.

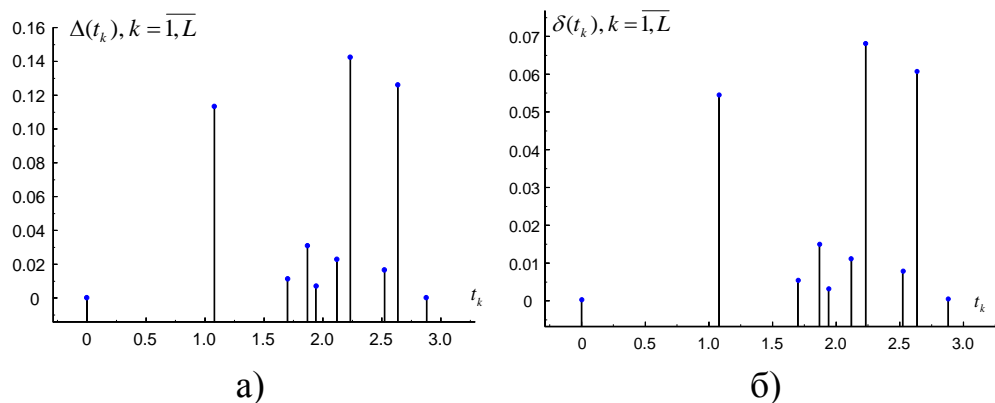


Рис. 3.21. Середньоквадратичні абсолютна та відносна похибки визначених елементів дискретної ритмічної структури для реалізації циклічного випадкового процесу (циклічного білого шуму): а) абсолютна похибка; б) відносна похибка

В таблиці 3.8 зведено отримані максимальні значення середньоквадратичних абсолютних та відносних похибок для досліджуваних, змодельованих реалізацій циклічних випадкових процесів.

Таблиця 3.8

Похибки визначених відліків дискретних ритмічних структур циклічних випадкових процесів

Сегментація стохастичних циклічних процесів	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %
Циклічний кусково-стаціонарний випадковий процес (змінний ритм)	0	0
Циклічний білий шум (змінний ритм)	0,16	7
Процес із незалежними циклічними приростами (змінний ритм)	0	0
Циклічний ланцюг Маркова (змінний ритм)	0,014	0,4

З отриманих даних (див. табл. 3.9) випливає, що точність розробленого методу сегментації циклічних сигналів, математичною моделю яких є циклічний кусково-стаціонарний випадковий процес, дискретного аргументу, у випадку змінного ритму, для досліджуваних реалізацій, є високою. У випадку циклічних сигналів зі змінним ритмом точність визначення меж сегментів менша, проте відносна середньоквадратична похибка сегментації досліджуваних циклічних сигналів розробленими методами не перевищувала 8%.

3.7. Підхід до розпізнавання сегментів-зон, отриманих на основі методів сегментації циклічних сигналів

При урахуванні сегментної зонної структури циклічних сигналів в методах сегментації, немає чіткої прив'язки визначених сегментів-зон до зон, які використовуються в конкретній предметній області (у більшості випадків сегменти-зони співпадають з сегментами, які виділяють у предметних областях, наприклад, як це у випадку сегментації ЕКС, діагностичні зони якого відповідають межам сегментів-зон у математичній моделі та методах сегментації). Проте поняття сегмента-зони, яке формалізоване й використовується в математичних моделях циклічних сигналів, є досить узагальнене й характеризує фрагмент, ділянку циклічного сигналу, для відліків меж якої виконується умова рівності атрибутів, це з однієї сторони робить методи сегментації універсальними, (можливо застосовувати для сегментації різних циклічних сигналів в різних предметних областях) проте вимагає обов'язкової, подальшої їх прив'язки до сегментів у конкретній предметній області дослідження циклічного сигналу шляхом їх розпізнавання. Тому на практиці під час опрацювання циклічних сигналів необхідно проводити додатковий аналіз визначених сегментів з метою їх розпізнавання (ідентифікації). Для розв'язку цієї задачі можна використовувати різні відомі методи (дослідження структури сегментів-циклів), наприклад, ті, що описані у підрозділі 1.7.3. Ще одним методом аналізу (розпізнавання) отриманих сегментів-зон після сегментації циклічного сигналу може бути підхід, описаний у

роботі [185]. В даній роботі використовується підхід до розпізнавання виділених сегментів на основі використання коефіцієнтів ортогонального розкладу отриманих сегментів-зон ЕКС у ряд Чебишева. Приклад застосування даного методу до отриманих сегментів-зон, досліджуваних циклічних сигналів, наведено у додатку П, підпункти П.1 та П.1.1. З отриманих результатів розкладу отриманих сегментів, застосовуючи десять перших коефіцієнтів розкладу, можна проводити розпізнавання сегментів-зон ЕКС, таких, як діагностичні зони Р, RS та Т.

3.8. Приклади результатів застосування розроблених методів сегментації циклічних сигналів у різних галузях

Застосуємо розроблені методи сегментації до реальних циклічних сигналів у медицині, механіці та економіці з метою перевірки ефективності розроблених у роботі методів сегментації реальних циклічних сигналів. На основі розроблених методів сегментації циклічних сигналів проведено серію експериментів з опрацювання різних типів циклічних сигналів, зокрема ЕКС як в нормі, так і з різними видами патологій. У додатку И наведено додаткові приклади сегментації різних циклічних сигналів розробленими методами. При цьому наведено реалізації ЕКС, при яких відомі методи сегментації дають хибні результати, зокрема ЕКС, який характеризується роздвоєнням R-сегментів, або ті, в яких R-сегменти малої амплітуди в порівнянні з іншими сегментами. З отриманих результатів сегментації випливає, що розроблені методи не дають хибних результатів у тих випадках опрацювання ЕКС, при яких відомі методи некоректно визначають діагностичні сегменти.

3.8.1. Результати сегментації циклічних кардіосигналів (у медицині). На рисунках 3.22–3.28, як приклад, зображено циклічні сигнали [163, 213]. (електрокардіосигнали) як в нормі, так і з різними видами патологій, для яких застосовували розроблені методи сегментації та оцінювали їх ритмічні структури.

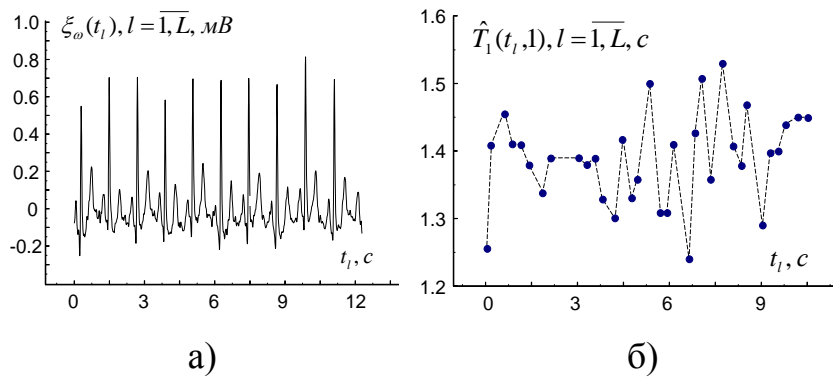


Рис. 3.22. Реалізація циклічного сигналу та визначена дискретна ритмічна структура: а) реалізація електрокардіосигналу, діагноз – умовно здорова людина; б) визначена ритмічна структура електрокардіосигналу, пунктирна лінія – неперервна функція ритму, кусково-лінійна

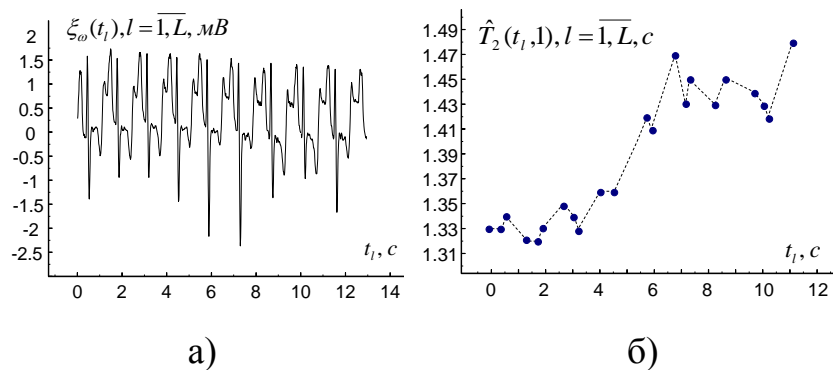


Рис. 3.23. Реалізація циклічного сигналу та визначена дискретна ритмічна структура: а) реалізація електрокардіосигналу, діагноз – патологія, порушення морфологічного характеру; б) визначена ритмічна структура електрокардіосигналу, пунктирна лінія – неперервна функція ритму

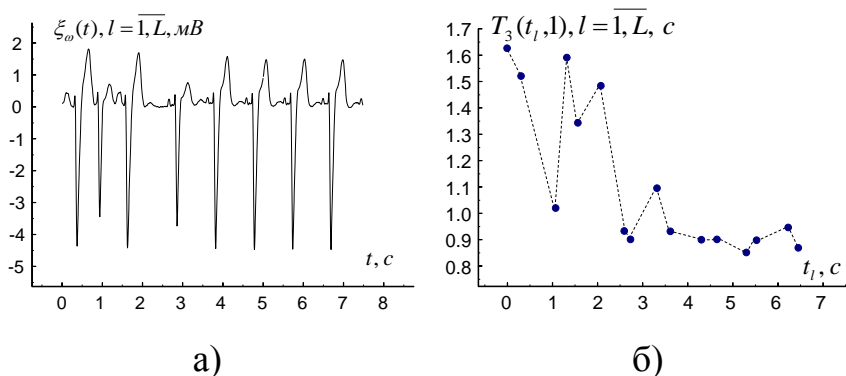


Рис. 3.24. Реалізація циклічного сигналу та визначена дискретна ритмічна структура: а) реалізація електрокардіосигналу, діагноз – патологія, порушення серцевого ритму; б) визначена ритмічна структура електрокардіосигналу, пунктирна лінія – неперервна функція ритму, кусково-лінійна

3.8.2. Результати сегментації циклічних процесів рельєфних утворень на поверхні металів (у механіці). Застосувавши розроблені методи сегментації до механічних процесів, отримали результати, наведені на рисунках 3.25, 3.26. Методика проведених експериментів описана в роботах [349, 414, 417, 423].

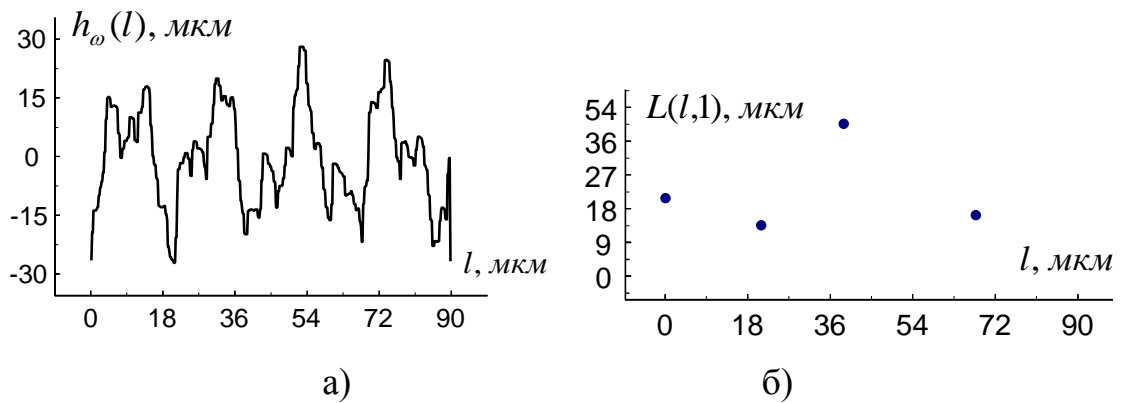


Рис. 3.25. Реалізація циклічного процесу рельєфних утворень та визначена дискретна ритмічна структура: а) реалізація процесу рельєфних утворень нанотитана після лазерно-хвильової обробки в чорнилах; б) визначена ритмічна структура

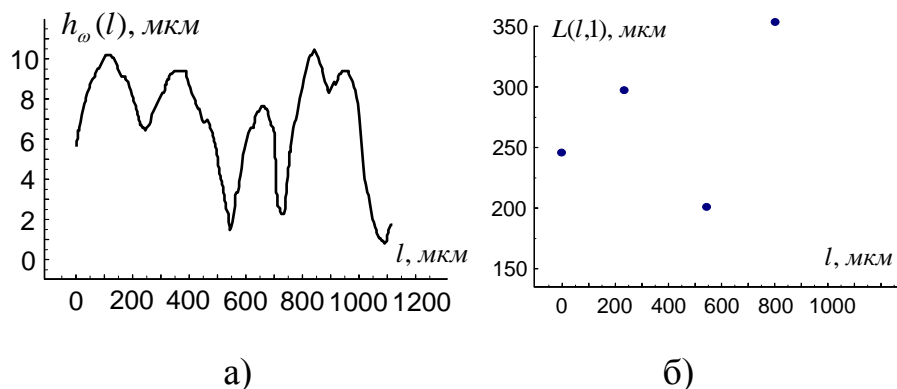


Рис. 3.26. Реалізація циклічного процесу рельєфних утворень та визначена дискретна ритмічна структура: а) реалізація процесу рельєфних утворень сплаву Д16чт за відносної деформації ($\varepsilon = 15,5\%$); б) визначена ритмічна структура

3.8.3. Результати сегментації циклічних економічних процесів (у економіці). У роботі [92] отримані результати сегментації циклічних економічних процесів, як приклад, на рисунках 3.27, 3.28 наведені деякі з них.

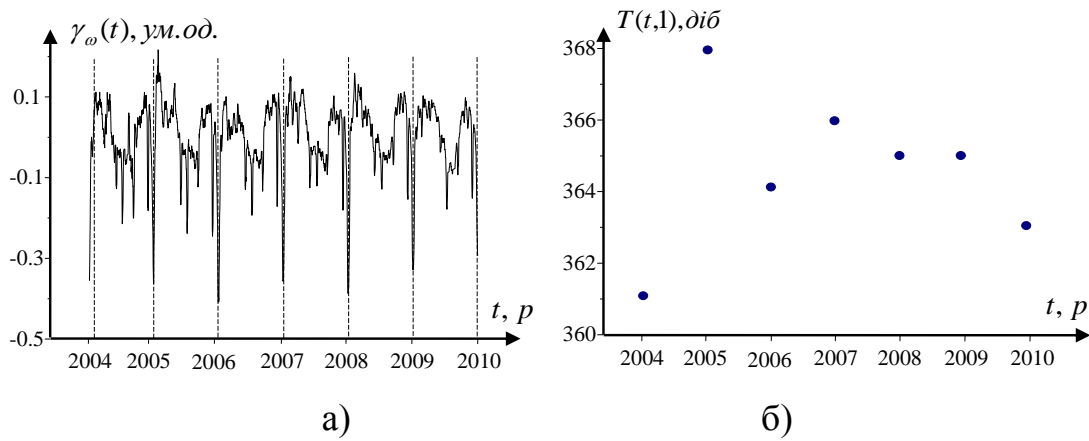


Рис. 3.27. Реалізація циклічного економічного процесу та визначена дискретна ритмічна структура: а) циклічний економічний процес – індекс показників маркетингу та реклами США, пунктирними лініями зображена сегментна структура; б) визначена ритмічна структура

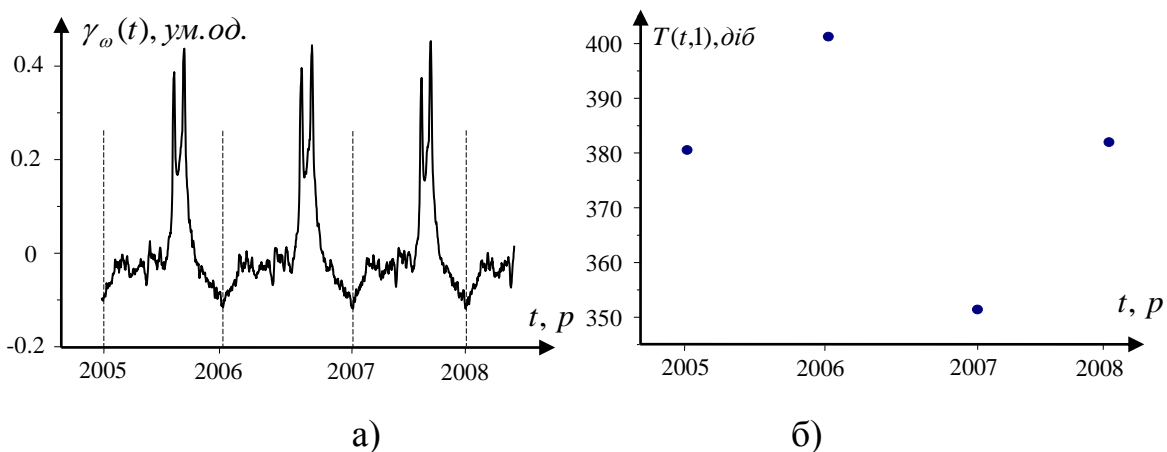


Рис. 3.28. Реалізація циклічного економічного процесу та визначена дискретна ритмічна структура: а) циклічний економічний процес – індекс комп'ютерних та електронних показників США, пунктирними лініями зображена сегментна структура; б) визначена ритмічна структура

У додатку И наведено приклади сегментації інших циклічних сигналів різної фізичної природи. З отриманих результатів слідує, що розроблені у роботі методи ідентифікації сегментних структур коректно розв'язують поставлену задачу при опрацюванні циклічних сигналів (їх сегментації) у різних галузях. Наступним кроком опрацювання циклічних сигналів, після ідентифікації сегментної структури, є оцінювання їх ритмічної структури. Розробка методів

ідентифікації ритмічних структур розглянута у наступному розділі.

3.8. Висновки до третього розділу

1. Враховуючи постановку завдання сегментації циклічних сигналів, розроблено методологію їх сегментації, як узагальнений теоретико-методологічний підхід, що дозволяє побудову методів ідентифікації сегментних структур. В основу методології сегментації покладено чотири базові принципи, які ґрунтуються на властивостях циклічних сигналів. Враховуючи зазначені принципи, у розробленій методології, це дало змогу здійснювати побудову нових методів сегментації (ідентифікації сегментних структур) циклічних сигналів, математичними моделями яких є циклічні функції.

2. Розроблено узагальнений підхід до сегментації абстрактної циклічної функції, яка є узагальненою моделлю циклічного сигналу із сегментною структурою. Використовуючи даний підхід та конкретизувавши характеристики, властивості (атрибути) досліджуваних циклічних сигналів, це дозволило будувати систему методів їх сегментації (ідентифікації сегментних структур) на основі розробленої методології та в рамках двох підходів – детермінованого та стохастичного, залежно від вибраної математичної моделі.

3. Розроблено метод сегментації циклічного сигналу, математичними моделями якого є детермінована циклічна числова функція та детермінована циклічна інтервальна функція із сегментною структурою. Розроблений метод дозволяє проводити ідентифікацію сегментної структури (сегментної циклічної чи сегментної зонної структури). Відомості про ідентифіковану сегментну структуру дозволяють проводити оцінювання ритму та ідентифікувати дискретну ритмічну структуру циклічного сигналу (ритмічну циклічну чи ритмічну зонну структуру відповідно).

4. Розроблено метод сегментації циклічного сигналу, математичною моделлю якого є циклічний випадковий процес із сегментною структурою. Розроблений метод дозволяє проводити ідентифікацію сегментної структури

(сегментної циклічної чи сегментної зонної структур). Відомості про ідентифіковану сегментну структуру дозволяють проводити оцінювання ритму та ідентифікувати дискретну ритмічну структуру циклічного сигналу (ритмічну циклічну чи ритмічну зонну структуру відповідно).

5. Проведено оцінювання точності розроблених методів сегментації детермінованих та стохастичних циклічних сигналів. Середньоквадратична відносна похибка розроблених методів сегментації, для досліджуваних тестових реалізацій та реальних циклічних сигналів складає: для детермінованих – 5%, а для стохастичних – 8%. Результати отриманих середньоквадратичних похибок сегментації розробленими методами значно менше у порівнянні з похибками, отриманими у випадку застосування відомих методів сегментації, а саме, на основі похідних (різницевих функцій) першого та другого порядків та методу в основі якого покладено визначення розладки випадкових процесів, вони складають 10–15%.

6. Проведені експерименти по сегментації циклічних сигналів із застосуванням розроблених у роботі методів доповнюють апарат опрацювання циклічних сигналів і можуть бути використані в системах цифрового автоматизованого опрацювання реальних циклічних сигналів у медицині, механіці чи економіці для задач ідентифікації їх сегментних структур. Розроблені методи сегментації дозволяють проводити оцінювання ритму – постійного чи змінного. У випадку постійного (стабільного) ритму – проводити оцінювання значення періоду, а у випадку змінного ритму – оцінювання дискретної ритмічної структури циклічних сигналів.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ РИТМІЧНОЇ СТРУКТУРИ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ. АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ РИТМІЧНИХ СТРУКТУР

У даному розділі розроблено методи ідентифікації ритмічних структур циклічних сигналів. Описано математичне забезпечення розроблених методів її оцінювання за допомогою методів змішаної інтерполяції кусково-квадратичної та кусково-лінійної функції; інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної функції; інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції. Описано розроблений метод оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів (відліків) та метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічних сигналів. Проведено оцінювання точності розроблених методів та її аналіз.

Основні результати четвертого розділу опубліковані в роботах [164, 172, 419–421].

4.1. Постановка задачі оцінювання ритмічної структури циклічного сигналу

У другому розділі дисертаційної роботи було зазначено, що будь-яка циклічна функція, як математична модель циклічного сигналу характеризується функцією ритму (ритмічною структурою), яка показує темп (ритм) розгортання у часі чи просторі циклічного сигналу й характеризує закон зміни відстаней між його однофазними відліками у різних циклах.

Першим етапом оцінювання ритмічної структури циклічного сигналу є отримання відомостей про його сегментну структуру [172, 349, 421]. У третьому розділі даної роботи розроблені методи сегментації (ідентифікації сегментних структур) циклічних сигналів, які дозволяють отримати відомості про їх сегментні структури. Для випадку циклічного сигналу, який містить лише сегменти-цикли,

ми отримаємо сегментну циклічну структуру $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$, у випадку дослідження циклічного сигналу, який містить сегменти-зони на сегментах-циклах, отримаємо сегментну зонну структуру $\mathbf{D}_z = \left\{ t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$.

Наведемо задачу оцінювання ритмічної структури (дискретної функції ритму) для циклічного сигналу, розглянувши узагальнений випадок. Така постановка задачі сформульована у роботі [199] для функції ритму.

Нехай маємо циклічний сигнал, який адекватно описується абстрактною циклічною функцією $F(t) \in \Psi, t \in \mathbf{R}$ із сегментною структурою. Множини, які ідентифікують ту чи іншу сегментну структуру $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$ або $\mathbf{D}_z = \left\{ t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$, є відомими, і були визначені за допомогою розроблених методів сегментації.

Задача оцінювання неперервної функції ритму циклічного сигналу полягає у визначенні такої інтерполяційної функції $\hat{T}(t, n), t \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}$, яка б проходила через дискретні значення ритмічної структури (дискретної функції ритму) $\left\{ \hat{T}(t_i, n) \right\}, t_i \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, n \in \mathbf{Z}$ або $\left\{ \hat{T}(t_{ij}, n) \right\}, t_{ij} \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, n \in \mathbf{Z}$ та задовольняла б умовам функції ритму $T(t, n)$, зокрема її похідна по аргументу t , якщо вона існує, не повинна бути меншою, ніж мінус одиниця [200].

У роботі [195] запропоновано оцінювати (визначати) неперервну функцію ритму $\hat{T}(t, n), t \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}$ неперервної циклічної функції $F(t), t \in \mathbf{R}$ шляхом проведення інтерполяції дискретної ритмічної структури (дискретної функції ритму) $\left\{ \hat{T}(t_i, n) \right\}, t_i \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, n \in \mathbf{Z}$ або $\left\{ \hat{T}(t_{ij}, n) \right\}, t_{ij} \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, n \in \mathbf{Z}$ дискретної циклічної функції дискретного аргументу $F(t_k), t_k \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$, що є вкладеною в неперервну $F(t), t \in \mathbf{R}$. Умови, які накладаються на інтерполяційну функцію $\hat{T}(t, n), t \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}$, є тими ж умовами, яким повинна задовольняти неперервна функція ритму $T(t, n), t \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}$, тобто умовам (2.20) та (2.22). Якщо

неперервна по аргументу t функція ритму має похідну, то умова (2.22) переходить в умову (2.23), а саме, $T'_i(t, n) > -1, n \in \mathbf{Z}, t \in \mathbf{R}$, як це показано в роботі [202].

В прикладних задачах опрацювання та аналізу циклічних сигналів, як правило, неперервна функція ритму циклічного сигналу є невідомою, для її оцінювання використовують найпростіший і відомий метод кусково-лінійної інтерполяції [196]. Аналогічні задачі оцінювання періоду стохастично періодичного та періодично корельованого випадкового процесу розглянуто в роботах [109, 276]. Оцінювання неперервної функції ритму циклічного сигналу, моделлю якого є циклічна функція (детермінована чи стохастична), є значно складнішою задачею, оскільки як частинний випадок включає задачу оцінювання періоду циклічної функції (періодичних детермінованої чи стохастичної функцій), а тому для загального випадку її розв'язати складно, зазначено у праці [202].

4.2. Метод оцінювання ритмічної структури за допомогою змішаної інтерполяції кусково-квадратичної та кусково-лінійної

Для оцінювання неперервної функції ритму спочатку необхідно сформувати дискретна ритмічну структуру (дискретну функцію ритму), визначивши її значення через відліки сегментної структури. Відліки дискретної ритмічної структури відповідають визначеним відлікам сегментної структури, а її значення визначаються за формулами: для випадку сегментної циклічної структури (2.25), для випадку сегментної зонної структури (2.26). Застосувавши ці формули, отримаємо дискретну ритмічну структуру у випадку, коли ідентифіковано сегментну циклічну структуру циклічного сигналу $\{\hat{T}(t_i, n)\}, t_i \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, n \in \mathbf{Z}$ та для випадку, коли ідентифіковано сегментну зонну структуру циклічного сигналу $\{\hat{T}(t_i, n)\}, t_i \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, n \in \mathbf{Z}$.

Дискретна ритмічна структура відображає закон зміни відстаней між однофазними відліками циклічного сигналу в різних його сегментах-циклах та

сегментах-зонах відповідно. Тому наступним етапом опрацювання циклічних сигналів є оцінювання неперервної функції ритму $\hat{T}(t, n), t \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}$, враховуючи при цьому, що дискретна ритмічна структура (дискретна функція ритму) є вкладеною у неперервну функцію ритму. Відомим методом оцінювання неперервної функції ритму є метод кусково-лінійної інтерполяції [196], проте на практиці у більшості задач аналізу циклічних сигналів їх неперервна функція ритму є невідомою, оскільки апріорно нічого не відомо про закономірності зміни значень всередині дискретної ритмічної структури, яка відповідає межах сегментів-циклів та сегментів-зон циклічного сигналу. Тому, природно, за такої невизначеності використовувати різні види інтерполяційних функції для задачі оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів. До того ж, обґрунтоване використання нелінійних поліномів для інтерполяції дискретної ритмічної структури буде коректним у випадку дослідження циклічних сигналів тривалості сегментів, яких відрізняються між тривалостями таких же сегментів у різних циклах досліджуваного сигналу.

Отже, розглянемо метод оцінювання ритмічної структури. Для цього використаємо метод кусково-квадратичної інтерполяції або кусково-параболічної [316].

Зазначимо, що в дисертаційній роботі будемо розглядати побудову методів оцінювання ритмічної структури для двох випадків: перший коли, ідентифікована сегментна циклічна структура циклічних сигналів $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$, як це у випадку сегментації, наприклад, циклічних економічних процесів, та другий випадок, коли ідентифікована сегментна зонна структура циклічних сигналів $\mathbf{D}_z = \{t_i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, як це характерно для медичних сигналів, наприклад електрокардіосигналів.

Для оцінювання дискретної ритмічної циклічної структури $\{\hat{T}(t_i, n)\}$ або ритмічної зонної структури $\{\hat{T}(t_i, n)\}$ прийемо $n=1$, оскільки на практиці опрацьовуємо циклічний сигнал, як правило з урахуванням його ритмічної

структури, прийнявши $n > 0$, а точніше $n = 1$, проводячи при цьому, наприклад, статистичне опрацювання, врахувавши кожен наступний цикл, що йде один за одним, а не вибраних циклів з певним кроком, як це, наприклад, у випадку, коли $n = 2$ відповідно першого, третього, п'ятого і так далі циклів. Тому в роботі будемо наводити ритмічні структури, прийнявши $n = 1$.

4.2.1. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній циклічній структурі. Інтерполяційна функція $\hat{T}(t,1)$, $n=1$, $t \in \mathbf{W}$ дискретної ритмічної циклічної структури $\{\hat{T}_i(t,1)\}$, $i = \overline{1, C}$, $t_i \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$, яка відповідає ідентифікованій сегментній циклічній структурі буде мати вигляд [419]

$$\hat{T}(t,1) = \sum_{i=1}^C \hat{T}_i(t,1), t \in \mathbf{W}, \quad (4.1)$$

де C – кількість циклів, визначених методами сегментації; $\{\hat{T}_i(t,1), i = \overline{1, C}\}$ – множина інтерполяційних кривих, які дорівнюють

$$\hat{T}_i(t,1) = a_i \cdot t^2 + b_i \cdot t + c_i, i = \overline{1, C}, t \in \mathbf{W}. \quad (4.2)$$

Використовуючи квадратичну інтерполяцію дискретної ритмічної структури ЦС, необхідно знайти три множини коефіцієнтів у випадку, коли для циклічного сигналу ідентифікована сегментна циклічна структура $\{a_i, i = \overline{1, C}\}$, $\{b_i, i = \overline{1, C}\}$ та $\{c_i, i = \overline{1, C}\}$, що повністю визначають інтерполяційну функцію $\hat{T}(t,1)$, $t \in \mathbf{W}$ на кожному із визначених сегментів-циклів.

У ролі інтерполяційної функції на відрізку $[t_i, t_{i+2}]$, $i = \overline{1, C-2}$ приймається квадратний тричлен (4.2). Для визначення невідомих коефіцієнтів його потрібно три рівняння (4.3).

Знаходимо вирази для обчислення шуканих коефіцієнтів інтерполяційної функції. Для цього запишемо рівняння параболи, що сполучає точки із

координатами $(t_i; \hat{T}(t_i, 1))$, $(t_{i+1}; \hat{T}(t_{i+1}, 1))$ та $(t_{i+2}; \hat{T}(t_{i+2}, 1))$, $i = \overline{1, C-2}$, тобто сполучає відліки дискретної ритмічної структури $\{\hat{T}(t_i, 1)\}$ у моменти часу t_i, t_{i+1} та t_{i+2} , $i = \overline{1, C-2}$:

$$\begin{cases} \hat{T}(t_i, 1) = a_i \cdot t_i^2 + b_i \cdot t_i + c_i, \\ \hat{T}(t_{i+1}, 1) = a_i \cdot t_{i+1}^2 + b_i \cdot t_{i+1} + c_i, \\ \hat{T}(t_{i+2}, 1) = a_i \cdot t_{i+2}^2 + b_i \cdot t_{i+2} + c_i, \end{cases} \quad (4.3)$$

$$i = \overline{1, C-2}, t_i \in \mathbf{W}.$$

Відповідно до рівнянь (4.3) коефіцієнти $\{a_i, i = \overline{1, C}\}$, $\{b_i, i = \overline{1, C}\}$ та $\{c_i, i = \overline{1, C}\}$ будуть визначатися згідно з виразами, виведення аналітичних залежностей для цих коефіцієнтів наведено у додатку К:

$$c_i = \hat{T}(t_i, 1) - a_i \cdot t_i^2 - b_i \cdot t_i, \quad (4.4)$$

$$b_i = \frac{\hat{T}(t_{i+1}, 1) - \hat{T}(t_i, 1) - a_i \cdot (t_{i+1}^2 - t_i^2)}{t_{i+1} - t_i}, \quad (4.5)$$

$$a_i = \frac{\hat{T}(t_{i+1}, 1) - \hat{T}(t_i, 1)}{(t_{i+1} - t_i) \cdot (t_{i+1} - t_{i+2})} - \frac{\hat{T}(t_{i+2}, 1) - \hat{T}(t_i, 1)}{(t_{i+2} - t_i) \cdot (t_{i+1} - t_{i+2})}, \quad (4.6)$$

де $i = \overline{1, C}$, $t_i \in \mathbf{W}$.

Згідно із умовою (2.22), що накладається на інтерполяційну функцію $\hat{T}(t, 1)$, її похідна повинна бути більшою за мінус одиницю, а це можливо лише коли похідні функцій $\{\hat{T}_i(t, 1), i = \overline{1, C}\}$ будуть більшими за мінус одиницю.

Похідні функцій $\{\hat{T}_i(t, 1), i = \overline{1, C}\}$ для даної інтерполяційної функції дорівнюють

$$\hat{T}'_i(t,1) = 2 \cdot a_i \cdot t + b_i, \quad i = \overline{1, C}, \quad t \in \mathbf{W}. \quad (4.7)$$

Вони мають бути більше за -1, тобто

$$\hat{T}'_i(t,1) > -1, \quad i = \overline{1, C}, \quad t \in \mathbf{W}. \quad (4.8)$$

На практиці ця умова може не виконуватись із-за коефіцієнтів $\{a_i, i = \overline{1, C}\}$ і $\{b_i, i = \overline{1, C}\}$. Тому за методом квадратичної інтерполяції дискретної ритмічної структури запропоновано використовувати додаткову умову (4.8). Після визначення коефіцієнтів (4.4)–(4.6) проводити визначення похідної (4.7), враховуючи отримані коефіцієнти й проводити перевірку умови (4.8). У тих нечастих випадках, коли умова (4.8) не виконується, на певному сегменті, використовувати заміну квадратичної інтерполяції (4.2) на лінійну (4.9). Таким чином, ми зможемо забезпечити необхідну умову для ритмічної структури $\hat{T}'_i(t,1) > -1$, оскільки для лінійної інтерполяції завжди виконується дана умова для ритмічної структури, зазначено у роботі [195]. Тому в таких випадках для лінійної інтерполяції будемо визначати коефіцієнти $\{k_i, i = \overline{1, C}\}$ та $\{m_i, i = \overline{1, C}\}$ за відомими формулами (4.10), (4.11), а інтерполяційний поліном (4.2) будемо заміняти на лінійний (4.9), який має вигляд

$$\hat{T}_i(t,1) = k_i \cdot t + m_i, \quad i = \overline{1, C}, \quad t \in \mathbf{W}, \quad (4.9)$$

де коефіцієнти визначаються таким чином [195]:

$$k_i = \frac{\hat{T}(t_{i+1},1) - \hat{T}(t_i,1)}{t_{i+1} - t_i}, \quad i = \overline{1, C}, \quad j = \overline{1, Z-1}, \quad t_i \in \mathbf{W}, \quad (4.10)$$

$$m_i = \hat{T}(t_i, 1) - \frac{\hat{T}(t_{i+1}, 1) - \hat{T}(t_i, 1)}{t_{i+1} - t_i} \cdot t_{i+1}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z-1}, t_i \in \mathbf{W}. \quad (4.11)$$

Похідні для виразу (4.9) будуть завжди більше за мінус одиницю, тобто

$$\hat{T}'_i(t, 1) = k_i > -1. \quad (4.12)$$

У результаті інтерполяція дискретної ритмічної структури для ідентифікованої сегментної циклічної структури зводиться до такої формули:

$$\hat{T}_i(t, 1) = \begin{cases} a_i \cdot t^2 + b_i \cdot t + c_i, i = \overline{1, C}, t \in \mathbf{W}, & \text{якщо (4.7), } \hat{T}'_i(t, 1) > -1, \\ k_i \cdot t + m_i, i = \overline{1, C}, t \in \mathbf{W}, & \text{якщо (4.7), } \hat{T}'_i(t, 1) \leq -1. \end{cases} \quad (4.13)$$

Застосуємо отримані вище співвідношення для оцінювання ритмічної структури різних циклічних сигналів. На рисунку 4.1 та 4.2 наведено приклади реалізації циклічних сигналів та оцінено їх ритмічні структури розробленим методом.

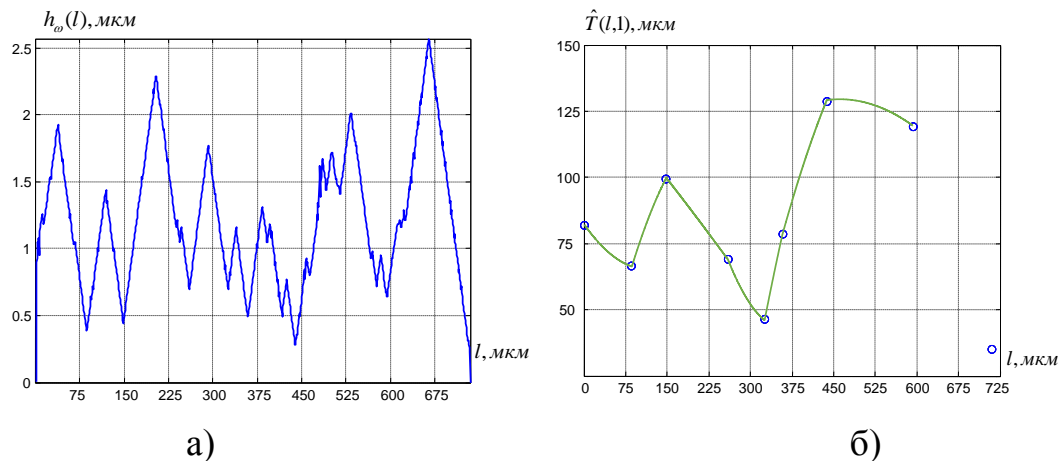


Рис. 4.1. Реалізація циклічного процесу та інтерполяція дискретної ритмічної структури: а) реалізація процесу рельєфних утворень взірця сталі 15X13МФ після лазерної ударно-хвильової обробки у воді, графік подано у вигляді «ширина елемента рельєфу – довжина ділянки, що розглядається»; б) результати оцінювання ритмічної структури змішаною інтерполяцією кусково-квадратичною та кусково-лінійною

Для даних рисунків 4.1, б) та 4.2, б) умова (4.8) виконалася на всіх сегментах-циклах, що відображено на графіку у вигляді квадратичної інтерполяції. За даним методом оцінювання ритмічної структури інтерполяційний поліном визначається, враховуючи значення трьох сусідніх відліків. Тобто коефіцієнти знаходяться з урахуванням наступного сусіднього сегмента, при цьому останній відлік дискретної ритмічної структури не буде врахований (див. рис. 4.1 та 4.2). Тому для випадку оцінювання ритмічної структури зареєстрованого циклічного сигналу з малою кількістю сегментів-циклів необхідно, щоб їх кількість була достатньою, не меншою трьох циклів, що є обмеженістю даного методу.

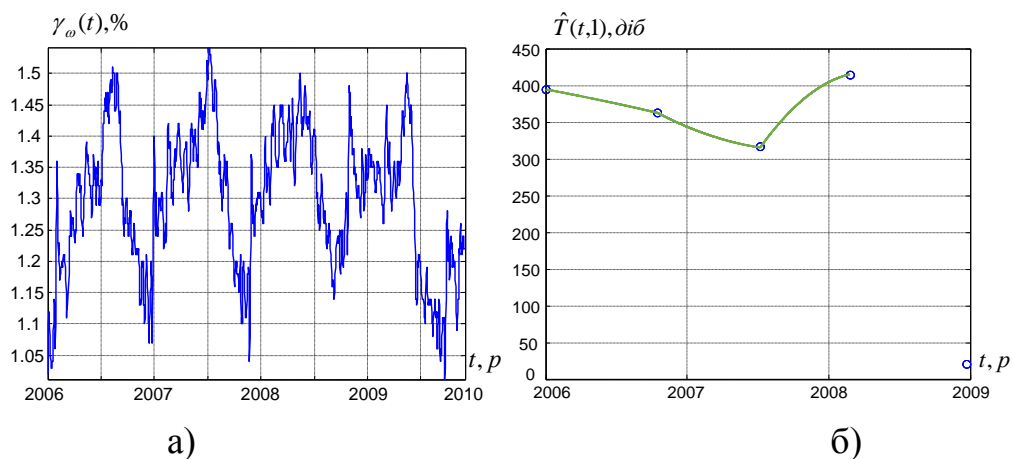


Рис. 4.2. Реалізація циклічного економічного процесу та інтерполяція дискретної ритмічної структури: а) реалізація економічних циклів – індекс активності автофінансування США; б) результати оцінювання ритмічної структури змішаною інтерполяцією кусково-квадратичною та кусково-лінійною

Надалі для наочності та порівняння будемо наводити однотипні досліджувані циклічні сигнали та відповідні їм оцінені ритмічні структури для різних розроблених у роботі методів їх оцінювання.

4.2.2. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній зонній структурі. Для випадку, коли ідентифікована сегментна зонна структура інтерполяційна функція $\hat{T}(t,1)$, $n=1$,

$t \in \mathbf{W}$ дискретної ритмічної зонної структури $\{\hat{T}(t_j, 1)\}$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$, $t_j \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$

буде мати вигляд

$$\hat{T}(t, 1) = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^Z \hat{T}_i(t, 1), t \in \mathbf{W}, \quad (4.14)$$

де Z – кількість зон на C -циклах, визначених методами сегментації;

$\{\hat{T}_i(t, 1), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ – множина інтерполяційних кривих, які дорівнюють:

$$\hat{T}_j(t, 1) = a_j \cdot t^2 + b_j \cdot t + c_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, t \in \mathbf{W}. \quad (4.15)$$

Використовуючи квадратичну інтерполяцію дискретної ритмічної зонної структури, необхідно знайти три множини коефіцієнтів у випадку, коли для циклічного сигналу ідентифікована сегментна зонна структура

$\{a_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, $\{b_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ та $\{c_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, що повністю

визначають інтерполяційну функцію $\hat{T}(t, 1)$, $t \in \mathbf{W}$ на кожному із визначених сегментів-зон.

У ролі інтерполяційної функції на відрізку $[t_j, t_{j+2}]$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$ приймається квадратний тричлен (4.15). Для визначення невідомих коефіцієнтів його потрібно три рівняння (4.16).

Так само, як і в попередньому випадку, знаходимо вирази для обчислення шуканих коефіцієнтів інтерполяційної функції. Для цього запишемо рівняння параболи, що сполучає точки із координатами $(t_j; \hat{T}(t_j, 1))$, $(t_{j+1}; \hat{T}(t_{j+1}, 1))$ та

$(t_{j+2}; \hat{T}(t_{j+2}, 1))$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z} - 2$, тобто сполучає відліки дискретної ритмічної

структури $\hat{T}(t_j, 1)$ у моменти часу t_j, t_{j+1} та t_{j+2} , $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z} - 2$:

$$\begin{cases} \hat{T}_{i_j}(t,1) = a_{i_j} \cdot t_{i_j}^2 + b_{i_j} \cdot t_{i_j} + c_{i_j}, \\ \hat{T}_{i_{j+1}}(t,1) = a_{i_j} \cdot t_{i_{j+1}}^2 + b_{i_j} \cdot t_{i_{j+1}} + c_{i_j}, \\ \hat{T}_{i_{j+2}}(t,1) = a_{i_j} \cdot t_{i_{j+2}}^2 + b_{i_j} \cdot t_{i_{j+2}} + c_{i_j}, \end{cases} \quad (4.16)$$

$$i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z-2}, t_{i_j} \in \mathbf{W}.$$

Відповідно до рівнянь (4.16), коефіцієнти $\left\{ a_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$, $\left\{ b_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$ та $\left\{ c_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$ будуть визначатися згідно з виразами, аналогічно до виразів (4.4)–(4.6), див. додаток К:

$$c_{i_j} = \hat{T}(t_{i_j}, 1) - a_{i_j} \cdot t_{i_j}^2 - b_{i_j} \cdot t_{i_j}, \quad (4.17)$$

$$b_{i_j} = \frac{\hat{T}(t_{i_{j+1}}, 1) - \hat{T}(t_{i_j}, 1) - a_{i_j} \cdot (t_{i_{j+1}}^2 - t_{i_j}^2)}{t_{i_{j+1}} - t_{i_j}}, \quad (4.18)$$

$$a_{i_j} = \frac{\hat{T}(t_{i_{j+2}}, 1) - \hat{T}(t_{i_j}, 1)}{(t_{i_{j+2}} - t_{i_j}) \cdot (t_{i_{j+2}} - t_{i_{j+1}})} - \frac{\hat{T}(t_{i_{j+1}}, 1) - \hat{T}(t_{i_j}, 1)}{(t_{i_{j+1}} - t_{i_j}) \cdot (t_{i_{j+2}} - t_{i_{j+1}})}, \quad (4.19)$$

де $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z-2}, t_{i_j} \in \mathbf{W}$.

Згідно із умовою (2.22), що накладається на інтерполяційну функцію $\hat{T}(t,1)$, її похідна повинна бути більшою за мінус одиницю, а це можливо лише коли похідні функцій $\{\hat{T}_{i_j}(t,1), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ будуть більшими за мінус одиницю.

Похідні функцій $\{\hat{T}_{i_j}(t,1), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ дорівнюють

$$\hat{T}_{i_j}'(t,1) = 2 \cdot a_{i_j} \cdot t + b_{i_j}, \quad i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, t \in \mathbf{W}. \quad (4.20)$$

Для даного випадку так само необхідно забезпечити умову для похідної (4.21), тобто

$$\hat{T}'_j(t,1) > -1, \quad i = \overline{1, C}, \quad t \in \mathbf{W}. \quad (4.21)$$

Тому за методом квадратичної інтерполяції на сегментах-зонах, де умова (4.21) не виконується, запропоновано замінити квадратичну інтерполяцію на лінійну. Інтерполяційний поліном при цьому має вигляд

$$\hat{T}_j(t,1) = k_j \cdot t + m_j, \quad i = \overline{1, C}, \quad j = \overline{1, Z}, \quad t \in \mathbf{W}, \quad (4.22)$$

де коефіцієнти, аналогічно до виразів (4.10) та (4.11), але для випадку ідентифікованої сегментної зонної структури та визначених меж сегментів-зон дорівнюють

$$k_j = \frac{\hat{T}(t_{j+1},1) - \hat{T}(t_j,1)}{t_{j+1} - t_j}, \quad i = \overline{1, C}, \quad j = \overline{1, Z-1}, \quad t_j \in \mathbf{W}, \quad (4.23)$$

$$m_j = \hat{T}(t_j,1) - \frac{\hat{T}(t_{j+1},1) - \hat{T}(t_j,1)}{t_{j+1} - t_j} \cdot t_{j+1}, \quad i = \overline{1, C}, \quad j = \overline{1, Z-1}, \quad t_j \in \mathbf{W}. \quad (4.24)$$

Похідні для виразу (4.22) будуть завжди більше за мінус одиницю, тобто

$$\hat{T}'_j(t,1) = k_j > -1. \quad (4.25)$$

У результаті інтерполяція дискретної ритмічної структури для

ідентифікованої сегментної зонної структури зводиться до такої формули:

$$\hat{T}_{i_j}(t,1) = \begin{cases} a_{i_j} \cdot t^2 + b_{i_j} \cdot t + c_{i_j}, & i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, t \in \mathbf{W}, \quad \text{якщо (4.20), } \hat{T}_{i_j}'(t,1) > -1, \\ k_{i_j} \cdot t + m_{i_j}, & i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, t \in \mathbf{W}, \quad \text{якщо (4.20), } \hat{T}_{i_j}'(t,1) \leq -1. \end{cases} \quad (4.26)$$

Застосуємо отримані вище співвідношення для оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів із ідентифікованою сегментною зонною структурою. На рисунку 4.3 наведено приклад реалізації циклічного сигналу (електрокардіосигналу) та оцінено ритмічну структуру даним методом.

Для даного прикладу (див. рис. 4.3,б) умова (4.21) виконалася на всіх сегментах-зонах, що відображено на графіку у вигляді кусково-квадратичної інтерполяції. Необхідно зазначити, що з отриманих результатів (див. рис. 4.3, б) бачимо, що між відліками $t = 2.25-3$ с та $t = 6.1-6.9$ с, які відповідають межах сегментів-зон спостерігаються викиди (осциляції) квадратичного полінома.

Розроблений метод описано в роботі [419], він є одним із простих методів побудови інтерполяційної функції для оцінювання неперервної функції ритму. До недоліків даного методу можна віднести необхідність достатньої кількості відліків сегментної циклічної структури (не менше трьох), оскільки в методі не враховується останній відлік. Це необхідно враховувати під час аналізу циклічних сигналів з малою кількістю сегментів-циклів, що реєструються. При цьому даний недолік не так відчутно проявляється у випадку дослідження циклічного сигналу з ідентифікованою сегментною зонною структурою, оскільки кількість відліків сегментної зонної структури навіть при реєстрації трьох циклів буде становити більше шести відліків (виходячи з міркувань, що на сегменті-циклі може спостерігатися мінімум два сегмента-зони). Перевага даного методу полягає в можливості застосовувати нелінійний підхід при оцінюванні ритмічної структури на противагу відмінного методу на основі кусково-лінійної інтерполяції (лінійного підходу) оскільки на практиці значення тривалостей досліджуваних сегментів відрізняються між тривалостями таких же сегментів на різних циклах

циклічного сигналу, що свідчить про нелінійну залежність, яка відображається в оціненій ритмічній структурі.

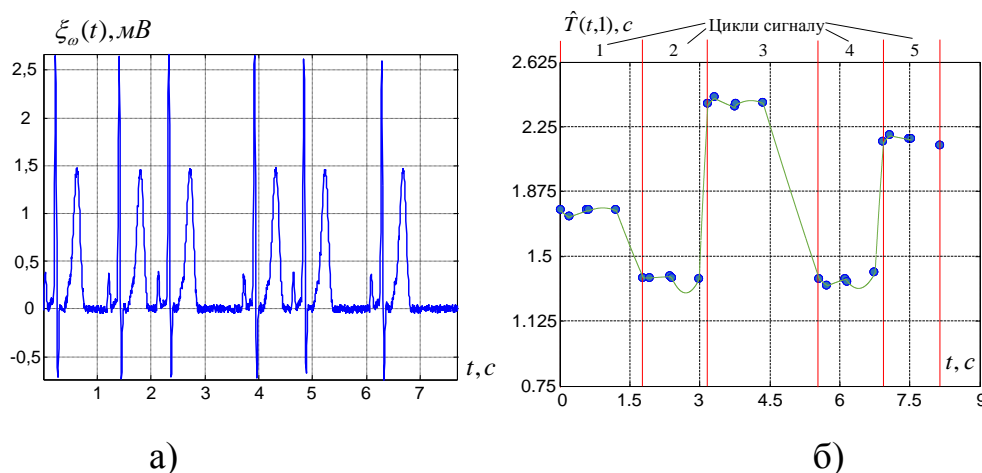


Рис. 4.3. Реалізація циклічного сигналу та інтерполяція дискретної ритмічної структури: а) реалізація електрокардіосигналу, діагноз – умовно здорова людина; б) результати оцінювання ритмічної структури змішаною інтерполяцією кусково-квадратичною та кусково-лінійною

Враховуючи розроблений метод оцінювання ритмічної структури для випадку ідентифікованої сегментної циклічної структури чи сегментної зонної структури, зобразимо у вигляді структурної схеми, наведеної на рисунку 4.4, алгоритмічного забезпечення даного методу.

У даній структурній схемі, якщо вхідними даними є множина відліків моментів часу, які відповідають межам сегментів-циклів (сегментна циклічна структура), $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$ або множина відліків моментів часу, які відповідають межам сегментів-зон (сегментна зонна структура), $\mathbf{D}_z = \left\{ t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$, циклічних сигналів, тоді формується дискретна ритмічна структура за формулами (2.25) та (2.26). У випадку, коли дискретна ритмічна структура відома $\left\{ \hat{T}(t_i, 1), i = \overline{1, C} \right\}$ або $\left\{ \hat{T}(t_{ij}, 1), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$ у такому разі інформація надходить на блок визначення коефіцієнтів для відповідних сегментів розробленим методом змішаної інтерполяції. Визначаються коефіцієнти для квадратичної інтерполяції,

після цього кроку перевіряється умова для похідної. При її виконанні проводиться кусково-квадратична інтерполяція на відповідному сегменті, у разі невиконання умови проводиться визначення коефіцієнтів для кусково-лінійної інтерполяції і відбувається заміна квадратичної інтерполяції на лінійну на відповідному сегменті. Після оцінювання дискретної ритмічної структури на відповідних сегментах $\{\hat{T}(t_i, 1), i = \overline{1, C}\}$ або $\{\hat{T}(t_j, 1), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ отримується неперервна функція ритму $T(t, n)$.

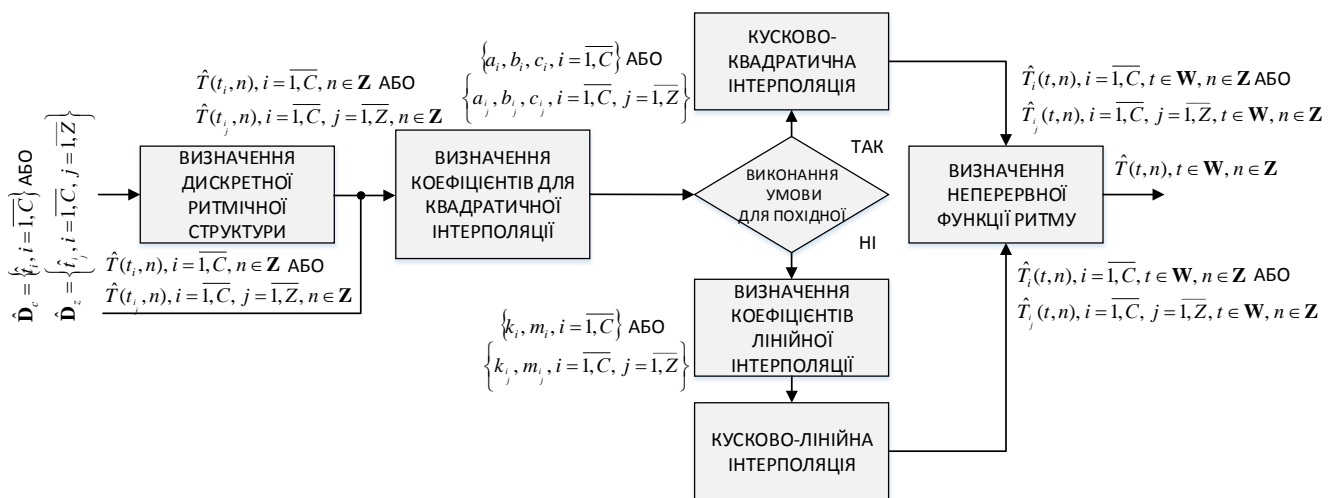


Рис. 4.4. Структурна схема методу оцінювання дискретної ритмічної структури циклічного сигналу методом змішаної інтерполяції кусково-квадратичною та кусково-лінійної функції

Точність методу інтерполяції дискретної ритмічної структури залежить від багатьох факторів [205], перш за все залежить від точності й правильності визначення сегментної структури (моментів часу початку сегментів-циклів та сегментів-зон) та коректності її ідентифікації. При цьому, чим більше досліджуваний сигнал буде містити сегментів-зон на циклі, тим більше ми отримаємо інформації (кількість відліків) дискретної ритмічної структури і тим самим буде більша точність її оцінювання (точність інтерполяції). Питання аналізу та порівняння точності розроблених методів оцінювання ритмічної структури та відомого методу на основі кусково-лінійної інтерполяції буде розглянуто далі у підрозділі 4.8.

4.3. Метод оцінювання ритмічної структури за допомогою змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної

Оскільки немає апріорної інформації про закономірності зміни ритмічної структури в межах відліків, які відповідають межах сегментів-циклів та сегментів-зон ритмічної структури циклічних сигналів, то природно використовувати різні підходи до її оцінювання на відповідних сегментах.

Розглянемо вид інтерполяції – інтерполяція квадратичним сплайном [104].

4.3.1. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній циклічній структурі. Інтерполяційна функція $\hat{T}(t,1)$, $n=1$, $t \in \mathbf{W}$ дискретної ритмічної циклічної структури $\{\hat{T}(t_i,1)\}$, $i = \overline{1,C}$, $t_i \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$, яка відповідає ідентифікованій сегментній циклічній структурі, для даного методу, буде мати вигляд (4.1), при цьому множина інтерполяційних сплайнів буде визначатись

$$\hat{T}_i(t,1) = a_i \cdot (t - t_i)^2 + b_i \cdot (t - t_i) + c_i, \quad (4.27)$$

де $t_i \leq t \leq t_{i+1}$, $t \in \mathbf{W}$, $i = \overline{1,C}$.

Таким чином, при інтерполяції квадратичним сплайном ритмічної структури необхідно знайти три, як і в попередньому випадку, множини коефіцієнтів $\{a_i, i = \overline{1,C}\}$, $\{b_i, i = \overline{1,C}\}$ і $\{c_i, i = \overline{1,C}\}$, що повністю визначають інтерполяційну функцію $\hat{T}(t,1)$ на кожному із визначених сегментів-циклів.

У ролі інтерполяційної функції на відрізку $[t_i, t_{i+1}]$, $i = \overline{1,C-1}$ приймається квадратичний сплайн (4.27). Для визначення невідомих коефіцієнтів запишемо формули для їх обчислення [104]:

$$c_i = \hat{T}_i(t,1), i = \overline{1,C-1}, \quad (4.28)$$

$$b_1 = A, b_i = 2 \cdot (\hat{T}_i(t,1) - \hat{T}_{i-1}(t,1)) \cdot h_{i-1}^{-1} - b_{i-1}, i = \overline{2, C-1}, \quad (4.29)$$

де $h_i = t_{i+1} - t_i$,

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{1}{2} \cdot (b_{i+1} - b_i) \cdot h_i^{-1}, i = \overline{1, C-2}, \\ a_i &= ((\hat{T}_{i+1}(t,1) - \hat{T}_i(t,1)) \cdot h_i^{-1} - b_i) \cdot h_i^{-1}, i = \overline{1, C-1}. \end{aligned} \quad (4.30)$$

У випадку оцінювання ритмічної структури за допомогою методу інтерполяції квадратичним сплайном похідна для інтерполяційної функції буде мати вигляд

$$\hat{T}_i'(t,1) = 2 \cdot a_i \cdot (t - t_i) + b_i, i = \overline{1, C}, t \in \mathbf{W}. \quad (4.31)$$

На практиці не завжди буде виконуватись умова (4.8) із-за коефіцієнтів $\{a_i, i = \overline{1, C}\}$, $\{b_i, i = \overline{1, C}\}$ і $\{c_i, i = \overline{1, C}\}$. Тому запропоновано за методом інтерполяції квадратичним сплайном дискретної ритмічної структури використовувати додаткову умову (4.8) при визначенні (4.31) для випадку невиконання умови (4.8), замінити інтерполяційну функцію (4.27) на лінійну функцію (4.9), коефіцієнти для якої визначаються за формулами (4.10), (4.11). При цьому умова (4.8) для виразу (4.9) завжди буде більше за мінус одиницю (4.12).

При такому підході інтерполяція дискретної ритмічної структури для ідентифікованої сегментної циклічної структури зводиться до такої формули:

$$\hat{T}_i(t,1) = \begin{cases} a_i \cdot (t - t_i)^2 + b_i \cdot (t - t_i) + c_i, & \text{якщо (4.31), } \hat{T}_i'(t,1) > -1, \\ k_i \cdot t + m_i, & \text{якщо (4.31), } \hat{T}_i'(t,1) \leq -1, \end{cases} \quad (4.32)$$

де $i = \overline{1, C}, t \in \mathbf{W}$.

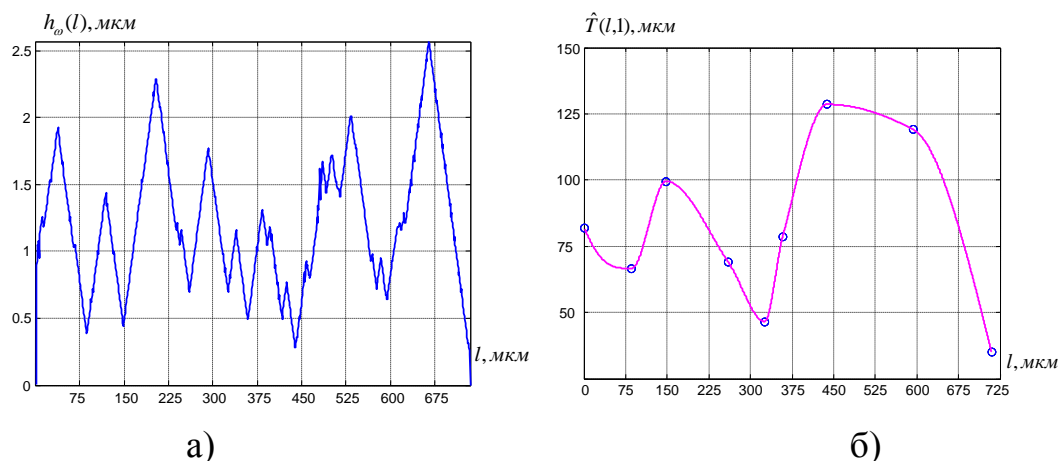


Рис. 4.5. Реалізація циклічного процесу та інтерполяція дискретної ритмічної структури: а) реалізація сигналу рельєфних утворень взірця сталі 15X13МФ після лазерної ударно-хвильової обробки у воді, графік подано у вигляді «ширина елемента рельєфу – довжина ділянки, що розглядається»; б) результати оцінювання ритмічної структури змішаною інтерполяцією квадратичним сплайном та кусково-лінійною

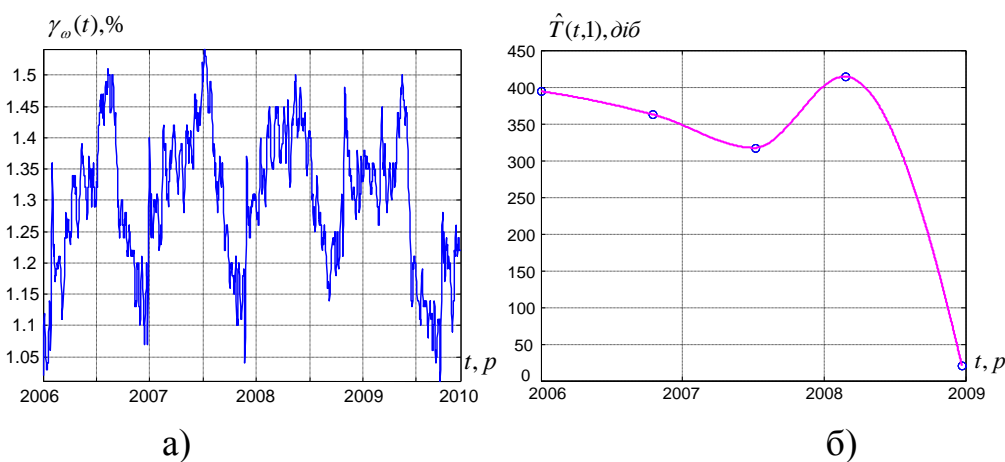


Рис. 4.6. Реалізація циклічного економічного процесу та інтерполяція дискретної ритмічної структури: а) реалізація економічних циклів – індекс активності автофінансування США; б) результати оцінювання ритмічної структури змішаною інтерполяцією квадратичним сплайном та кусково-лінійною

Застосуємо отримані вище співвідношення для оцінювання ритмічної структури різних циклічних сигналів. На рисунку 4.5 та 4.6, як приклад, наведено реалізації циклічних сигналів та оцінено їх ритмічні структури.

Для даних рисунків 4.5, б) та 4.6, б) умова похідної виконалася для всіх сегментів-циклів, що відображено на графіку у вигляді інтерполяції квадратичним сплайном. У даному методі відсутній недолік, який проявлявся в попередньому методі, пов'язаний із неврахуванням останнього відліку дискретної ритмічної структури. Позитивним у даному методі є те, що за рахунок його використання можна оцінювати ритмічну структуру, значення якої змінюються нелінійно між відліками, які відповідають межах сегментної циклічної структури.

4.3.2. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній зонній структурі. Для випадку ідентифікованої сегментної зонної структури інтерполяційна функція $\hat{T}(t,1)$, $n=1$, $t \in \mathbf{W}$ дискретної ритмічної зонної структури $\{\hat{T}(t_j,1)\}$, $i = \overline{1,C}$, $j = \overline{1,Z}$, $t_j \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$ даного методу буде мати вигляд (4.14). При цьому множина інтерполяційних сплайнів аналогічно до формули (4.27), буде визначатись

$$\hat{T}_j(t,1) = a_j \cdot (t - t_j)^2 + b_j \cdot (t - t_j) + c_j, \quad (4.33)$$

де $t_j \leq t \leq t_{j+1}$, $t_j \in \mathbf{W}$, $i = \overline{1,C}$, $j = \overline{1,Z}$.

При інтерполяції квадратичним сплайном ритмічної структури необхідно знайти три множини коефіцієнтів $\{a_j, i = \overline{1,C}, j = \overline{1,Z}\}$, $\{b_j, i = \overline{1,C}, j = \overline{1,Z}\}$ та $\{c_j, i = \overline{1,C}, j = \overline{1,Z}\}$, що повністю визначають інтерполяційну функцію $\hat{T}(t,1)$ на кожному із визначених сегментів-зон.

Аналогічно з попереднім випадком, запишемо формули для визначення коефіцієнтів із урахуванням ідентифікованої сегментної зонної структури.

Враховуючи (4.28)–(4.30), невідомі коефіцієнти визначаються згідно з [104]:

$$c_j = \hat{T}_j(t,1), i = \overline{1,C-1}, j = \overline{1,Z}, \quad (4.34)$$

$$b_j = A, b_j = 2 \cdot \left(\hat{T}_j(t,1) - \hat{T}_{j-1}(t,1) \right) \cdot h_{j-1}^{-1} - b_{j-1}, i = \overline{2, C-1}, j = \overline{1, Z}, \quad (4.35)$$

де $h_j = t_{j+1} - t_j$,

$$\begin{aligned} a_j &= \frac{1}{2} \cdot (b_{j+1} - b_j) \cdot h_j^{-1}, i = \overline{1, C-2}, j = \overline{1, Z}, \\ a_j &= \left(\left(\hat{T}_{j+1}(t,1) - \hat{T}_j(t,1) \right) \cdot h_j^{-1} - b_j \right) \cdot h_j^{-1}, i = \overline{1, C-1}, j = \overline{1, Z}. \end{aligned} \quad (4.36)$$

У випадку оцінювання ритмічної структури за методом інтерполяції квадратичним сплайном похідна для інтерполяційної функції буде мати вигляд

$$\hat{T}'_j(t,1) = 2 \cdot a_j \cdot (t - t_j) + b_j > -1, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, t \in \mathbf{W}. \quad (4.37)$$

На практиці не завжди буде виконуватись умова (4.21) із-за коефіцієнтів $\left\{ a_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$, $\left\{ b_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$ та $\left\{ c_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}$. Тому за методом інтерполяції квадратичним сплайном дискретної функції ритму, так само як і для випадку змішаної інтерполяції дискретної функції ритму: квадратичної та кусково-лінійної, запропоновано використовувати додаткову умову (4.21) при визначенні (4.37). Для випадку невиконання умови (4.21) заміняти інтерполяційну функцію (4.33) на лінійну функцію (4.22), коефіцієнти якої визначаються (4.23), (4.24). При цьому умова (4.21) для виразу (4.22) завжди буде більше за мінус одиницю (4.25).

При такому підході інтерполяція дискретної ритмічної структури для ідентифікованої сегментної зонної структури зводиться до такої формули:

$$\begin{aligned} \hat{T}_j(t,1) &= \\ &= \begin{cases} a_j \cdot (t - t_j)^2 + b_j \cdot (t - t_j) + c_j, \text{ якщо (4.37) } \hat{T}'_j(t,1) > -1, \\ k_j \cdot t + m_j, \text{ якщо (4.37) } \hat{T}'_j(t,1) \leq -1, \end{cases} \end{aligned} \quad (4.38)$$

де $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, t \in \mathbf{W}$.

Застосуємо отримані вище співвідношення для оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів із сегментною зонною структурою. На рисунку 4.7 наведено приклад реалізації циклічного сигналу (електрокардіосигналу) та оцінено ритмічну структуру даним методом.

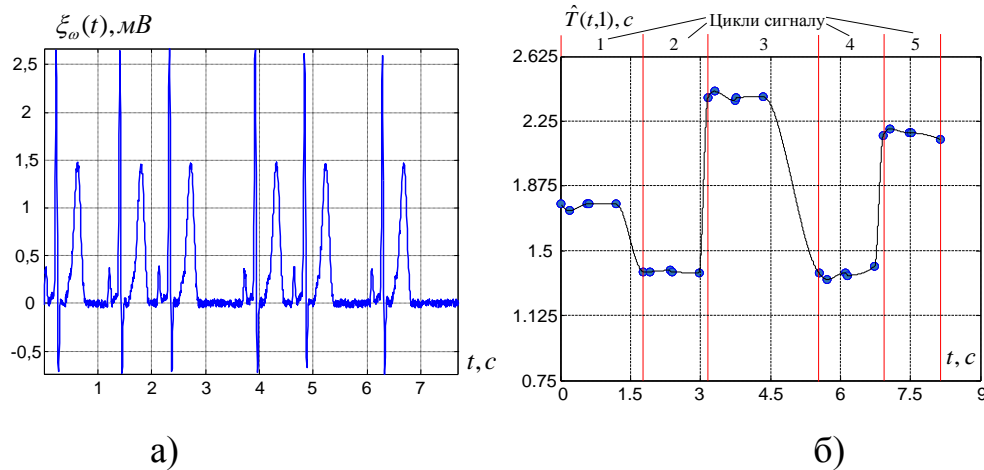


Рис. 4.7. Реалізація циклічного сигналу та інтерполяція дискретної ритмічної структури: а) реалізація електрокардіосигналу, діагноз – умовно здорова людина; б) результати оцінювання ритмічної структури змішаною інтерполяцією квадратичним сплайном та кусково-лінійною

Проводячи аналіз отриманих результатів (див. рис. 4.7, б) слід сказати, що в даному випадку між відліками $t = 2.25-3$ с та $t = 6.1-6.9$ с не спостерігаються викиди (осциляції) сплайна, як у попередньому методі (див. рис. 4.3, б). Крім цього, даний метод оцінювання ритмічної структури не володіє недоліком попереднього методу, пов'язаного із неврахуванням останнього відліку дискретної ритмічної структури також для даного прикладу немає осциляцій сплайн-функції на відповідних сегментах, як у випадку попереднього методу.

На рисунку 4.8 у вигляді структурної схеми наведено алгоритмічне забезпечення розробленого методу оцінювання ритмічної структури методом змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної інтерполяції.

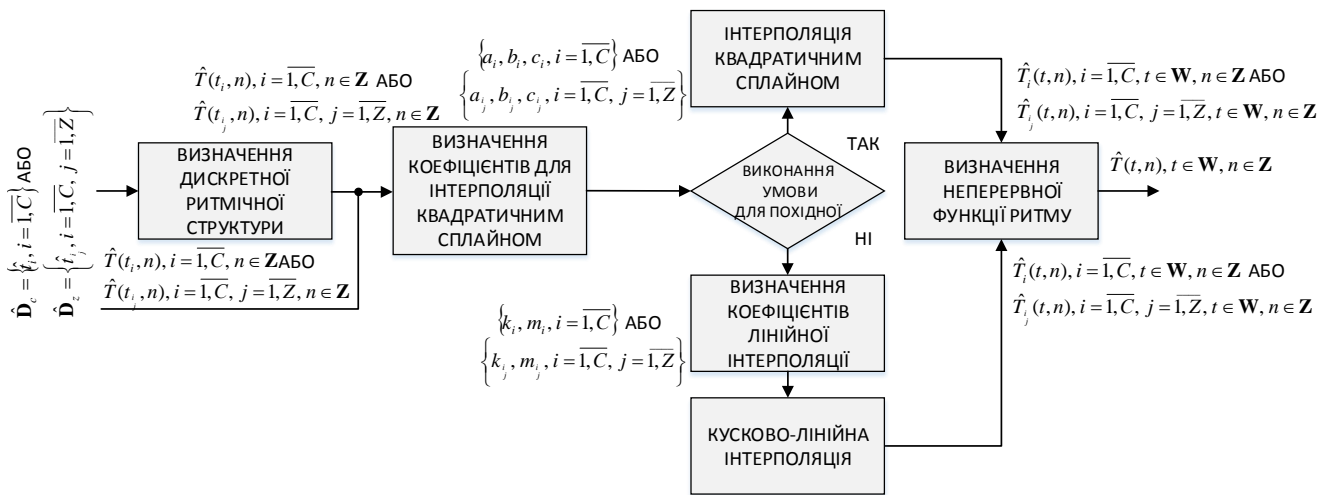


Рис. 4.8. Структурна схема методу оцінювання дискретної ритмічної структури циклічного сигналу методом змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної функції

Аналогічно до структурної схеми попереднього методу (див. рис. 4.4) оцінювання ритмічної структури відбувається за подібним алгоритмом. Далі розглянемо метод оцінювання ритмічної структури з використанням кубічних сплайнів.

4.4. Метод оцінювання ритмічної структури за допомогою змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної

За цим методом, так само, як і в попередньому, будемо використовувати нелінійний вид інтерполяційної функції, оскільки природно за невизначеної закономірності значень ритмічної структури, які знаходяться між відповідними відліками меж сегментів-зон та сегментів-циклів сегментної структури, використовувати різні види інтерполяційної функції. Розглянемо відомий вид інтерполяції – інтерполяція кубічним сплайном [316].

4.4.1. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній циклічній структурі. Інтерполяційна функція $\hat{T}(t, 1), n = 1, t \in \mathbf{W}$ дискретної ритмічної структури $\{\hat{T}(t_i, 1)\}, i = \overline{1, C}, t_i \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$, яка відповідає ідентифікованій сегментній зонній структурі для даного методу,

буде мати вигляд (4.1). При цьому множина інтерполяційних сплайнів [164, 316], буде визначатись

$$\hat{T}_i(t,1) = d_i \cdot (t - t_i)^3 + a_i \cdot (t - t_i)^2 + b_i \cdot (t - t_i) + c_i, \quad (4.39)$$

де $t_i \leq t \leq t_{i+1}, t \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}$.

Таким чином, при інтерполяції кубічним сплайном ритмічної структури необхідно знайти не три, як в попередньому випадку, а чотири множини коефіцієнтів $\{a_i, i = \overline{1, C}\}, \{b_i, i = \overline{1, C}\}, \{c_i, i = \overline{1, C}\}$ та $\{d_i, i = \overline{1, C}\}$, що повністю визначають інтерполяційну функцію $\hat{T}(t,1)$ на кожному із визначених сегментів-циклів.

У ролі інтерполяційної функції на відрізку $[t_i, t_{i+1}]$, $i = \overline{1, C-1}$ приймаються кубічні сплайни (4.39). Для визначення невідомих коефіцієнтів запишемо формули для їх обчислення [164, 316]

$$a_{i+1} = \hat{T}(t_i,1), \quad a_{i+1} + b_{i+1}h_{i+1} + c_{i+1}h_{i+1}^2 + d_{i+1}h_{i+1}^3 = \hat{T}(t_{i+1},1), \quad (4.40)$$

де $h_{i+1} = t_{i+1} - t_i$,

$$b_{i+1} = \frac{\hat{T}(t_{i+1},1) - \hat{T}(t_i,1)}{h_{i+1}} - \frac{\hat{T}(t_{i+1},1) - \hat{T}(t_i,1)}{h_c} - \frac{h_{i+1}}{3} \cdot (c_{i+2} + 2 \cdot c_{i+1}), \quad b_c = \frac{\hat{T}(t_{i+1},1) - \hat{T}(t_i,1)}{h_c} - \frac{2 \cdot h_c \cdot c_c}{3}, \quad (4.41)$$

$$d_{i+1} = \frac{c_{i+2} - c_{i+1}}{3 \cdot h_{i+1}}, \quad d_c = -\frac{c_c}{3 \cdot h_c}, \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned}
c_1 = 0, c_c = 0, h_i \cdot c_i + 2 \cdot (h_i + h_{i+1}) \cdot c_{i+1} + h_{i+1} \cdot c_{i+2} = \\
= 3 \cdot \left(\frac{\hat{T}(t_{i+1}, 1) - \hat{T}(t_i, 1)}{h_{i+1}} - \frac{\hat{T}(t_i, 1) - \hat{T}(t_{i-1}, 1)}{h_i} \right), \quad (4.43)
\end{aligned}$$

де $i = \overline{1, C-2}$, $t_i \in \mathbf{W}$.

У випадку оцінювання ритмічної структури за допомогою методу інтерполяції кубічним сплайном похідна інтерполяційної функції буде мати вигляд

$$\hat{T}'_i(t, 1) = 3 \cdot d_i \cdot (t - t_i)^2 + 2 \cdot a_i \cdot (t - t_i) + b_i, \quad i = \overline{1, C}, t \in \mathbf{W}. \quad (4.44)$$

На практиці не завжди буде виконуватись умова (4.8) для виразу (4.44) із-за коефіцієнтів $\{a_i, i = \overline{1, C}\}$, $\{b_i, i = \overline{1, C}\}$, $\{c_i, i = \overline{1, C}\}$ та $\{d_i, i = \overline{1, C}\}$. Тому пропонуємо в методі інтерполяції кубічним сплайном дискретної ритмічної структури використовувати додаткову умову (4.8) при визначенні (4.44) для випадку невиконання умови заміняти інтерполяційну функцію (4.39) на лінійну функцію (4.9), коефіцієнти для якої визначаються за формулами (4.10), (4.11). При цьому похідні для виразу (4.9) завжди будуть більше за мінус одиницю (4.12).

При такому підході інтерполяція дискретної функції ритму для ідентифікованої сегментної циклічної структури зводиться до такої формули:

$$\begin{aligned}
& \hat{T}_i(t, 1) = \\
& = \begin{cases} d_i \cdot (t - t_i)^3 + a_i \cdot (t - t_i)^2 + b_i \cdot (t - t_i) + c_i, & \text{якщо (4.44), } \hat{T}'_i(t, 1) > -1, \\ k_i \cdot t + m_i, & \text{якщо (4.44), } \hat{T}'_i(t, 1) \leq -1, \end{cases} \quad (4.45)
\end{aligned}$$

де $i = \overline{1, C}$, $t \in \mathbf{W}$.

Застосуємо отримані вище співвідношення для оцінювання ритмічної структури різних циклічних сигналів. На рисунку 4.9 та 4.10, як приклад,

наведено реалізації циклічних сигналів та оцінено їх ритмічні структури розробленим методом.

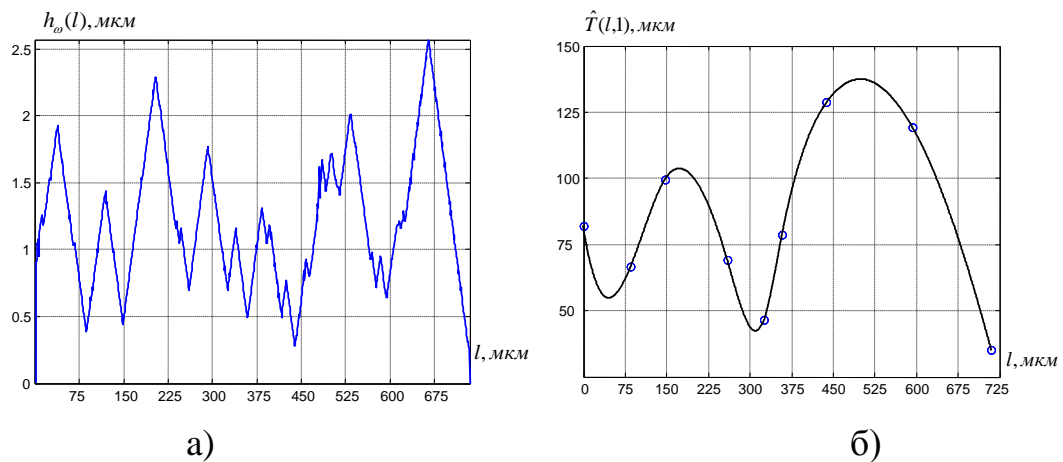


Рис. 4.9. Реалізація циклічного процесу та інтерполяція дискретної ритмічної структури: а) реалізація сигналу рельєфних утворень взірця сталі 15Х13МФ після лазерної ударно-хвильової обробки у воді, графік наведено у вигляді «ширина елемента рельєфа – довжина ділянки, що розглядається»; б) результати оцінювання ритмічної структури змішаною інтерполяцією кубічним сплайном та кусково-лінійною функцією

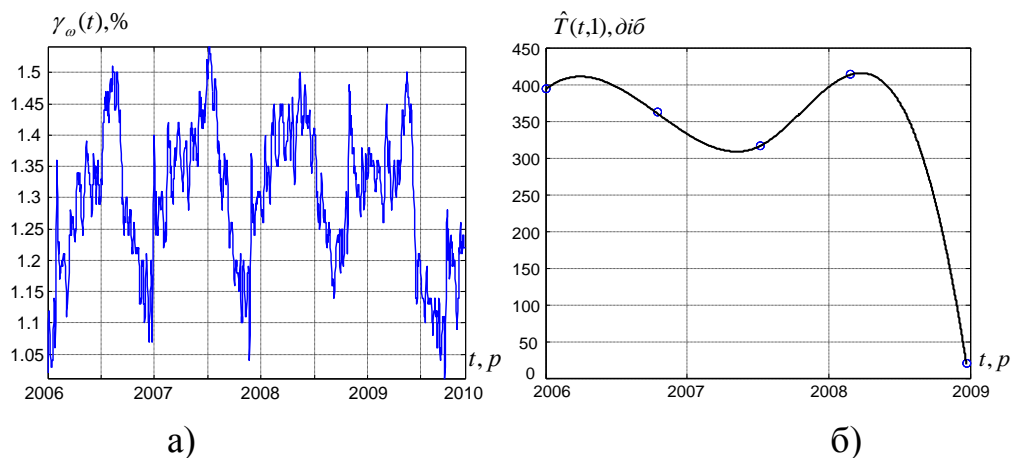


Рис. 4.10. Реалізація циклічного економічного процесу та інтерполяція дискретної ритмічної структури: а) реалізація економічних циклів – індекс активності автофінансування США; б) результати оцінювання ритмічної структури змішаною інтерполяцією кубічним сплайном та кусково-лінійною функцією

Для даного прикладу (див. рис. 4.9, б) та 4.10, б) умова для похідної виконалася на всіх сегментах-циклах, що відображено на графіку у вигляді інтерполяції кубічним сплайном.

За даним методом оцінювання ритмічної структури коефіцієнти інтерполяційного полінома визначаються, враховуючи значення двох сусідніх відліків. Тобто коефіцієнти завжди знаходяться для одного сегмента, тому даний метод не володіє недоліком, яким володіє метод оцінювання ритмічної структури, описаний у підрозділі 4.2.

4.4.2. Оцінювання дискретної ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній зонній структурі. Для випадку ідентифікованої сегментної зонної структури інтерполяційна функція $\hat{T}(t,1)$, $n=1$, $t \in \mathbf{W}$ дискретної ритмічної структури $\{\hat{T}(t_i,1)\}$, $i = \overline{1,C}$, $j = \overline{1,Z}$, $t_i \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$, для даного методу, буде мати вигляд (4.14). При цьому множина інтерполяційних сплайнів буде визначатись

$$\hat{T}_{i_j}(t,1) = d_{i_j} \cdot (t - t_{i_j})^3 + a_{i_j} \cdot (t - t_{i_j})^2 + b_{i_j} \cdot (t - t_{i_j}) + c_{i_j}, \quad (4.46)$$

де $t_{i_j} \leq t \leq t_{i_{j+1}}$, $t_{i_j} \in \mathbf{W}$, $i = \overline{1,C}$, $j = \overline{1,Z}$.

Таким чином, при інтерполяції кубічним сплайном ритмічної структури необхідно знайти чотири множини коефіцієнтів $\{a_{i_j}, i = \overline{1,C}, j = \overline{1,Z}\}$, $\{b_{i_j}, i = \overline{1,C}, j = \overline{1,Z}\}$, $\{c_{i_j}, i = \overline{1,C}, j = \overline{1,Z}\}$ та $\{d_{i_j}, i = \overline{1,C}, j = \overline{1,Z}\}$, що повністю визначають інтерполяційну функцію $\hat{T}(t,1)$ на кожному із визначених сегментів-зон.

Аналогічно до попереднього методу запишемо формули для визначення коефіцієнтів із урахуванням сегментної зонної структури [164, 316].

$$a_{i+1} = \hat{T}(t_j, 1), \quad a_{i+1} + b_{i+1} h_{i+1} + c_{i+1} h_{i+1}^2 + d_{i+1} h_{i+1}^3 = \hat{T}(t_{j+1}, 1), \quad (4.47)$$

де $h_{i+1} = t_{j+1} - t_j$,

$$b_{i+1} = \frac{\hat{T}(t_{j+1}, 1) - \hat{T}(t_j, 1)}{h_{i+1}} - b_{i+1} = \frac{\hat{T}(t_{j+1}, 1) - \hat{T}(t_j, 1)}{h_{i+1}} - \frac{\hat{T}(t_{j+1}, 1) - \hat{T}(t_j, 1)}{h_{i+1}} - \frac{h_{i+1}}{3} \cdot (c_{i+2} + 2 \cdot c_{i+1}) \quad (4.48)$$

$$d_{i+1} = \frac{c_{i+2} - c_{i+1}}{3 \cdot h_{i+1}}, \quad d_{i+1} = -\frac{c_{i+1}}{3 \cdot h_{i+1}}, \quad (4.49)$$

$$c_{i+1} = 0, \quad c_{i+1} = 0, \quad h_{i+1} \cdot c_{i+1} + 2 \cdot (h_{i+1} + h_{i+1}) \cdot c_{i+1} + h_{i+1} \cdot c_{i+2} = 3 \cdot \left(\frac{\hat{T}(t_{j+1}, 1) - \hat{T}(t_j, 1)}{h_{i+1}} - \frac{\hat{T}(t_j, 1) - \hat{T}(t_{j-1}, 1)}{h_{i+1}} \right), \quad (4.50)$$

де $i = \overline{1, C-2}$, $j = \overline{1, Z}$, $t_i \in \mathbf{W}$.

У випадку оцінювання ритмічної структури за допомогою методу інтерполяції кубічним сплайном похідна інтерполяційної функції буде мати вигляд

$$\hat{T}'_i(t, 1) = 3 \cdot d_{i+1} \cdot (t - t_i)^2 + 2 \cdot a_{i+1} \cdot (t - t_i) + b_{i+1} > -1, \quad i = \overline{1, C}, \quad j = \overline{1, Z}, \quad t \in \mathbf{W}. \quad (4.51)$$

На практиці не завжди буде виконуватись умова (4.21) із-за коефіцієнтів

$$\left\{ a_{i+1}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}, \quad \left\{ b_{i+1}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\}, \quad \left\{ c_{i+2}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z} \right\} \quad \text{та}$$

$\left\{d_i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\right\}$. Тому пропонуємо в методі оцінювання ритмічної структури

на основі інтерполяції кубічним сплайном, так само як і для випадку оцінювання дискретної ритмічної структури на основі змішаної інтерполяції – квадратичної та кусково-лінійної використовувати додаткову умову (4.21) для випадку невиконання умови заміняти інтерполяційну функцію (4.46) на функцію (4.22), коефіцієнти якої визначаються (4.23), (4.24). При цьому похідні для виразу (4.22) завжди будуть більше за мінус одиницю (4.25).

При такому підході інтерполяція дискретної ритмічної структури для ідентифікованої сегментної зонної структури зводиться до такої формули:

$$\hat{T}_j(t, 1) = \begin{cases} d_j \cdot (t - t_j)^3 + a_j \cdot (t - t_j)^2 + b_j \cdot (t - t_j) + c_j, & \text{якщо (4.51) } \hat{T}_j'(t, 1) > -1, \\ k_j \cdot t + m_j, & \text{якщо (4.51) } \hat{T}_j'(t, 1) \leq -1, \end{cases} \quad (4.52)$$

де $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, t \in \mathbf{W}$.

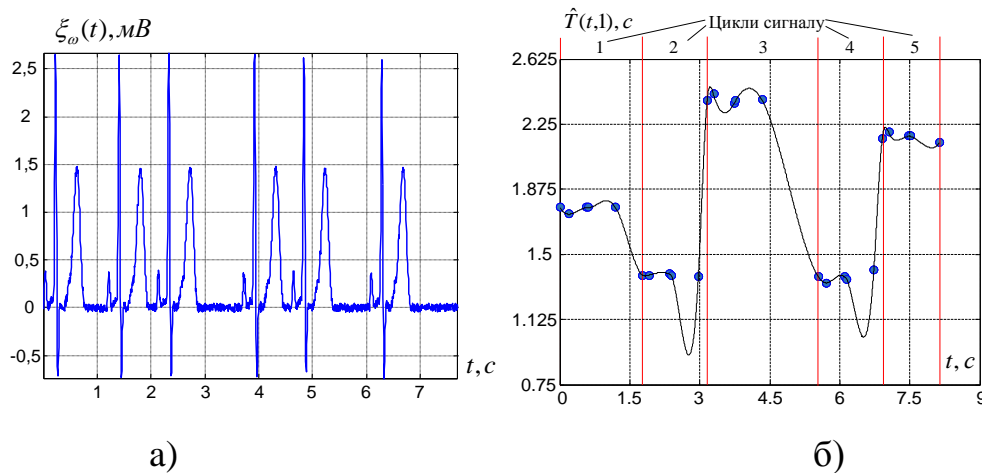


Рис. 4.11. Реалізація циклічного сигналу та інтерполяція дискретної ритмічної структури: а) реалізація електрокардіосигналу, діагноз – умовно здорова людина; б) результати оцінювання ритмічної структури змішаною інтерполяцією кубічним сплайном та кусково-лінійною

Застосуємо отримані вище співвідношення для оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів із сегментною зонною структурою. На рисунку 4.11, як приклад, наведено реалізацію циклічного сигналу (електрокардіосигналу) та оцінено ритмічну структуру даним методом.

Розроблений метод [164] також є простим методом побудови інтерполяційної функції. До недоліків його можна віднести значні викиди (осциляції) сплайна (див. рис. 4.11, б), відліки $t = 2.25-3$ с та $t = 6.1-6.9$ с. До переваг даного методу можна віднести плавну інтерполяцію ритмічної структури на сегментах.

На рисунку 4.12 у вигляді структурної схеми зображено алгоритмічне забезпечення розробленого методу оцінювання ритмічної структури методом змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної інтерполяції. Дана структура подібна до структурної схеми попереднього методу (див. рис. 4.8). Оцінювання ритмічної структури відбувається за подібним алгоритмом.

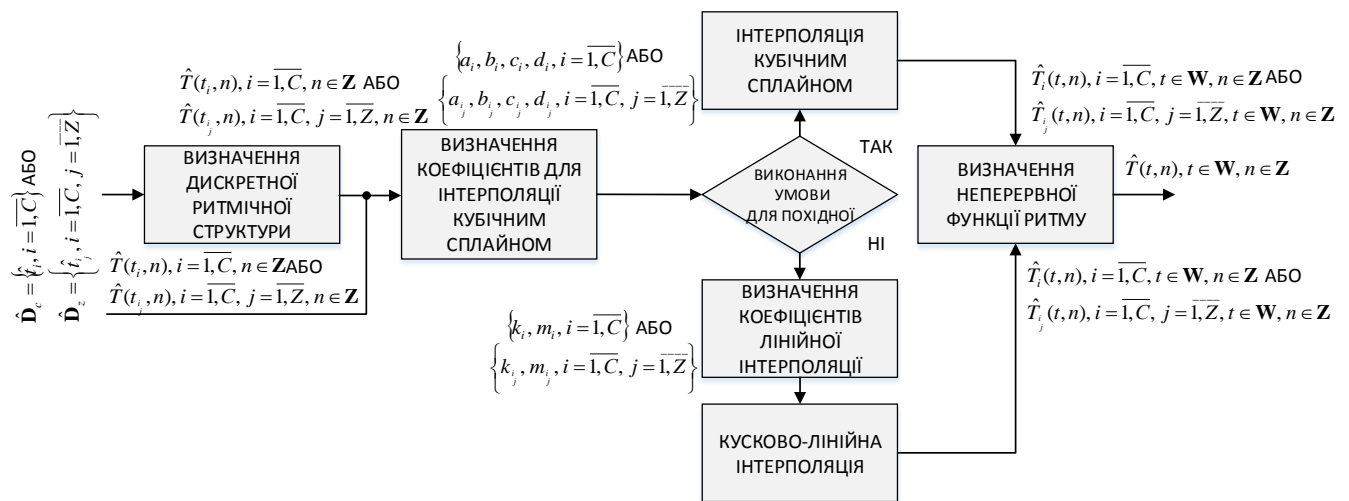


Рис. 4.12. Структурна схема методу оцінювання дискретної ритмічної структури циклічного сигналу методом змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції

Питання вибору того чи іншого методу оцінювання дискретної ритмічної структури, серед запропонованих, у загальному випадку складне, оскільки

невідомо, як себе поводить ритмічна структура в межах сегментів-циклів чи сегментів-зон. Для того, щоб обґрунтовано вибрати один із розроблених методів оцінювання ритмічної структури (відповідний метод інтерполяції), необхідно мати критерій оптимального вибору інтерполяційного полінома.

Для того, щоб розробити такий критерій, необхідна додаткова інформація про відліки ритмічної структури (її елементи) в межах сегментів-циклів чи сегментів-зон, а методи сегментації такої інформації не дають, лише дають інформацію про відліки меж відповідних сегментів. З метою отримання додаткових елементів ритмічної структури (її відліків) у межах сегментів-циклів чи сегментів-зон розроблено наступний метод.

Питання точності оцінювання ритмічної структури розробленими методами також залежить від кількості відліків ідентифікованої сегментної структури. Чим більше відліків сегментної структури, тим більше відліків ритмічної структури і тим вища буде точність оцінювання неперервної ритмічної структури. Питання аналізу точності розробленого методу та її порівняння з іншими методами буде розглянуто далі.

4.5. Метод оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів (відліків)

З метою отримання більше інформації про елементи (відліки) дискретної ритмічної структури, ніж дозволяють отримати сегментації, розглянемо метод оцінювання дискретної ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів, який наведено в роботі [420].

Після того, як проведена ідентифікація сегментної структури, визначена сегментна циклічна $\mathbf{D}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$ чи сегментна зонна структура $\mathbf{D}_z = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ ми отримаємо інформацію про межі сегментів, які відображаються відліками відповідної ритмічної структури.

Постановка задачі оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її

додаткових елементів (відліків) полягає у визначенні множини відліків $t_{i,g} \in \mathbf{W}$, $i = \overline{1,C}$, $g = \overline{1,G}$ для ритмічної циклічної структури $\{\hat{T}(t_i, 1)\}$, $t_i \in \mathbf{W}$, яка відповідає сегментній циклічній структурі $\mathbf{D}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1,C}\}$, при яких $t_i < t_{i,g} < t_{i+1}$, $t_{i,g}, t_i \in \mathbf{W}$, $i = \overline{1,C}$, $g = \overline{1,G}$, або полягає у визначенні множини відліків $t_{i,j,g} \in \mathbf{W}$, $i = \overline{1,C}$, $j = \overline{1,Z}$, $g = \overline{1,G}$ для ритмічної зонної структури $\{\hat{T}(t_{i,j}, 1)\}$, $t_{i,j} \in \mathbf{W}$, яка відповідає сегментній зонній структурі $\mathbf{D}_z = \{\hat{t}_{i,j}, i = \overline{1,C}, j = \overline{1,Z}\}$, при яких $t_{i,j} < t_{i,j,g} < t_{i,j+1}$, $t_{i,j,g}, t_{i,j} \in \mathbf{W}$, $i = \overline{1,C}$, $j = \overline{1,Z}$, $g = \overline{1,G_j}$, де G - кількість додаткових відліків на відповідних сегментах-циклах; G_j - кількість додаткових відліків на відповідних сегментах-зонах ритмічної структури. Їх кількість на всіх сегментах має бути однакою, тобто $G = \sum_{j=1}^Z G_j$. При цьому множина додаткових відліків відповідає однофазним значенням циклічного сигналу (циклічної функції) на відповідних сегментах, або іншими словами, це – множина додаткових елементів (відліків) ритмічної структури, для яких виконуються умови ізоморфізму відліків циклічного сигналу (циклічної функції) та рівність значень за атрибутом (атрибутами). Тобто виконуються умови (2.37), (2.38) для відліків у межах сегментів-циклів та (2.40), (2.41) – для відліків у межах сегментів-зон.

З метою розв'язку поставленої задачі розглянемо розроблений метод визначення додаткових елементів (відліків) дискретної ритмічної структури. Суть методу полягає у наступному. По-перше, моделюється реалізація ритмічно пов'язаного циклічного сигналу з досліджуванним. Ритмічна пов'язаність полягає у використанні однієї й тієї ж дискретної ритмічної структури досліджуваного циклічного сигналу $\{\hat{T}(t_i, 1)\}$, $t_i \in \mathbf{W}$ – для ідентифікованої сегментної циклічної структури $\mathbf{D}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1,C}\}$ або $\{\hat{T}(t_{i,j}, 1)\}$, $t_{i,j} \in \mathbf{W}$ – для ідентифікованої сегментної зонної структури $\mathbf{D}_z = \{\hat{t}_{i,j}, i = \overline{1,C}, j = \overline{1,Z}\}$. Моделювання такої реалізації відбувається шляхом масштабування незалежного репрезентативного циклу (при

цьому кількість масштабованих циклів дорівнює C кількості циклів досліджуваної реалізації циклічного сигналу), наприклад першого циклу $f_1(t), t \in \mathbf{W}_1$, циклічного сигналу та послідовним їх «зшиванням» по циклах в одну реалізацію. Даний підхід можна використовувати (в рамках двох моделей циклічних сигналів – детермінованої та стохастичної).

Якщо використовується стохастичний підхід щодо обраної математичної моделі, тоді змодельовану реалізацію випадкового процесу розглядаємо як деяку детерміновану функцію, яка має невідповідні значення на відповідних сегментах-циклах чи сегментах-зонах. Необхідно відзначити: якщо використовується стохастичний підхід і відома оцінка математичного сподівання циклу досліджуваного циклічного сигналу $\hat{m}_\xi(t), t \in \mathbf{W}_1$, то вона може використовуватись як репрезентативний цикл, який буде масштабуватися. Ця інформація закладається в реалізацію $\dot{f}(t)$, яка моделюється, а та в свою чергу, буде розглядається як детермінована реалізація, яка має невідповідні значення на відповідних сегментах.

Розглянемо покроково даний метод. Він складається з двох етапів.

1). Використовуємо метод моделювання [184, 185, 200, 201] реалізації циклічного сигналу $\dot{f}(t), t \in \mathbf{W}$, ритмічно пов'язаного із вхідним циклічним сигналом $F(t), t \in \mathbf{W}$. Як відзначалося раніше, змодельований досліджуваний циклічний сигнал має однакову ритмічну структуру, шляхом масштабування незалежного репрезентативного циклу: першого циклу $f_1(t), t \in \mathbf{W}_1$ досліджуваної реалізації чи оцінювання математичного сподівання $\hat{m}_\xi(t), t \in \mathbf{W}_1$ (у випадку стохастичного підходу, коли відома оцінка математичного сподівання циклу) досліджуваного циклічного сигналу $\xi_\omega(t), t \in \mathbf{W}$, з урахуванням ритмічної циклічної структури $\{\hat{T}(t_i, 1)\}$, $t_i \in \mathbf{W}$ або ритмічної зонної структури $\{\hat{T}(t_j, 1)\}$, $t_j \in \mathbf{W}$. Алгоритм комп'ютерного моделювання детально розглянуто у п'ятому розділі дисертаційної роботи, підрозділ 5.5.

Розглянемо основні математичні співвідношення для даного етапу.

Змодельована реалізація ритмічно пов'язаного циклічно сигналу згідно з формулою (4.53) для випадку ідентифікованої сегментної циклічної структури

$$\dot{f}(t) = \sum_{i=1}^C \dot{f}_i(t), t \in \mathbf{W}, \quad (4.53)$$

де $\dot{f}_i(t)$ – i -ті незалежні сегменти-цикли ритмічно пов'язаного циклічно сигналу з вхідним $F(t)$.

Змодельована реалізація ритмічно пов'язаного циклічно сигналу згідно з формулою (4.54) для випадку ідентифікованої сегментної зонної структури

$$\dot{f}(t) = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^Z \dot{f}_{i_j}(t), t \in \mathbf{W}, \quad (4.54)$$

де $\dot{f}_{i_j}(t)$ – j -ті сегменти-зони i -их сегментах-циклах ритмічно пов'язаного циклічно сигналу з вхідним $F(t)$.

Оскільки сегментна зонна структура є вкладеною у сегментну циклічну структуру, то існує зв'язок між i -ми сегментами-циклами і j -ми сегментами-зонами в i -их сегментах-циклах ритмічно пов'язаного циклічно сигналу

$$\dot{f}_i(t) = \sum_{j=1}^Z \dot{f}_{i_j}(t), i = \overline{1, C}, t \in \mathbf{W}. \quad (4.55)$$

Оскільки сегментні структури пов'язані між собою, то ритмічні структури ритмічна циклічна та ритмічна зонна структури також пов'язані між собою. При цьому ритмічна зонна структура є вкладеною у ритмічну циклічну структуру.

Області визначення для відповідних сегментів-циклів чи сегментів-зон, які відповідають ритмічним структурами, мають зв'язок (2.17) та (2.18) відповідно.

Розглянемо другий етап розробленого методу спочатку для сегментної

циклічної структури і відповідної їй ритмічної циклічної структури $\{\hat{T}(t_i, 1)\}$, $t_i \in \mathbf{W}$.

4.5.1. Оцінювання ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній циклічній структурі. На цьому етапі реалізується другий крок методу оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів. При цьому здійснюється процедура вибору тих відліків із змодельованої реалізації $\dot{f}(t)$, значення яких рівні за атрибутом, тобто $p(t) = p(f(t)) \in \mathbf{A}$, $t \in \mathbf{W}$ відлікам з першого циклу (репрезентативного циклу). Для випадку ідентифікованої сегментної циклічної структури використовуємо (2.38). При цьому додатково перевіряється умова ізоморфізму відліків на відповідних сегментах-циклах (2.37). Враховуючи ці дві умови, або іншими словами можна сказати, що здійснюється вибір однофазних відліків із змодельованої реалізації, при цьому виконується умова (2.39).

2). Із змодельованої реалізації послідовно вибираються відліки з першого циклу $\dot{f}_1(t)$, $t \in \mathbf{W}_1$ і порівнюються з відліками наступних сегментів-циклів. При цьому необхідно виконання двох умов:

2.1). умова рівності атрибутів (рівності значень) для сегментної циклічної структури (4.56). При цьому враховується той відлік $\tilde{t}_{i,g}$, $g = l$ як додатково визначений елемент ритмічної структури при виконанні умови рівності атрибутів в усіх сегментах-циклах

$$p(\dot{f}_1(t_{1,l})) = p(\dot{f}_2(\tilde{t}_{2,l})) = \dots = p(\dot{f}_i(\tilde{t}_{i,l})) = \dots = p(\dot{f}_c(\tilde{t}_{c,l})), \quad i = \overline{2, C}, l = \overline{1, L}, \quad (4.56)$$

де $t_{1,l} \in \mathbf{W}_1$ - множина відліків першого циклу змодельованої реалізації; $\tilde{t}_{i,l} \in \mathbf{W}$, $\tilde{t}_{i,l} \notin \mathbf{W}_1$, $i = \overline{1, C}$, $l = \overline{1, L}$ - множина відліків на всій реалізації, окрім першого циклу (репрезентативного циклу);

2.2). умова ізоморфізму відліків на відповідних сегментах-циклах

$$t_{i,g} \leftrightarrow t_{i+1,g}, \dots; t_{i+1,g} > t_{i,g}, t_{i,g} \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, g = \overline{1, G}. \quad (4.57)$$

Якщо якась із двох умов на одному із сегментів-циклів не виконується, то відлік $\tilde{t}_{i,g} \neq t_{i,l}$ не враховується.

Аналогічно до описаного вище, визначення додаткових елементів дискретної ритмічної структури можна застосовувати умову, яка полягає у виборі однофазних значень і відповідних їм відліків із реалізації, яка змодельована, тобто приймаються відліки $\tilde{t}_{i,g}$ як додатково визначені при виконанні умови рівності фаз на всіх сегментах-циклах, тобто

$$f_{\varphi_{1,g}} = f_{\varphi_{2,g}} = \dots = f_{\varphi_{i,g}} = \dots = f_{\varphi_{c,g}}, i = \overline{1, C}, g = \overline{1, G}. \quad (4.58)$$

Якщо ця умова хоча б на одному сегменті-циклі не виконується, то відлік $\tilde{t}_{i,g}$ не враховується.

Після визначення всіх додаткових елементів (відліків) ритмічної структури формуємо нову дискретну ритмічну циклічну структуру (визначаються значення дискретної функції ритму), враховуючи отримані додаткові її елементи

$$\hat{T}(t_{i,g}, 1) = \tilde{t}_{i+1,g} - \tilde{t}_{i,g}, i = \overline{1, C}, g = \overline{1, G}. \quad (4.59)$$

Розглянемо другий етап алгоритму для ідентифікованої сегментної зонної структури і відповідно ритмічної зонної структури $\{\hat{T}(t_j, 1)\}, t_j \in \mathbf{W}$.

4.5.2. Оцінювання ритмічної структури, що відповідає ідентифікованій сегментній зонній структурі. На цьому етапі так само реалізується другий крок методу оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів.

При цьому проводиться процедура вибору тих відліків із змодельованої

реалізації $\dot{f}(t)$, значення яких рівні за атрибутом, тобто $p(t) = p(f(t)) \in \mathbf{A}$, $t \in \mathbf{W}$ відлікам з першого циклу (репрезентативного циклу), для випадку ідентифікованої сегментної зонної структури зручно використовуємо (2.41). При цьому додатково перевіряється умова ізоморфізму відліків на відповідних сегментах-зонах (2.40). Враховуючи ці дві умови, або іншими словами можна сказати, що здійснюється вибір однофазних відліків із змодельованої реалізації, при цьому виконується умова (2.42).

2). Із змодельованої реалізації послідовно вибираються відліки з першого циклу $\dot{f}_1(t)$, $t \in \mathbf{W}_1$ і порівнюються з відліками наступних сегментів-циклів, при цьому необхідно виконання двох умов:

2.1). умова рівності атрибутів (рівності значень) для сегментної зонної структури (4.60). При цьому враховується той відлік $\tilde{t}_{j,g}$, $g = l$ як додатково визначений елемент ритмічної структури при виконанні умови рівності атрибутів в усіх сегментах-зонах на циклах.

$$p(\dot{f}_j(t_{1,l})) = p(\dot{f}_j(\tilde{t}_{1,l})) = \dots = p(\dot{f}_j(\tilde{t}_{i,l})) = \dots = p(\dot{f}_j(\tilde{t}_{c,l})), \quad (4.60)$$

$$i = \overline{2, C}, j = \overline{1, Z}, l = \overline{1, L}$$

де $t_{j,l} \in \mathbf{W}_1$ - множина відліків першого циклу змодельованої реалізації;

$\tilde{t}_{j,l} \in \mathbf{W}$, $\tilde{t}_{j,l} \notin \mathbf{W}_1$, $i = \overline{2, C}$, $j = \overline{1, Z}$, $l = \overline{1, L}$ - множина відліків на всій реалізації, окрім першого циклу (репрезентативного циклу);

2.2). умова ізоморфізму відліків на відповідних сегментах-зонах

$$t_{j,g} \leftrightarrow t_{j+1,g}, \dots; t_{j,g} > t_{j+1,g}, t_{j,g} \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, g = \overline{1, G}. \quad (4.61)$$

Якщо якась із двох умов на одному із відповідних сегментів-зон не виконуються, то відлік $\tilde{t}_{j,g} \neq t_{j,l}$ не враховується.

Аналогічно до описаного, визначення додаткових елементів дискретної ритмічної структури можна застосовувати умову, яка полягає у виборі однофазних значень і відповідних їм відліків із реалізації, яка змодельована, тобто приймаються відліки $\tilde{t}_{j,g}$ як додатково визначені при виконанні умови рівності фаз на всіх сегментах-зонах на циклах, тобто

$$f_{\varphi_{t_1}} = f_{\varphi_{t_2}} = \dots = f_{\varphi_{t_i}} = \dots = f_{\varphi_{t_c}}, \quad i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, g = \overline{1, G}. \quad (4.62)$$

Якщо ця умова хоча б на одному сегменті-зоні не виконується, то відлік $\tilde{t}_{j,g}$ не враховується.

Після визначення всіх додаткових елементів (відліків) ритмічної структури формуємо нову ритмічну зонну структуру (визначаються значення дискретної функції ритму), враховуючи отримані додаткові її елементи

$$\hat{T}(t_{j,g}, 1) = \tilde{t}_{j,g} - \tilde{t}_{j,g}, \quad i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, g = \overline{1, G}. \quad (4.63)$$

На рисунку 4.13 у вигляді структурної схеми наведено алгоритмічне забезпечення розробленого методу оцінювання дискретної ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів.

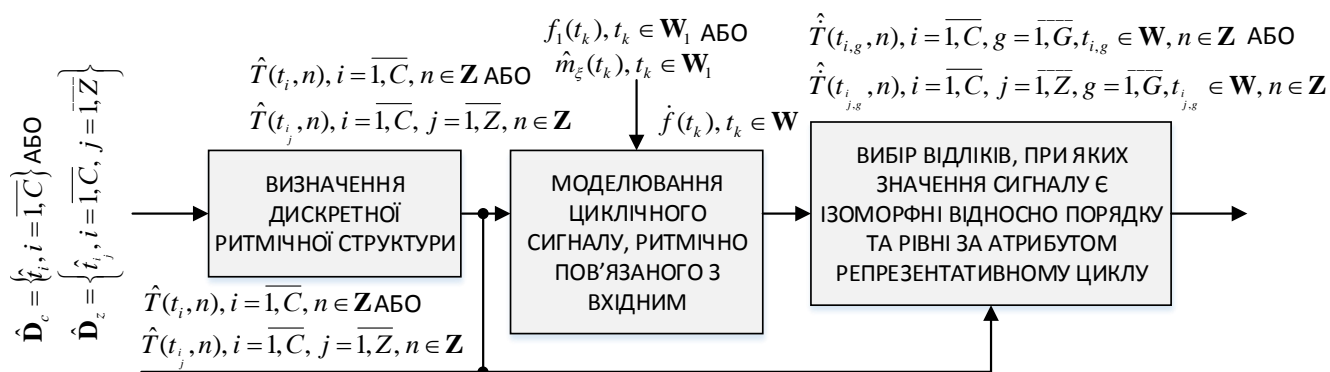


Рис. 4.13. Структурна схема методу оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів (відліків) циклічного сигналу

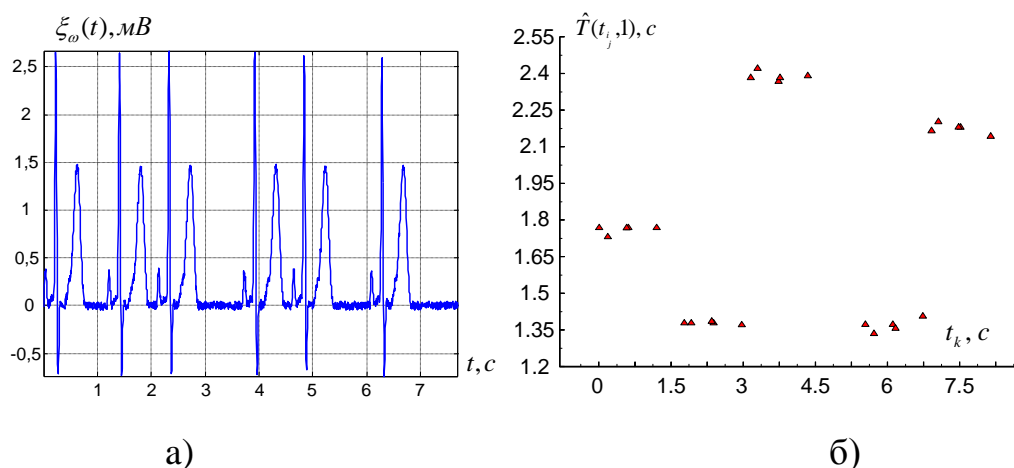


Рис. 4.14. Реалізація вхідного циклічного сигналу та оцінена його ритмічна структура: а) реалізація вхідного електрокардіосигналу, діагноз – умовно здорова людина; б) визначена дискретна ритмічна структура (трикутники – відліки дискретної ритмічної структури, кількість відліків рівно 24, для 5 циклів та 5 зон на них)

Застосуємо отримані вище співвідношення для оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів для випадку ідентифікованої сегментної зонної структури як узагальнений випадок. На рисунку 4.14 наведено приклад реалізації циклічного сигналу (електрокардіосигналу) та визначено його ритмічну структуру (див. рис. 4.14, б).

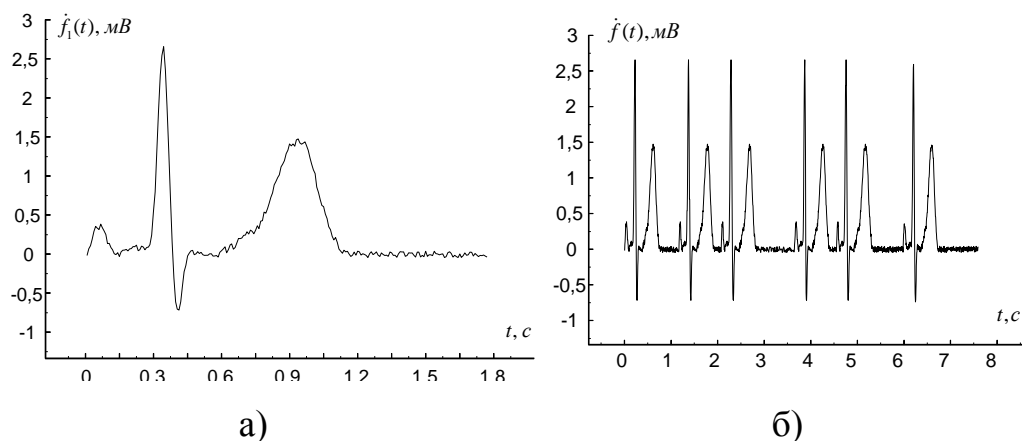


Рис. 4.15. Перший цикл вхідного циклічного сигналу та реалізація змодельованого циклічного сигналу (електрокардіосигналу), ритмічно пов'язаного з вхідним сигналом (див. рис. 4.14, а): а) перший цикл вхідного електрокардіосигналу (рис. 4.14, а); б) реалізація змодельованого циклічного сигналу

Даний приклад наведено з метою порівняння результатів оцінювання ритмічної структури розробленим методом з результатами методів, описаних вище для випадку дослідження ритмічної структури електродіагностичного сигналу (див. рис. 4.3, 4.7 та 4.11). На рисунку 4.15, б) наведена змодельована реалізація циклічного сигналу, процедура моделювання відбувалася шляхом масштабування циклу (рис. 4.15, а), при цьому враховувалася ритмічна зона структура, наведена на рисунку 4.14, б).

Застосувавши розроблений метод оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів, отримаємо результати, наведені на рисунку 4.16.

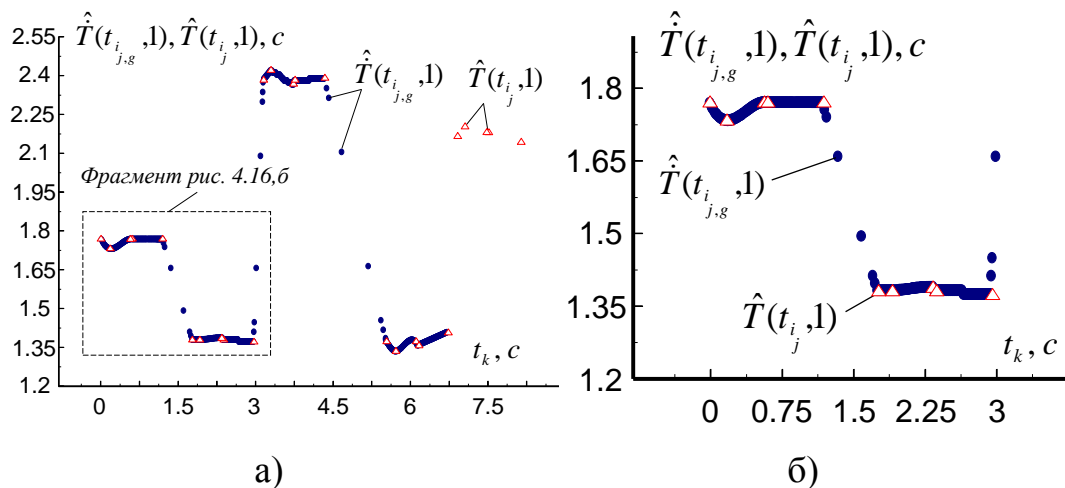


Рис. 4.16. Результати методу оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів: а) дискретна ритмічна структура та визначені її додаткові елементи (крапки – визначені додаткові елементи ритмічної структури, 633 відліки; трикутники – відліки ритмічної структури (визначені методами сегментації, 24 відліки); б) збільшений фрагмент визначених додаткових елементів ритмічної структури розробленим методом

Проводячи аналіз отриманих даних, необхідно сказати, що кількість відліків ритмічної структури, у випадку визначення їх методами сегментації складає 24, а у випадку застосування розробленого методу – 633, що на порядок більше. Таким чином, даний метод дозволяє отримати додаткову кількість елементів (відліків)

для ритмічної структури, які будуть враховуватися в наступних розроблених методах подальшого оцінювання ритмічної структури. Визначення похибок для методу оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів буде наведено у підрозділі 4.8.

Врахування отриманих додаткових відліків ритмічної структури і відповідних їм значень (фаз) у змодельованому циклічному сигналі, ритмічно пов'язаного з вхідним, дозволяють отримати реалізацію строго циклічного сигналу. Строга циклічність мислиться в розумінні того, що були вибрані всі однофазні значення на всіх сегментах-циклах чи сегментах-зонах (крок дискретизації такого сигналу нерівномірний). Це дає підстави розглядати даний метод як метод перетворення, трансформації (приведення) досліджуваного вхідного циклічного сигналу (у якого крок дискретизації рівномірний) у строго циклічний сигнал з нерівномірним кроком дискретизації (у якого кількість відліків на сегментах-циклах $l = \overline{1, L}$ чи сегментах-зонах $l = \overline{1, L_j}$ буде однаковою) і який є ритмічно пов'язаним із вхідним (див. рис. 4.17).

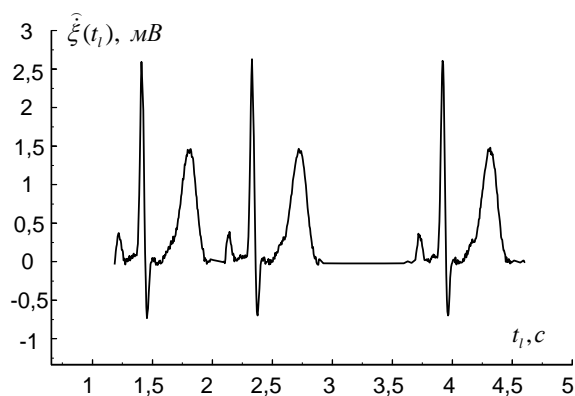


Рис. 4.17. Фрагмент реалізації електрокардіосигналу, отриманого з урахуванням визначених додаткових елементів ритмічної структури при приведенні вхідного циклічного сигналу з рівномірним кроком дискретизації (див. рис.4.14, а) до строго циклічного сигналу з нерівномірним кроком дискретизації

На рисунку 4.17 наведено реалізацію строго циклічного сигналу (з нерівномірним кроком дискретизації), який отримали шляхом застосування

процедури приведення, трансформації. На рисунку 4.17 бачимо, що ділянки між відліками $t=1.8-2.2$ с та $t=2.7-3.7$ с мають значення, що дорівнюють нулю, оскільки для цих сегментів не були враховані відліки ритмічної структури, які відповідають однофазним значенням змодельованої реалізації при застосуванні методу оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів.

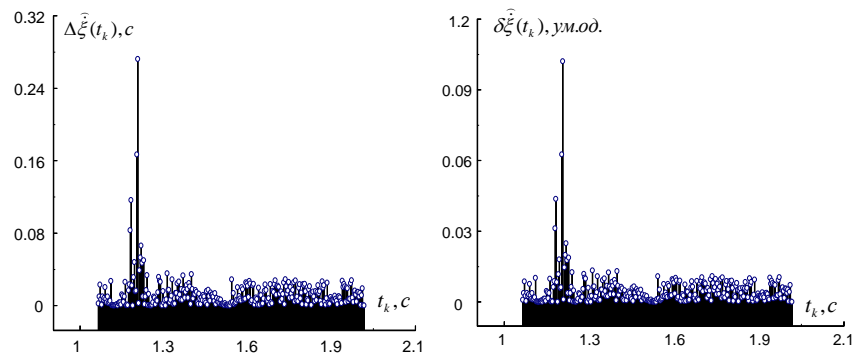


Рис. 4.18. Середньоквадратичні похибки значень (на циклі) між вхідним циклічним сигналом з рівномірним кроком дискретизації (див. рис. 4.14, а) та строго циклічним сигналом з нерівномірним кроком дискретизації (див. рис. 4.17)

На рисунку 4.18 наведено середньоквадратичні похибки значень між строго циклічним сигналом $\hat{\xi}(t_l)$ та досліджуваним вхідним $\xi_\omega(t_l)$. При цьому порівнювалися значення, які відповідають відлікам строго циклічного сигналу $\hat{\xi}(t_l)$. Для прикладу, відображено другий цикл, якому відповідають значення, що рівні за атрибутом, тобто рівні або мають мінімальне відхилення між значеннями вхідного циклічного сигналу $\xi_\omega(t_l)$ та $\hat{\xi}(t_l)$. Похибки визначалися за формулами, аналогічними (4.74) та (4.75), але для значень $\xi_\omega(t_l)$ та $\hat{\xi}(t_l)$. З отриманих результатів похибок випливає, що відносна середньоквадратична похибка приведення (трансформації) вхідного циклічного сигналу (з рівномірним кроком дискретизації) до строго циклічного сигналу (з нерівномірним кроком дискретизації) на другому циклі незначна (див. рис. 4.18, б), але при цьому не всі відліки були враховані на ділянці $t=1.6-2.0$ с, що зумовлено вибором лише

однофазних відліків в усіх циклах при застосуванні методу оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів.

Необхідно сказати, що при застосуванні процедури моделювання (перший етап даного методу) масштабування репрезентативного циклу здійснюється лінійно, враховуючи відповідні масштабні коефіцієнти та ритмічну структуру, відліки якої визначені методами сегментації. При цьому інформація про значення ритмічної структури, додаткові відліки якої ми визначаємо в межах відліків сегментної структури, може мати як лінійну, так і нелінійну залежності (ця інформація пов'язана із однофазними значеннями досліджуваного циклічного сигналу в наступних за першим сегментах-циклах). Тому інформація про відліки репрезентативного циклу (першого), що масштабується (яка може мати нелінійну залежність) не втрачається при лінійному масштабуванні репрезентативного циклу, а лише масштабується, враховуючи ритмічну пов'язаність із вхідним циклічним сигналом, зберігаючи закон зміни значень лінійний чи нелінійний в наступних циклах. За такого підходу отримані результати моделювання можуть бути використанні в подальших методах опрацювання, зокрема для оцінювання значень ритмічної структури на відповідних сегментах у межах відліків сегментної циклічної чи сегментної зонної структури.

Після проведення оцінювання ритмічної структури розробленим методом і визначення додаткових її елементів розглянемо метод оцінювання (вибору) інтерполяційного полінома на відповідному сегменті згідно з запропонованим критерієм його оптимального вибору.

4.6. Метод оцінювання оптимального полінома на сегменті в межах відліків сегментної структури

Врахування додаткових елементів ритмічної структури, яку дозволяє отримати розроблений метод оцінювання ритмічної структури, шляхом визначення її додаткових відліків, дозволило побудувати метод вибору оптимального полінома на сегменті. Це, в свою чергу, дозволило побудувати

метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічного сигналу. Розглянемо спочатку метод оцінювання та вибору оптимального полінома на сегменті, а далі – метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури.

Суть методу оцінювання оптимального полінома на сегменті полягає в апроксимації даних різними поліномами і вибір оптимального полінома на основі запропонованого критерію. В такому методі враховується відповідна оцінена дискретна ритмічна структура з отриманими додатковими її елементами, для ідентифікованої сегментної циклічної структури це $\left\{ \hat{T}(t_{i,g}, n), t_{i,g} \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z} \right\}$, а для ідентифікованої сегментної зонної структури – $\left\{ \hat{T}(t_{j,g}, n), t_{j,g} \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z} \right\}$.

Маючи достатню кількість відліків ритмічної структури (більше, ніж дають самі методи сегментації) можна оцінити вид кривої, яка краще (використовуючи запропонований критерій) описує значення ритмічної структури на відповідному сегменті. Для цього використовуємо метод найменших квадратів [21]. Опишемо, як працює даний метод, враховуючи його для нашого випадку. При цьому розглянемо спочатку всі математичні співвідношення для випадку ідентифікованої сегментної циклічної структури, а далі – для випадку сегментної зонної структури.

4.6.1. Оцінювання оптимального полінома, що описує ритмічну структуру в межах відліків ідентифікованої сегментної циклічної структури.

Вхідний ряд даних $\left\{ \hat{T}(t_{i,g}, 1), t_{i,g} \in \mathbf{W} \right\}$ дискретної ритмічної структури, оціненої методом визначення додаткових її елементів наближається многочленами $T_M(t_k), t_k \in \mathbf{W}$, степені $M = 1, 2, 3$

$$T_M(t_k) = \sum_{m=0}^M b_m t_k^m, \quad t_k \in \mathbf{W}. \quad (4.64)$$

Обмежимося степенем ($m \leq 3$), оскільки збільшення степеня полінома не дає кращих результатів при оцінюванні ритмічної структури. Збільшення степеня

більше трьох, при застосуванні метода найменших квадратів, не рекомендується [21].

1). Перша частина розробленого методу полягає у визначенні многочленів $T_M(t_k), t_k \in \mathbf{W}$, враховуючи вхідні дані $\left\{ \hat{T}(t_{i,g}, 1), t_{i,g} \in \mathbf{W} \right\}$.

Розпишемо окремо многочлени на лінійний, квадратичний та кубічний:

$$T_1(t_k) = b_1 t_k + b_0, t_k \in \mathbf{W}, \quad (4.65)$$

$$T_2(t_k) = b_2 t_k^2 + b_1 t_k + b_0, t_k \in \mathbf{W}, \quad (4.66)$$

$$T_3(t_k) = b_3 t_k^3 + b_2 t_k^2 + b_1 t_k + b_0, t_k \in \mathbf{W}, \quad (4.67)$$

де $b_m, m = \overline{0, M}, M = 1, 2, 3$ - коефіцієнти для кожного многочлена $T_M(t_k), t_k \in \mathbf{W}$.

У межах методу найменших квадратів визначення коефіцієнтів многочленів відбувається шляхом мінімізації квадрата різниць вихідної послідовності $\left\{ \hat{T}(t_{i,g}, 1), t_{i,g} \in \mathbf{W} \right\}$ і значень множини поліномів $\left\{ T_M(t_k), M = \overline{1, 3} \right\}$ на сегментах-циклах, які відповідають відлікам дискретної ритмічної структури $\left\{ \hat{T}(t_{i,g}, 1), t_{i,g} \in \mathbf{W} \right\}$.

Тобто коефіцієнти многочленів визначаються за формулою

$$\min \left(\hat{T}(t_{i,g}, 1) - T_M(t_k) \right)^2 = \min \left(\hat{T}(t_{i,g}, 1) - \sum_{m=0}^M b_m t_k^m \right)^2, M = \overline{1, 3}, t_k \in \mathbf{W}_i, \quad (4.68)$$

де $k = \overline{1, K}, g = \overline{1, G}, i = \overline{1, C}$.

Після визначення многочленів $T_M(t_k), t_k \in \mathbf{W}$ степені $M = 1, 2, 3$ використовуємо їх на відповідних сегментах-циклах, при перевірці умови (4.69).

Розглянемо другу частину даного методу, яка полягає у виборі

оптимального полінома.

2). Скористаємося запропонованим критерієм вибору оптимального полінома (4.69) для випадку ідентифікованої сегментної циклічної структури.

Умова вибору оптимального полінома є адаптивною:

$$\tilde{T}(t_k, 1) = \begin{cases} T_1(t_k), \text{ лінійний,} \\ T_2(t_k), \text{ квадратичний,} \\ T_3(t_k), \text{ кубічний,} \end{cases}$$

$$\text{для якого } \min \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{g=1}^G (\hat{T}(t_{i,g}, 1) - T_1(t_k))^2}, \\ \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{g=1}^G (\hat{T}(t_{i,g}, 1) - T_2(t_k))^2}, \\ \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{g=1}^G (\hat{T}(t_{i,g}, 1) - T_3(t_k))^2}. \end{cases} \quad t_k \in \mathbf{W}_i. \quad (4.69)$$

Використовуючи даний метод вибору оптимального полінома на сегменті враховується не сам поліном $\{T_M(t_k), M = \overline{1,3}\}$, а його вид, тобто поліном: лінійний, квадратичний чи кубічний. Ця інформація враховується в методі адаптивної ідентифікації ритмічної структури. Далі розглянемо основні математичні співвідношення для випадку ідентифікованої сегментної зонної структури і відповідної їй оціненій ритмічній структурі.

4.6.2. Оцінювання оптимального полінома, що описує ритмічну структуру в межах відліків ідентифікованої сегментної зонної структури.

Вхідний ряд даних $\left\{ \hat{T}(t_{i,j,g}, 1), t_{i,j,g} \in \mathbf{W} \right\}$ дискретної ритмічної структури, оціненої методом визначення додаткових її елементів, наближається многочленами $T_M(t_k), t_k \in \mathbf{W}$, степені $M = 1, 2, 3$ згідно з формулою (4.64).

1). Перша частина розробленого методу полягає у визначенні многочленів $T_M(t_k), t_k \in \mathbf{W}$, враховуючи вхідні дані $\left\{ \hat{T}(t_{i,j,g}, 1), t_{i,j,g} \in \mathbf{W} \right\}$.

Многочлени лінійний, квадратичний та кубічний визначаються згідно з

формулами (4.65)–(4.67).

У межах методу найменших квадратів визначення коефіцієнтів многочленів відбувається шляхом мінімізації квадрата різниць вихідної послідовності $\left\{ \hat{T}(t_{i_{j,g}}, 1), t_{i_{j,g}} \in \mathbf{W} \right\}$ і значень множини поліномів $\left\{ T_M(t_k), M = \overline{1,3} \right\}$ на сегментах-зонах, які відповідають відлікам дискретної ритмічної структури $\left\{ \hat{T}(t_{i_{j,g}}, 1), t_{i_{j,g}} \in \mathbf{W} \right\}$.

Тобто коефіцієнти многочленів визначаються за формулою

$$\min \left(\hat{T}(t_{i_{j,g}}, 1) - T_M(t_k) \right)^2 = \min \left(\hat{T}(t_{i_{j,g}}, 1) - \sum_{m=0}^M b_m t_k^m \right)^2, M = \overline{1,3}, t_k \in \mathbf{W}_j, \quad (4.70)$$

де $k = \overline{1, K}$, $g = \overline{1, G}$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$.

Після визначення многочленів $T_M(t_k), t_k \in \mathbf{W}$ степені $M = 1, 2, 3$ використовуємо їх на відповідних сегментах-зонах при перевірці умови (4.71).

Розглянемо другу частину даного методу, яка полягає у виборі оптимального полінома.

2). Скористаємося запропонованим критерієм вибору оптимального полінома (4.71) для випадку ідентифікованої сегментної зонної структури.

Умова вибору оптимального полінома є адаптивною:

$$\tilde{T}(t_k, 1) = \begin{cases} T_1(t_k), \text{ лінійний,} \\ T_2(t_k), \text{ квадратичний,} \\ T_3(t_k), \text{ кубічний,} \end{cases}$$

$$\text{для якого } \min \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{g=1}^G \left(\hat{T}(t_{i_{j,g}}, 1) - T_1(t_k) \right)^2}, \\ \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{g=1}^G \left(\hat{T}(t_{i_{j,g}}, 1) - T_2(t_k) \right)^2}, \\ \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{g=1}^G \left(\hat{T}(t_{i_{j,g}}, 1) - T_3(t_k) \right)^2}, \end{cases} t_k \in \mathbf{W}_j. \quad (4.71)$$

У даному випадку, так само, як і в попередньому, використовуємо даний

метод вибору оптимального полінома на сегменті враховується не сам поліном $\{T_M(t_k), M = \overline{1,3}\}$, а його вид, тобто поліном лінійний, квадратичний чи кубічний. Ця інформація враховується в методі адаптивної ідентифікації ритмічної структури.

При використанні даного методу покажемо зв'язки між відповідними відліками для оцінених ритмічних структур $t_{i,g}$, $t_{j,g}$ і відліками визначених многочленів t_k , які визначаються за формулами:

– для ритмічної циклічної структури

$$t_{i,g} = t_k, k = i \cdot g - (i - 1), i = \overline{1, C}, g = \overline{1, G}; \quad (4.72)$$

– для ритмічної зонної структури

$$t_{j,g} = t_k, k = i \cdot g \cdot j - (i \cdot j - 1), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, g = \overline{1, G}. \quad (4.73)$$

У даному методі не можна використовувати отриманий поліном на сегменті, тобто $\tilde{T}(t_k, 1)$ для оцінювання ритмічної структури в межах відліків сегментної структури, оскільки, використовуючи процедуру апроксимації даних на сегменті, ми не забезпечимо рівність значень на межі відповідного сегмента, заданого дискретними відліками ритмічної структури які відповідають відлікам сегментної структури. У нашому випадку для $\tilde{T}(t_k, 1)$ будуть розриви на межах відповідних сегментів. Тому даний метод вибору оптимального полінома на сегменті дозволяє лише оцінити вид кривої, яка краще (використовуючи запропонований критерій) описує дані й вибрати той чи інший поліном на сегментах серед лінійного, квадратичного чи кубічного.

Слід зауважити, що при визначенні середньоквадратичних відхилень значень поліномів (4.69), (4.71) від вхідних даних бувають випадки, коли значення визначених відхилень для різних поліномів рівні на сегменті. Тоді

приймається рішення про вибір того полінома (лінійний, квадратичний чи кубічний), який частіше зустрічається (тобто був до того попередньо визначений на однотипному сегменті в інших циклах). Таким чином для ритмічної структури вид вибраних поліномів на відповідних сегментах у межах циклів буде в більшості випадків подібним.

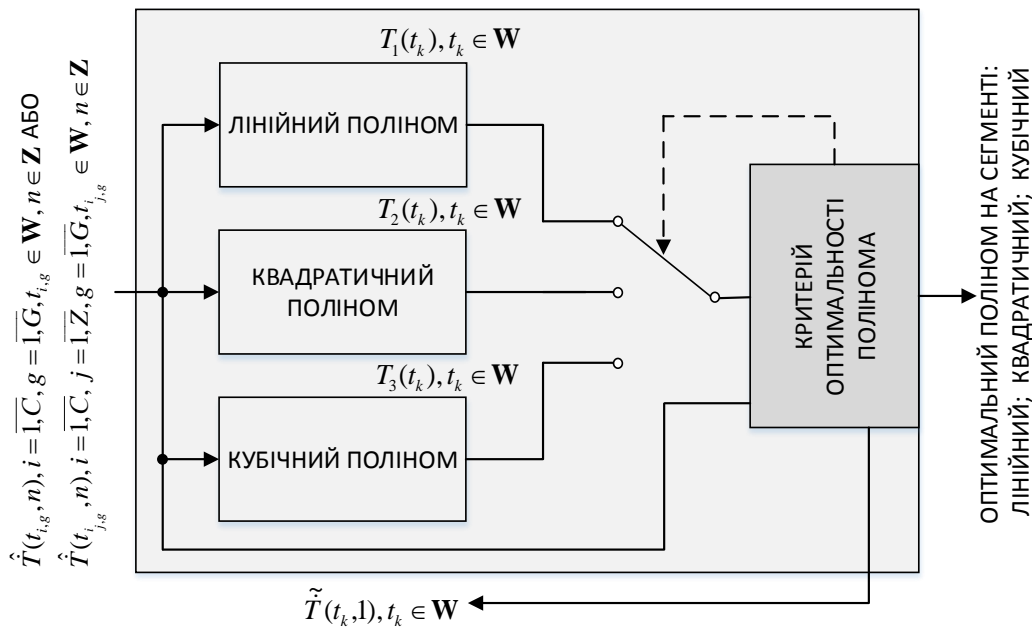


Рис. 4.19. Структурна схема методу оцінювання оптимального полінома на сегменті, який є складовою методу адаптивної ідентифікації дискретної ритмічної структури циклічного сигналу

На рисунку 4.19 у вигляді структурної схеми наведено алгоритмічне забезпечення розробленого методу оцінювання оптимального полінома на відповідному сегменті.

Застосовуючи критерій оптимальності полінома, на сегменті здійснюється послідовне перемикання ключа (див. рис. 4.19), проводиться аналіз поліномів $\{T_M(t_k), M = \overline{1, 3}\}$ і вхідної ритмічної структури для випадку ідентифікованої сегментної циклічної структури $\{\hat{T}(t_{i,g}, 1), t_{i,g} \in \mathbf{W}\}$ та для випадку ідентифікованої сегментної зонної структури $\{\hat{T}(t_{j,g}, 1), t_{j,g} \in \mathbf{W}\}$.

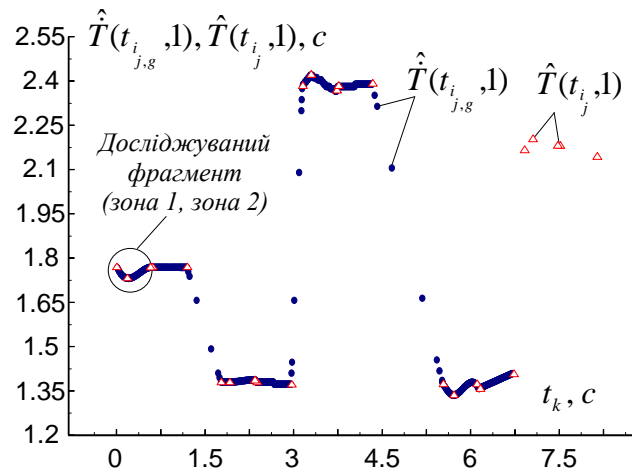


Рис. 4.20. Реалізація ритмічної структури, отриманої методом визначення додаткових елементів ритмічної структури (див. рис. 4.16), крапки – оцінені відліки ритмічної структури, 633 відліки; трикутники – відліки дискретної ритмічної структури, 24 відліки

На рисунку 4.20 наведена ритмічна структура (див. рис. 4.16), яку використаємо, як приклад, для пояснення розробленого методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури. Розглянемо як узагальнений випадок оцінену ритмічну зонну структуру методом визначення додаткових її елементів $\left\{ \hat{T}(t_{i,j,g}, 1), t_{i,j,g} \in \mathbf{W} \right\}$ і яка відповідає сегментній зонній структурі. Отримані дані будемо використовувати для застосування методу оцінювання ритмічної структури шляхом адаптивної її ідентифікації, для прикладу, досліджуваного фрагмента циклічного сигналу, ритмічна структура якого наведена на рисунку 4.20.

Розглянемо покроково, як працює метод визначення оптимального полінома на сегменті для випадку отриманих даних, наведених на рисунку 4.20, (для досліджуваного фрагмента). На рисунку 4.21 наведено результати визначених поліномів методом найменших квадратів, які визначались згідно з формулами (4.65)–(4.67).

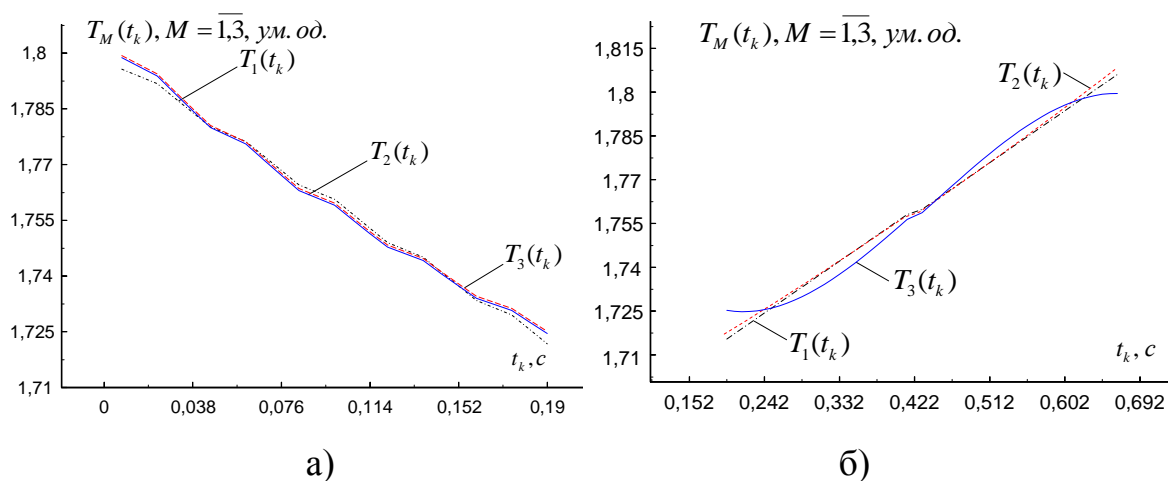


Рис. 4.21. Приклади визначених поліномів для сегментів-зон у першому циклі:
а) сегмент-зона 1 першого циклу; б) сегмент-зона 2 першого циклу

Результати отриманих середньоквадратичних відхилень визначених поліномів від значень ритмічної структури, враховуючи запропонований критерій (4.71) та вибрані види поліномів для сегментів, які розглядаються, зведено у таблицю 4.1, де сірим кольором позначені комірки з мінімальними значеннями серед середньоквадратичних відхилень (4.71). При цьому, враховуючи отримані результати були вибрані поліноми: квадратичний (для сегмента-зони 1) та кубічний відповідно (для сегмента-зони 2) першого циклу.

Таблиця 4.1

Приклад визначених значень середньоквадратичних відхилень для двох сегментів у першому циклі

Сегмент	Мінімальне значення серед середньоквадратичних відхилень		
	1	2	3
	Лінійний	Квадратичний	Кубічний
	$T_1(t_k)$	$T_2(t_k)$	$T_3(t_k)$
зона 1 ($j = 1$), першого циклу ($i = 1$)	0,37	0,061	0,085
зона 2 ($j = 2$), першого циклу ($i = 1$)	0,34	0,33	0,041

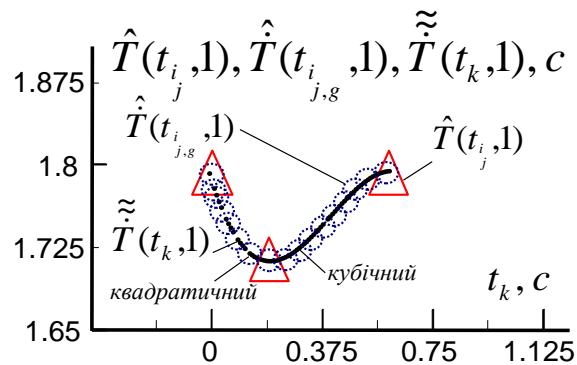


Рис. 4.22. Змасштабований фрагмент ритмічної структури (див. рис. 4.20): ритмічна структура визначена з використанням відліків, отриманих методами сегментації; визначена методом її оцінювання шляхом визначення її додаткових елементів; визначена методом адаптивної ідентифікації (подані для порівняння)

Після того, як вибраний вид полінома, для даного прикладу – це квадратичний та кубічний, розглянемо метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури. На рисунку 4.22 наведено змасштабований досліджуваний фрагмент ритмічної структури (див. рис. 4.20), оцінений розробленими методами для сегментів першої та другої зон першого циклу.

4.7. Метод оцінювання ритмічної структури шляхом адаптивної її ідентифікації

Враховуючи метод вибору оптимального полінома на сегменті, було розроблено метод оцінювання ритмічної структури шляхом адаптивної її ідентифікації, в якому використовуються всі описані вище методи оцінювання ритмічної структури. Структурна схема алгоритмічного забезпечення розробленого методу адаптивної ідентифікації зображена на рисунку 4.23.

На структурній схемі наведена інформація про ритмічні структури, яка отримується за допомогою методів її оцінювання, шляхом визначення її додаткових елементів та вибору оптимального полінома на сегменті. При цьому керування ключем (див. рис. 4.23) здійснюється залежно від оціненого виду полінома, який, в свою чергу, дозволяє вибрати один із видів інтерполяції

ритмічної структури. Тобто того чи іншого методу її оцінювання серед відомого (на структурній схемі позначено штрих-пунктиром) та розроблених методів оцінювання ритмічної структури на відповідному сегменті.

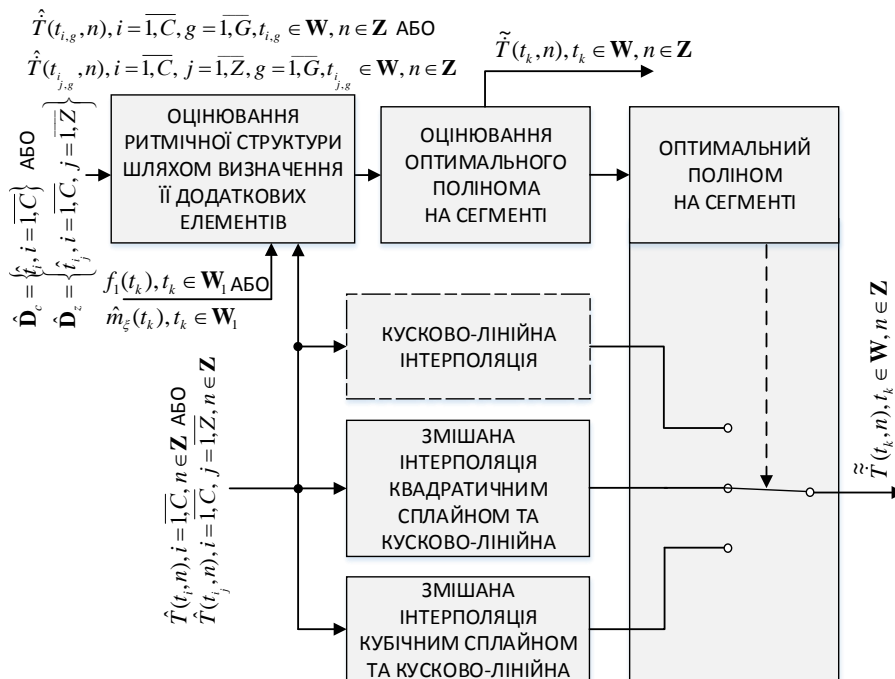


Рис. 4.23. Структурна схема методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічного сигналу

На рисунку 4.24, як приклад, наведено фрагмент реалізації ритмічної структури, оціненої розробленим методом її адаптивної ідентифікації.

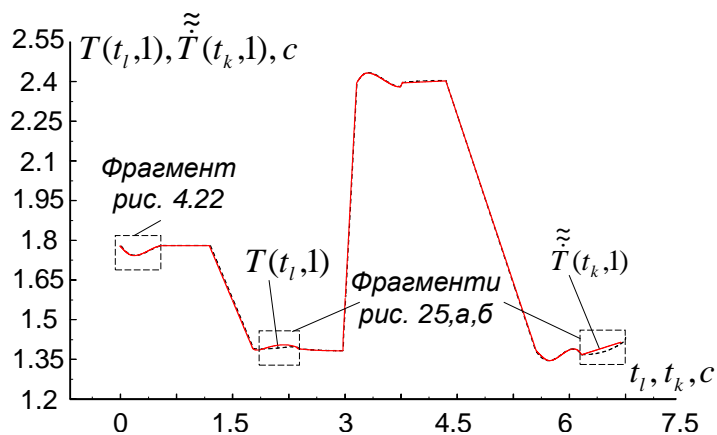


Рис. 4.24. Фрагмент результату оцінювання ритмічної структури методом адаптивної ідентифікації ($q = 5$) й тестова змодельована неперервна функція ритму

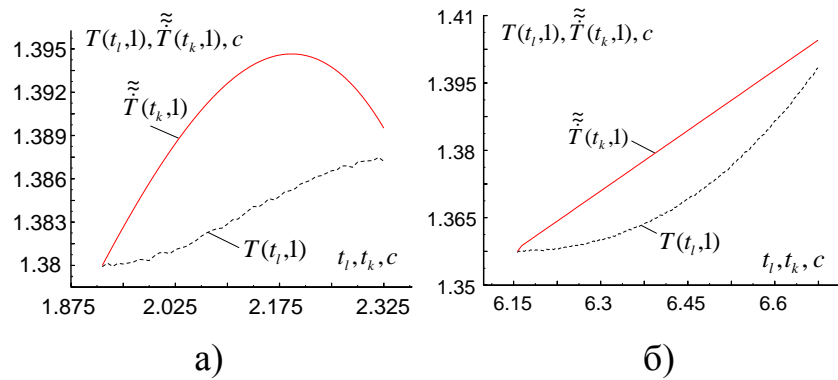


Рис. 4.25. Фрагменти реалізації оціненої ритмічної структури методом її адаптивної ідентифікації та змодельована неперервна функція ритму: а), б) оцінена функція ритму та змодельована (суцільна лінія – змодельована неперервна функція ритму, пунктирна лінія – оцінена функція ритму методом її адаптивної ідентифікації)

На рисунку 4.25 наведені збільшені фрагменти оціненої ритмічної структури методом адаптивної її ідентифікації. Вибір оптимального полінома значною мірою залежить від отриманої ритмічної структури на відповідному сегменті (визначених на етапі застосування методу визначення додаткових її елементів): чим більше буде отримано відліків, тим коректніше буде оцінений вид полінома. У випадку, коли тривалість сегмента мала, кількість отриманих додаткових елементів ритмічної структури на сегменті теж буде малою, що не дозволить об'єктивно оцінити вид полінома на досліджуваному сегменті. Такий недолік не проявляється на сегментах великої тривалості. Це, в свою чергу, впливає на результат адаптивної ідентифікації ритмічної структури. Чим більша тривалість сегмента, тим більше отримуємо додаткових відліків ритмічної структури на сегменті й тим коректніше буде оцінений вид полінома на цьому сегменті й відповідно точніше (в розумінні вибору методу оцінювання ритмічної структури на сегменті) буде проведено оцінювання ритмічної структури за рахунок методу адаптивної її ідентифікації. Для прикладу, на рисунку 4.24 наведено збільшені фрагменти ритмічних структур: ритмічна структура, отримана методом адаптивної її ідентифікації та змодельована неперервна функція ритму. На рисунку 4.25, а) внаслідок отриманої інформації про значення ритмічної

структури методом визначення додаткових її елементів був визначений квадратичний поліном (червона суцільна лінія). А у випадку, що наведено на рисунку 4.25, б) визначено лінійний поліном (червона суцільна лінія). Проте змодельовані дані неперервної функції ритму (чорна пунктирна лінія) на цих сегментах мають нелінійний характер, відмінний від встановленого.

Оскільки вибір методу оцінювання ритмічної структури в методі її адаптивної ідентифікації здійснюється за рахунок підбору виду інтерполянти серед лінійної, квадратичної чи кубічної на основі відомостей про вибір оптимального полінома, який коректніше відображає закон зміни значень ритмічної структури між відповідними межами сегментів-циклів чи сегментів-зон, тому можна говорити про адаптацію під час її оцінювання розробленим методом, а також підвищення точності оцінювання ритмічної структури за рахунок адаптивного її оцінювання.

4.8. Порівняльний аналіз точності відомого та розроблених методів оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів

Точність методів оцінювання ритмічної структури залежить від багатьох факторів [201, 205]. По-перше, залежить від точності й правильності визначення сегментної структури, моментів часу початку сегментів-циклів та сегментів-зон. По-друге, залежить від ступеня деталізації сегментної структури. Чим більше досліджуваний сигнал буде містити сегментів-зон на циклі, тим більше ми отримаємо інформації про відліки ритмічної структури, яка відповідає сегментній структурі й тим самим буде більша точність її оцінювання (точність інтерполяції). По-третє – від кількості оцінених додаткових відліків ритмічної структури. По-четверте – від виду інтерполяційного полінома, що лежатиме в основі методу оцінювання ритмічної структури. Щоб не закладати похибок на етапі сегментації циклічних сигналів, будемо проводити аналіз точності розроблених методів оцінювання ритмічних структур, моделюючи не самі циклічні сигнали й сегментуючи їх, а моделюючи й досліджуючи їх ритмічні структури. При цьому в

ритмічні структури, що моделюються, закладалась інформація про залежності значень ритмічної структури в межах сегментів як лінійні, так і нелінійні (квадратичні та кубічні).

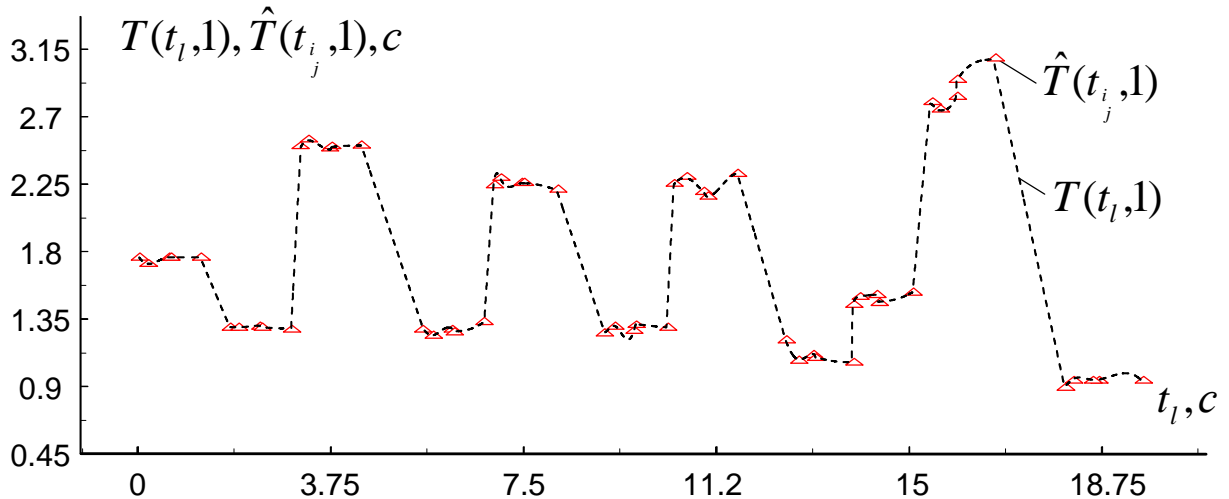


Рис. 4.26. Змодельована тестова неперервна функція ритму для оцінювання точності розроблених методів оцінювання ритмічної структури та вкладена в неї дискретна ритмічна структура, яка оцінювалася розробленими методами

Для аналізу точності розроблених методів оцінювання ритмічної структури змодельовано різні неперервні функції ритму циклічних сигналів. Як приклад, на рисунку 4.26 зображена одна неперервна функція ритму (дискретна ритмічна структура, вкладена в неперервну, яка оцінювалася розробленими методами, показана трикутниками).

Похибки, згідно з якими визначалася точність оцінюваних ритмічних структур розробленими методами, наведено в роботах [164, 205]. Для оцінювання точності ритмічних структур використовували формули (4.74) та (4.75).

Середньоквадратичні абсолютна та відносна похибки

$$\Delta T_q(t_k) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (T(t_l, 1) - \hat{T}_q(t_l, 1))^2}, \quad k = \overline{1, L}, q = \overline{1, 5}, \quad (4.74)$$

$$\delta T_q(t_k) = \frac{\Delta T_q(t_k)}{\sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{T}_q(t_l, 1)^2}}, \quad k = \overline{1, L}, q = \overline{1, 5}, \quad (4.75)$$

де $T(t_l, 1)$ - значення змодельованої неперервної функції ритму; $\hat{T}_q(t_l, 1)$ - оцінена ритмічна структура одним із розроблених методів та відомим ($q = \overline{1, 5}$); L - кількість відліків ритмічної структури, $l = \overline{1, L}$; t_k - відлік для абсолютної та відносної похибок відповідно, $k = \overline{1, L}$.

На рисунках 4.27–4.34 наведено оцінені ритмічні структури розробленими методами та визначено середньоквадратичні похибки – абсолютна та відносна для кожного із розроблених методів.

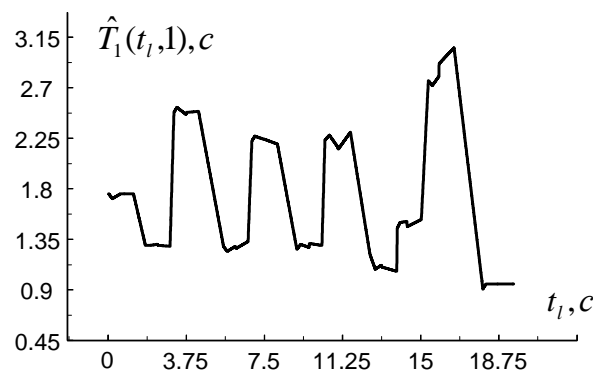


Рис. 4.27. Оцінена ритмічна структура відомим методом кусково-лінійної інтерполяції ($q = 1$)

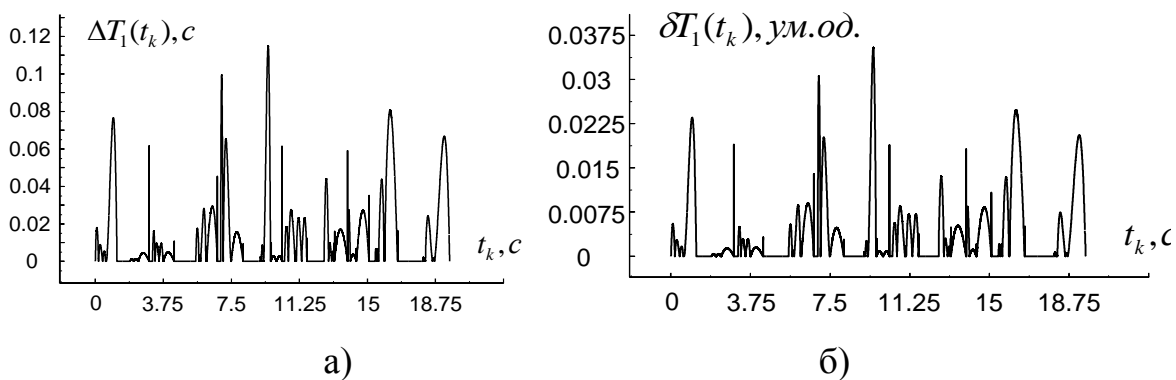


Рис. 4.28. Середньоквадратичні абсолютна та відносна похибки для відомого методу кусково-лінійної інтерполяції: а) абсолютна похибка оціненої ритмічної структури; б) відносна похибка оціненої ритмічної структури

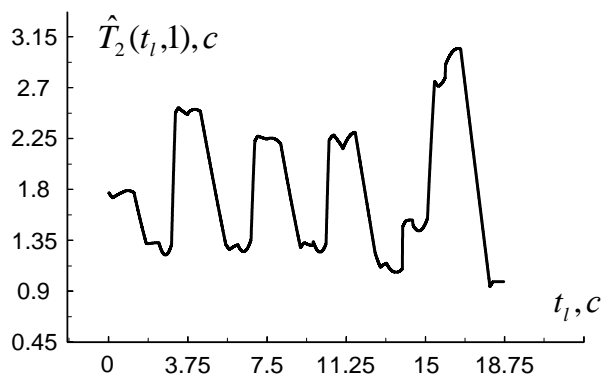


Рис. 4.29. Оцінена ритмічна структура розробленим методом змішаної інтерполяції кусково-квадратичної та кусково-лінійної ($q = 2$)

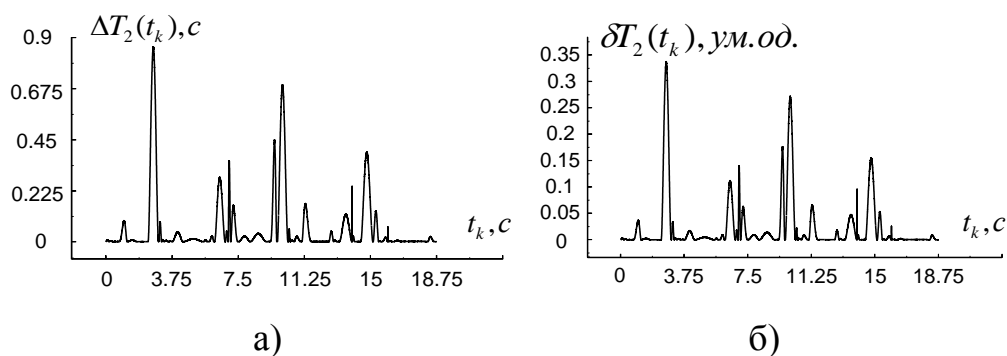


Рис. 4.30. Середньоквадратичні абсолютна та відносна похибки для методу змішаної інтерполяції кусково-квадратичної та кусково-лінійної: а) абсолютна похибка оціненої ритмічної структури; б) відносна похибка оціненої ритмічної структури

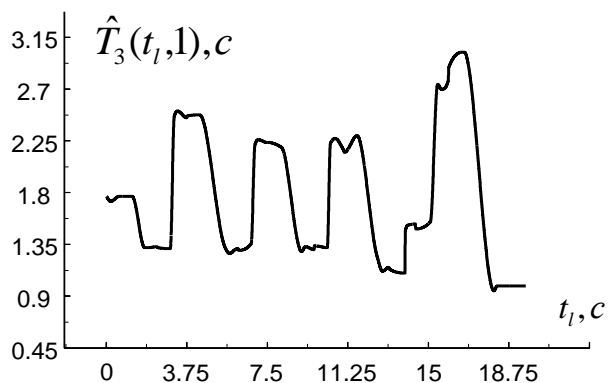


Рис. 4.31. Оцінена ритмічна структура розробленим методом змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної ($q = 3$)

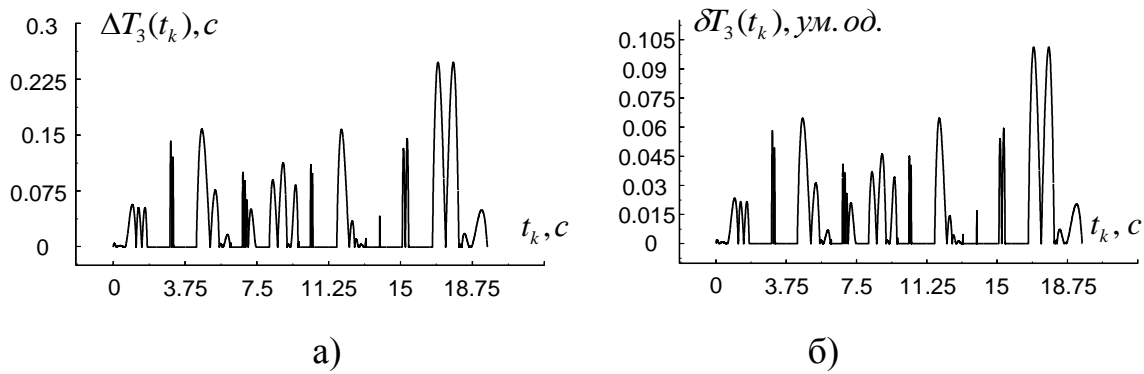


Рис. 4.32. Середньоквадратичні абсолютна та відносна похибки для методу змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної: а) абсолютна похибка оціненої ритмічної структури; б) відносна похибка оціненої ритмічної структури

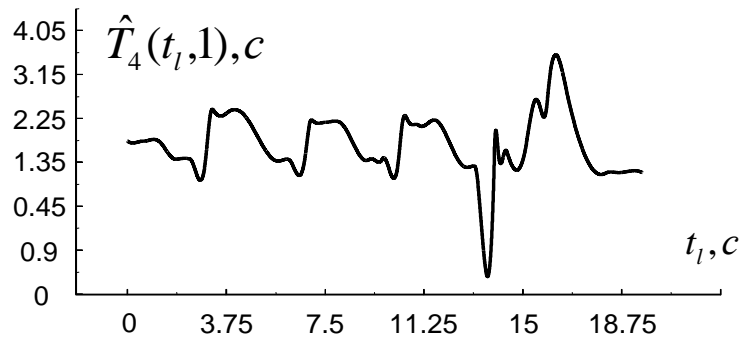


Рис. 4.33. Оцінена ритмічна структура розробленим методом змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної ($q = 4$)

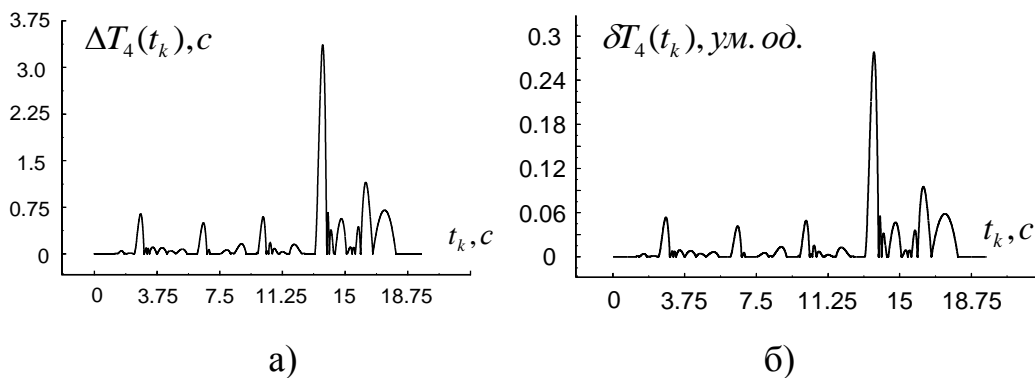


Рис. 4.34. Середньоквадратичні абсолютна та відносна похибки для методу змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної: а) абсолютна похибка оціненої ритмічної структури; б) відносна похибка оціненої ритмічної структури

Серед оцінених ритмічних структур (див. рис. 4.27, 4.29, 4.31, 4.33) можна побачити, що в деяких випадках на сегментах спостерігаються значні викиди (осциляції), як це у випадку ритмічної структури (див. рис. 4.33). Це зумовлено визначеними коефіцієнтами інтерполяційного полінома врахованого в методі (для даного прикладу – кубічного). Проводячи аналіз отриманих похибок, необхідно відзначити, що методи оцінювання ритмічної структури шляхом змішаної інтерполяції кусково-квадратичної та кусково-лінійної, а також інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної, що аналізуються, дають більшу відносну похибку серед максимальних її значень (див. рис. 4.30, б) та 4.34, б). Ці похибки на межі сегментів значно вищі, ніж у його середині й пов'язані з вибором і врахуванням крайових умов у методах інтерполяції. Проте на багатьох сегментах значення їх відносних похибок менше в порівнянні з відносними похибками інших методів (див. рис. 4.28 та 4.32).

В методі адаптивного ідентифікації ритмічної структури врахована можливість адаптуватися під оцінені значення дискретної ритмічної структури на сегментах-зонах чи сегментах-циклах, за рахунок вибору типу інтерполяційної функції (вибору методу оцінювання ритмічної структури), враховуючи розроблені та відомий методи оцінювання ритмічної структури.

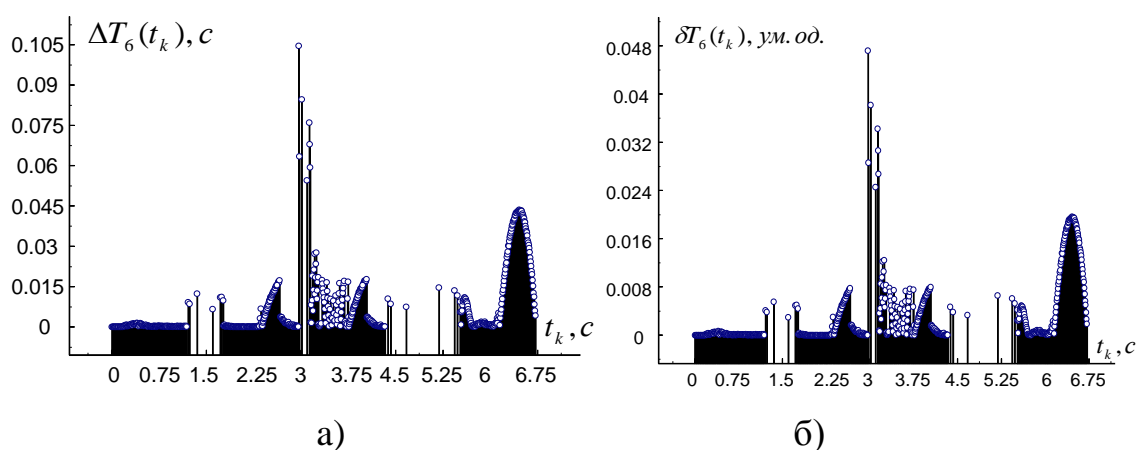


Рис. 4.35. Середньоквадратичні абсолютні та відносні похибки для методу оцінювання ритмічної структури шляхом визначення додаткових її елементів: а) абсолютна похибка оціненої ритмічної структури; б) відносна похибка оціненої ритмічної структури ($q = 6$)

Розглянемо спочатку похибки, які дає метод оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів і який входить у метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури. Для цього порівнюємо ритмічну структуру змодельованої неперервної функції ритму (див. рис. 4.27) з оціненою ритмічною структурою методом визначення додаткових її елементів (див. рис. 4.16). Результати середньоквадратичних абсолютної та відносної похибок наведено на рисунку 4.36.

З отриманих результатів випливає, що ділянки між відліками отриманих похибок $t=0.9-1.7$ с, $t=2.9-3.1$ с і $t=4.48-5.5$ с мають мало визначених відліків за допомогою методу оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів (відліків). Тому відносна середньоквадратична похибка на цих ділянках може складати 0,6–4,8%. Відзначимо, що дана похибка є невеликою, вона не перейде як складова в результуючу похибку оцінювання ритмічної структури за рахунок методу її адаптивної ідентифікації, а також несуттєво вплине на отриманий результат, оскільки дана похибка впливає лише на коректність оцінювання виду полінома, який описує значення додатково визначених елементів ритмічної структури в методі визначення оптимального полінома на сегменті.

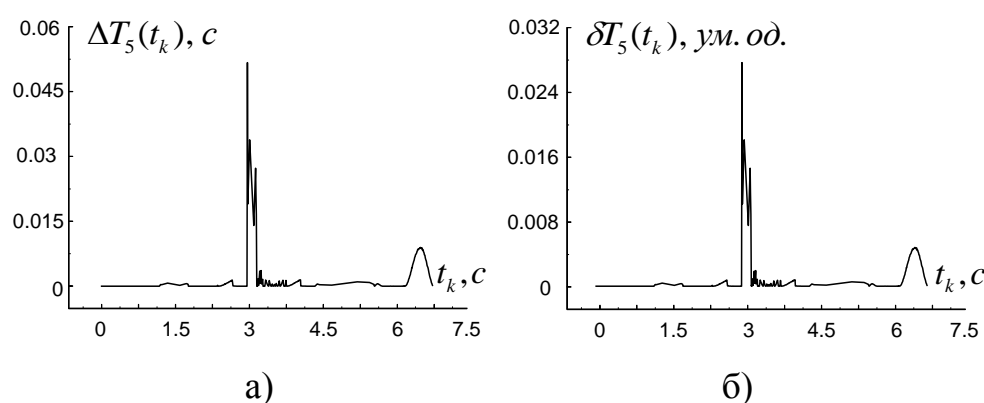


Рис. 4.36. Фрагмент отриманих середньоквадратичних абсолютної та відносної похибок для методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури: а) абсолютна похибка оціненої ритмічної структури; б) відносна похибка оціненої ритмічної структури ($q = 5$)

На рисунку 4.36 наведено фрагменти оцінених середньоквадратичних абсолютної та відносної похибок при застосуванні методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури ($q = 5$).

З отриманих даних випливає, що похибки, які були виявлені на етапі застосування методу оцінювання ритмічної структури на основі врахування її додаткових елементів, а саме, ділянки відліків отриманих похибок $t = 0.9-1.7$ с, $t = 2.9-3.1$ с і $t = 4.48-5.5$ с проявили себе у випадку застосування методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури, середня, відносна похибка методу для досліджуваних ритмічних структур складає 1,5–3,2%.

В таблиці 4.2 зведені середні значення середньоквадратичних похибок оцінювання ритмічних структур розробленими методами та відомим. У методі адаптивної ідентифікації ритмічної структури не використовується метод оцінювання ритмічної структури на основі змішаної інтерполяції кусково-квадратичної (параболічної) та кусково-лінійної, оскільки має суттєвий недолік, пов'язаний із неврахуванням останнього сегмента, тому даний метод чутливий до малої кількості відліків сегментної структури, що обмежує його використання у випадку опрацювання циклічного сигналу з малою кількістю циклів.

Таблиця 4.2

Порівняльна таблиця похибок оцінювання ритмічної структури новими методами та відомим

Методи	Тип інтерполяції	Середньоквадратична абсолютна похибка, с	Середньоквадратична відносна похибка, %
1	2	3	4
Відомий	Кусково-лінійна	0,06	3
Нові методи	Змішана інтерполяція: кусково-квадратична (параболічна) та кусково-лінійна	0,56	15

1	2	3	4
Нові методи	Змішана інтерполяція: квадратичним сплайном та кусково-лінійна	0,15	8
	Змішана інтерполяція: кубічним сплайном та кусково-лінійна	1,8	18
	Адаптивна ідентифікація ритмічної структури	0,03	1,6

Наведені результати похибок, які зведені в таблиці 4.2, слід розуміти таким чином. Оскільки на практиці апріорно нічого не відомо про закон зміни значень ритмічної структури різних циклічних сигналів у межах сегментів-циклів чи сегментів-зон, то природно використовувати різні підходи до її оцінювання. Тому при моделюванні різних ритмічних структур закладалась інформація про закон зміни значень ритмічної структури лінійний та нелінійний (квадратичний та кубічний). Якщо закладати інформацію про лінійну залежність значень ритмічної структури на всій її реалізації, то оцінювання дискретної ритмічної структури методом на основі кусково-лінійної інтерполяції або на основі адаптивної ідентифікації ритмічної структури буде найкращим. Аналогічним чином це стосується й інших методів. Тобто, якщо в ритмічну структуру, що моделюється, закладати інформацію про квадратичну залежність її значень, то при її оцінюванні буде кращим метод на основі змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та методом адаптивної ідентифікації її ритмічної структури. Тому використання окремо розроблених методів оцінювання ритмічних структур на основі змішаних інтерполяцій – квадратичним чи кубічним сплайном та кусково-лінійної інтерполяції має місце, якщо наперед відомо про квадратичну чи кубічну закономірність зміни значень ритмічної структури циклічного сигналу. Проте на практиці, як показує аналіз ритмічних структур різних реальних циклічних

сигналів, закон залежності їх значень на всій реалізації не є постійним лінійним чи квадратичним, а може змінюватися на сегментах-циклах чи сегментах-зонах. Тому найкращим серед розроблених методів є метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури, який дозволяє адаптуватися до виду залежності значень ритмічної структури на відповідних сегментах-циклах чи сегментах-зонах. Оскільки при моделюванні ритмічної структури (див. рис. 4.27) закладалися різні закономірності зміни її значень як лінійні, так і нелінійні (квадратичні та кубічні) на різних сегментах-зонах. Тому, якщо в змодельованій реалізації ритмічної структури буде закладено більше, наприклад, лінійних залежностей на сегментах-зонах, то середнє значення відносної похибки для застосування методу оцінювання ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції, а також методу на основі адаптивної її ідентифікації буде менше в порівнянні з іншими методами. Але у випадку оцінювання не змодельованих реалізацій ритмічних структур, а оцінювання ритмічних структур реальних циклічних сигналів кращим буде метод їх оцінювання на основі адаптивної ідентифікації ритмічної структури.

Таку картину бачимо з отриманих результатів середньоквадратичних відносних похибок оцінювання ритмічних структур розробленими методами. Середня похибка оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів на основі її адаптивної ідентифікації є найменша серед інших похибок розроблених методів, дорівнює 1,6% і є меншою за похибку відомого методу на основі кусково-лінійної інтерполяції. Серед проведених експериментів з оцінювання середньоквадратичних відносних похибок для ритмічних структур, оцінених різними методами, в загальному вона не перевищує 20%. При цьому похибка оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів на основі її адаптивної ідентифікації була в межах 1,5–3,2%, а для відомого методу на основі кусково-лінійної інтерполяції була в межах 3–6,2%.

Необхідно сказати, що в межах одного дисертаційного дослідження не можна охопити, розробити й дослідити методи оцінювання ритмічних структур на основі всіх існуючих видів інтерполяції. Наприклад, цікавими для дослідження й використання їх у методах оцінювання ритмічних структур є методи на основі

використання кривих Без'є чи сплайнів Акіми [157, 347]. Тому розроблення та врахування в методах оцінювання ритмічних структур на основі цих сплайнів буде проведено в подальших наукових дослідженнях.

4.9. Висновки до четвертого розділу

Ідентифікована сегментна структура циклічних сигналів за рахунок розроблених методів сегментації дозволила точніше визначати відліки дискретної ритмічної структури та проводити її ідентифікацію. На основі цієї інформації були розроблені методи оцінювання ритмічної структури. Розроблені методи оцінювання ритмічних структур на основі змішаних інтерполяцій та методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури доповнюють апарат опрацювання циклічних сигналів у напрямку оцінювання (ідентифікації) ритмічних структур циклічних сигналів і можуть бути використані в системах цифрового автоматизованого опрацювання реальних циклічних сигналів у медицині, механіці чи економіці.

1. Розроблено метод оцінювання ритмічної структури циклічного сигналу на основі змішаної кусково-квадратичної та кусково-лінійної функції. Отримано відповідні розрахункові формули для визначення коефіцієнтів інтерполяційного полінома на основі якого оцінювалась ритмічна циклічна та ритмічна зонна структури. Даний метод оцінювання ритмічної структури володіє недоліком, що полягає у неврахуванні останнього сегмента і тому є чутливим до малої кількості відліків сегментної структури, що обмежує його використання у випадку опрацювання циклічного сигналу з малою кількістю циклів. Середньоквадратична відносна похибка оцінювання ритмічної структури даним методом не перевищує 15% для досліджуваних циклічних сигналів.

2. Розроблено метод оцінювання ритмічної структури циклічного сигналу на основі використання змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної функції. Отримано відповідні розрахункові формули для визначення коефіцієнтів інтерполяційного полінома на основі якого оцінювалась

ритмічна циклічна та ритмічна зонна структури. Даний метод оцінювання ритмічної структури не володіє недоліком попереднього методу, проте в ньому можуть спостерігатися незначні викиди (осциляції) інтерполянти на деяких сегментах, зумовлених визначеними значеннями коефіцієнтів інтерполянти. Відносна середньоквадратична похибка оцінювання ритмічної структури даним методом не перевищує 8% для досліджуваних циклічних сигналів і є меншою у порівнянні з попереднім методом.

3. Розроблено метод оцінювання ритмічної структури циклічного сигналу на основі використання змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції. Отримано відповідні розрахункові формули для визначення коефіцієнтів інтерполяційного полінома на основі якого оцінювалась ритмічна циклічна та ритмічна зонна структури. Даний метод оцінювання ритмічної структури не володіє недоліком першого методу, проте в даному методі, так як і в попередньому, можуть спостерігатися викиди (осциляції) інтерполянти на деяких сегментах, зумовлених визначеними значеннями коефіцієнтів інтерполянти. Середньоквадратична відносна похибка оцінювання ритмічної структури даним методом складає 18% для досліджуваних циклічних сигналів і є найбільшою у порівнянні з розробленими методами.

4. Розроблено метод оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів (відліків), який дозволив обґрунтувати та розробити метод вибору оптимального інтерполяційного полінома на сегменті. Крім отримання додаткових елементів ритмічної структури, даний метод може розглядатись як метод формування (приведення) вхідного циклічного сигналу до строго циклічного сигналу. Здійснюється це шляхом вибору зі змодельованого циклічного сигналу, ритмічно пов'язаного з вихідним, лише відповідних однофазних значень на всіх сегментах-циклах чи сегментах-зонах, враховуючи при цьому додатково визначені елементи ритмічної структури. Такий приведений циклічний сигнал буде мати нерівномірний крок дискретизації на відміну від вхідного циклічного сигналу, у якого крок дискретизації – рівномірний.

5. Враховуючи розроблені в даній дисертаційній роботі методи оцінювання

ритмічних структур та враховуючи розроблені методи – метод визначення додаткових елементів ритмічної структури, метод вибору оптимального полінома, на сегменті розроблено метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури. Даний метод дозволяє проводити її ідентифікацію на відповідних сегментах-циклах чи сегментах-зонах, шляхом адаптивного її оцінювання, врахувавши вид інтерполянти серед лінійної, квадратичної чи кубічної на основі відомостей про вибір оптимального полінома, який коректніше відображає закон зміни значень додатково визначених елементів ритмічної структури між відповідними сегментами. Середньоквадратична відносна похибка оцінювання ритмічної структури даним методом в межах 1,5–3,2% для досліджуваних циклічних сигналів і є меншою за відомий метод оцінювання ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції.

6. Проведено порівняльний аналіз точності розроблених методів оцінювання ритмічних структур з відомим методом на основі кусково-лінійної інтерполяції. Отримані результати середньоквадратичних абсолютних та відносних похибок підтвердили підвищення точності оцінювання ритмічної структури за рахунок використання методу адаптивної її ідентифікації. Таким чином, підвищена точність оцінювання ритмічної структури за рахунок використання розроблених у роботі методів, які є необхідними на етапах опрацювання циклічних сигналів, а саме, дискретизації, статистичного аналізу та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів у системах їх цифрової обробки.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИ СТАТИСТИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ ОЦІНЕНОЇ РИТМІЧНОЇ СТРУКТУРИ

У даному розділі на основі проведених експериментів встановлено факт підвищення точності при опрацюванні циклічних сигналів, зокрема методами дискретизації, статистичної обробки та їх комп'ютерного моделювання за рахунок використання в них оцінених ритмічних структур циклічних сигналів розробленими методами. Наведено приклади результатів застосування методів статистичного опрацювання до циклічних сигналів у медицині, механіці та економіці. Наведено також результати комп'ютерного моделювання циклічних сигналів з урахуванням різних оцінених ритмічних структур та інформації, отриманої методами їх статистичного опрацювання. Розроблено метод верифікації моделей досліджуваних сигналів на належність їх до класу циклічних (верифікація циклічності).

Основні результати п'ятого розділу опубліковані в роботах [80, 92, 147, 163, 165, 167, 169, 174, 175, 180, 181, 192, 193, 203, 348, 349, 413, 414, 416, 417, 422, 424, 425, 428, 431, 446].

5.1. Дискретизація циклічних сигналів у системах цифрового опрацювання з урахуванням їх оціненої ритмічної структури

В автоматизованих системах цифрової обробки даних необхідно перетворювати неперервний (аналоговий) циклічний сигнал у дискретний (цифровий), який у подальшому підлягає опрацюванню в цифровій, комп'ютерній системі. Для отримання дискретного (цифрового) циклічного сигналу із неперервного аналогового виконують його дискретизацію, квантування та оцифрування. Оцінені ритмічні структури методами, описаними у четвертому розділі, необхідні для проведення процедури передискретизації циклічних

сигналів, оскільки без проведення передискретизації неможливо застосувати відомі методи статистичного аналізу, методи комп'ютерного моделювання та інші методи опрацювання циклічних сигналів.

У роботах [205, 212] розглянуто особливості дискретизації циклічних сигналів із використанням їх моделі у вигляді циклічної функції (циклічного функціонального відношення). Оскільки дискретизація є неодмінною процедурою в цифрових системах опрацювання даних, то розглянемо, як відбувається дана процедура для циклічних сигналів із урахуванням їх оціненої ритмічної структури, основні відомості щодо методів передискретизації циклічних сигналів наведено у додатку Л.

У роботах [201, 205] наведено метод дискретизації циклічного сигналу в системах його цифрового опрацювання, що полягає в реалізації етапів, наведених на рисунку 5.1.

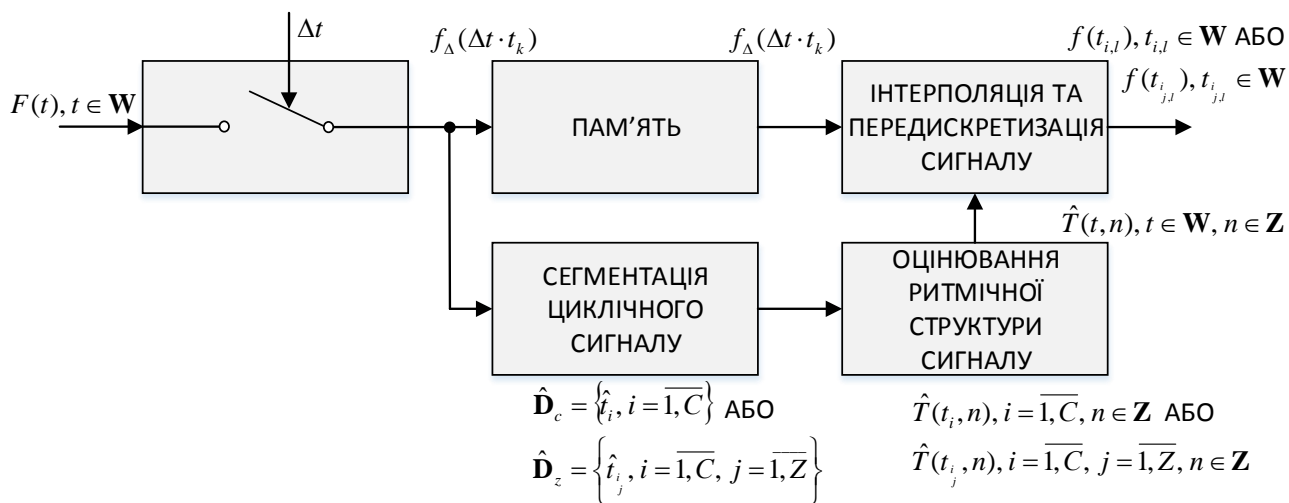


Рис. 5.1. Структурна схема процедури дискретизації циклічних сигналів для випадку ідентифікованої сегментної циклічної чи сегментної зонної структур

Враховуючі отримані результати передискретизації циклічних сигналів із урахуванням різних оцінених ритмічних структур розробленими методами, наведеними у попередньому розділі, та порівняємо з відомим методом оцінювання ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції. З цією метою розглянемо відомий алгоритм передискретизації циклічних сигналів

наведений у працях [199, 202] він складається з таких кроків:

1. Здійснюється рівномірна дискретизація циклічного сигналу $F(t) \in \Psi$, $t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$, отримується дискретна, нециклічна, функція $f_{\Delta}(t_k) = f_{\Delta}(\Delta t \cdot k)$, $t_k = \Delta t \cdot k$, $k \in \mathbf{Z}$.

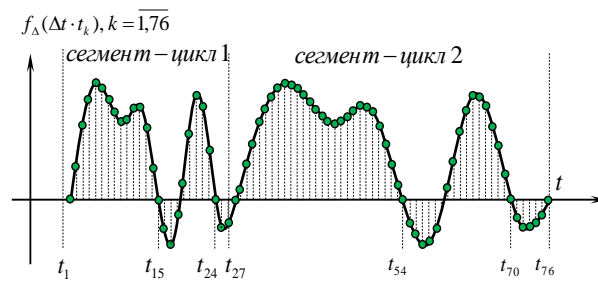
2. Здійснюється визначення сегментної структури (сегментна циклічна \mathbf{D}_c чи сегментна зонна структура \mathbf{D}_z) циклічного сигналу за допомогою методів, які описані в третьому розділі.

3. Здійснюється оцінювання неперервної функції ритму $\hat{T}(t, n)$ за допомогою методів, що описані у четвертому розділі чи за допомогою відомого методу оцінювання ритмічної структури [196].

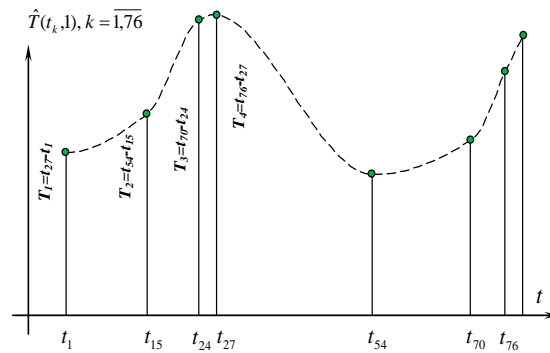
4. Проводиться передискретизація циклічного сигналу шляхом відповідного методу оцінювання її дискретного аналогу всього сигналу $f_{\Delta}(\Delta t \cdot t_k)$ та повторної рівномірної дискретизації з меншим кроком дискретизації одного з її циклів. За оціненою функцією ритму $\hat{T}(t, n)$ формується дискретний циклічний сигнал $f(t_{i,l})$, $t_{i,l} \in \mathbf{D}$, як це описано вище для методу дискретизації у випадку відомої неперервної функції ритму $\hat{T}(t, n)$, зазначеної у роботі [196]. При врахуванні ідентифікованої сегментної зонної структури $\mathbf{D} = \mathbf{D}_z$ та множини областей визначення $\mathbf{W}_j = \{t_{j,l}, l = \overline{1, L_j}\}$ формується дискретний циклічний сигнал $f(t_{j,l})$, $t_{j,l} \in \mathbf{D}$ при врахуванні неперервної функції ритму $\hat{T}(t, n)$.

Описаний вище алгоритм дискретизації циклічних сигналів відображається структурною схемою (див. рис. 5.1) при врахуванні, що $\mathbf{W} = \mathbf{D}$.

Унаслідок адаптації процедури дискретизації циклічних сигналів до зміни його ритму забезпечується однакова кількість відліків L у кожному його зареєстрованому сегменті-циклі, або кількість відліків L_j на відповідному сегменті-зоні. Причому кожному відліку, наприклад, першого циклу відповідають однофазні значення та їх відліки в усіх інших циклах дискретного сигналу. Для прикладу, на рисунках 5.2. та 5.3 зображено дискретний циклічний сигнал.



а)



б)

Рис. 5.2. Схематичне зображення дискретного циклічного сигналу: а) при дискретизації рівномірним кроком (сигнал не є строго циклічним), кількість відліків на циклі дорівнює 27; б) оцінена ритмічна структура, пунктиром позначено неперервну функцію ритму

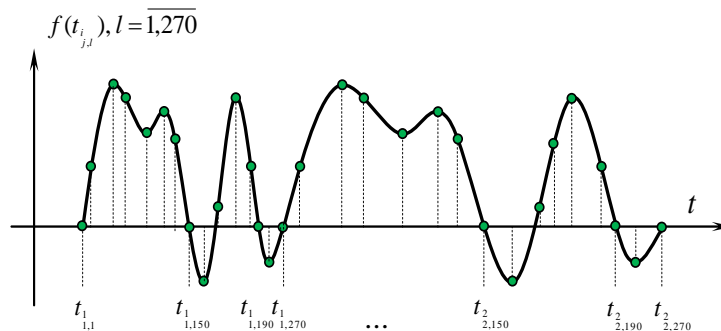


Рис. 5.3. Схематичне зображення дискретного циклічного сигналу при передискретизації, крок дискретизації нерівномірний (сигнал є строго циклічним), кількість відліків на цикл дорівнює 270

На рисунку 5.3, з метою наочного подання передискретизованих відліків, усі 270 – не показані, відліки наведені вибірково, враховуючи ритмічну структуру циклічного сигналу, оскільки частота дискретизації у передискретизованого сигналу на порядок більша, ніж частота дискретизації вхідного циклічного

сигналу (див. рис. 5.2, а).

Розглянемо, як впливає вибір методу оцінювання ритмічної структури циклічного сигналу під час процедури його передискретизації. Для цього розглянемо похибки передискретизації, які виникають при врахуванні різних оцінених ритмічних структур, отриманих на основі методів їх оцінювання, розроблених у четвертому розділі даної дисертаційної роботи.

5.1.1. Похибки передискретизації циклічних сигналів з урахуванням оцінених їх ритмічних структур. Дослідимо похибки передискретизації циклічних сигналів для випадку різних оцінених ритмічних структур циклічного сигналу. Для прикладу, на рисунку 5.4. наведено реалізації передискретизованих циклічних сигналів із урахуваннями ритмічних структур, оцінених на основі методів змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції та на основі методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічного сигналу.

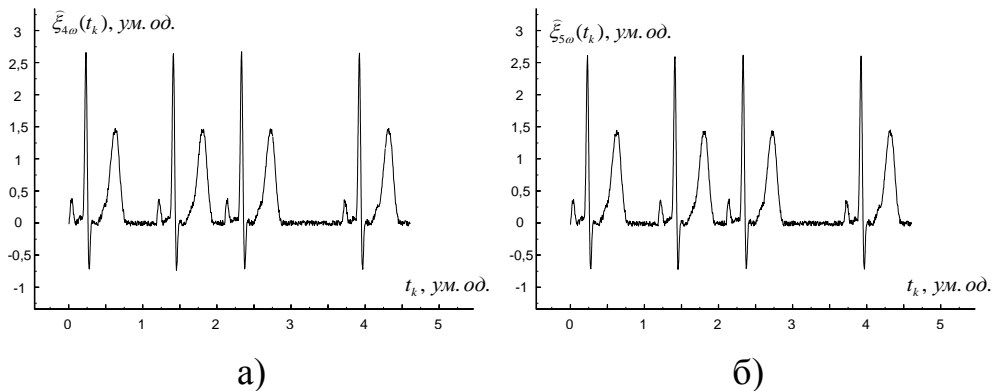


Рис. 5.4. Передискретизовані циклічні сигнали з урахуванням ритмічних структур:

- а) змішана інтерполяція кубічним сплайном та кусково-лінійної функції; б) адаптивна ідентифікація ритмічної структури

Розглянемо, як визначалися похибки передискретизації для циклічних сигналів із урахуванням різних оцінених ритмічних структур. З метою оцінювання похибок передискретизації циклічних сигналів необхідно врахувати, що крок дискретизації передискретизованого циклічного сигналу на сегменті-циклі чи сегменті-зоні буде нерівномірним. Тому необхідно вибирати відліки з

вхідного циклічного сигналу (який має рівномірний крок дискретизації), які відповідають однофазним значенням у реалізації передискретизованого циклічного сигналу, які при цьому, або рівні або близькі (мають найменше відхилення значення). Також при цьому необхідно, щоб виконувалась умова ізоморфізму відліків, зокрема, їх строгі упорядкування.

Знайдемо відліки, які відповідають значенням із передискретизованого циклічного сигналу $\widehat{\xi}_\omega(t_l), t_l \in \mathbf{W}, l = \overline{1, L}$, з урахуванням саме тих відліків вхідного циклічного сигналу $\xi_\omega(t_k), t_k \in \mathbf{W}, k = \overline{1, K}$, які є однофазними. З цією метою використаємо умову вибору відліків $t_l, l = \overline{1, L}$

$$\hat{t}_q = \begin{cases} t_l, & \text{якщо } \min |\xi_\omega(t_k) - \widehat{\xi}_\omega(t_l)|, k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}, q = \overline{1, Q}, Q < K, L. \\ t_l, & \text{не приймається,} \end{cases} \quad (5.1)$$

Використовуючи умову (5.1), вибрані відліки $t_q, q = \overline{1, Q}$ забезпечують рівність (або мінімальне відхилення значень) за атрибутом. При цьому необхідно враховувати, щоб виконувалась умова ізоморфізму відліків $t_q, q = \overline{1, Q}$ для сегментної циклічної структури, враховуючи формулу (2.37). Для нашого випадку

$$t_i \leftrightarrow t_{i+1}, \dots; t_{i+1} > t_i, t_q \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, q = \overline{1, Q}. \quad (5.2)$$

Дана умова записана для випадку сегментної циклічної структури, проте можна записати умову для випадку сегментної зонної структури, врахувавши формулу (2.40).

Оцінені похибки передискретизації наведено на рисунках 5.5 та 5.6. Для прикладу, похибки передискретизації оцінювалися для другого циклу, оскільки відліки першого циклу використовуються для передискретизації й тому на цьому сегменті-циклі вони будуть співпадати з відліками сегмента-циклу в реалізації передискретизованого циклічного сигналу.

На рисунку 5.5 наведено, похибки відліків при передискретизації другого циклу циклічних сигналів із різними ритмічними структурами. Похибки відліків при передискретизації визначалися за формулами (3.42) та (3.43).

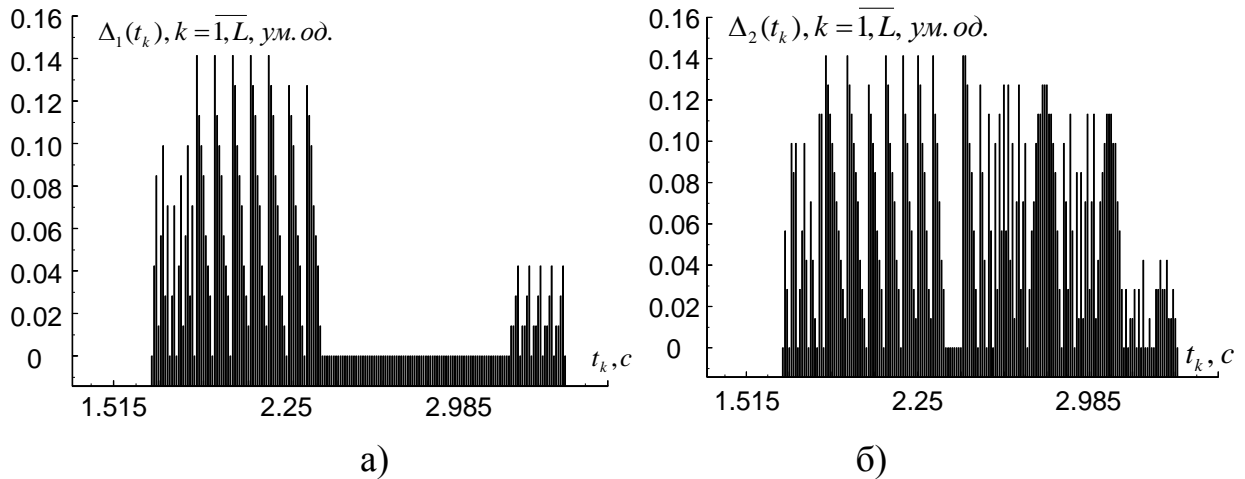


Рис. 5.5. Середньоквадратичні абсолютні похибки відліків другого циклу передискретизованих циклічних сигналів із урахуванням різних ритмічних структур: а) метод кусково-лінійної інтерполяції; б) метод змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної функції

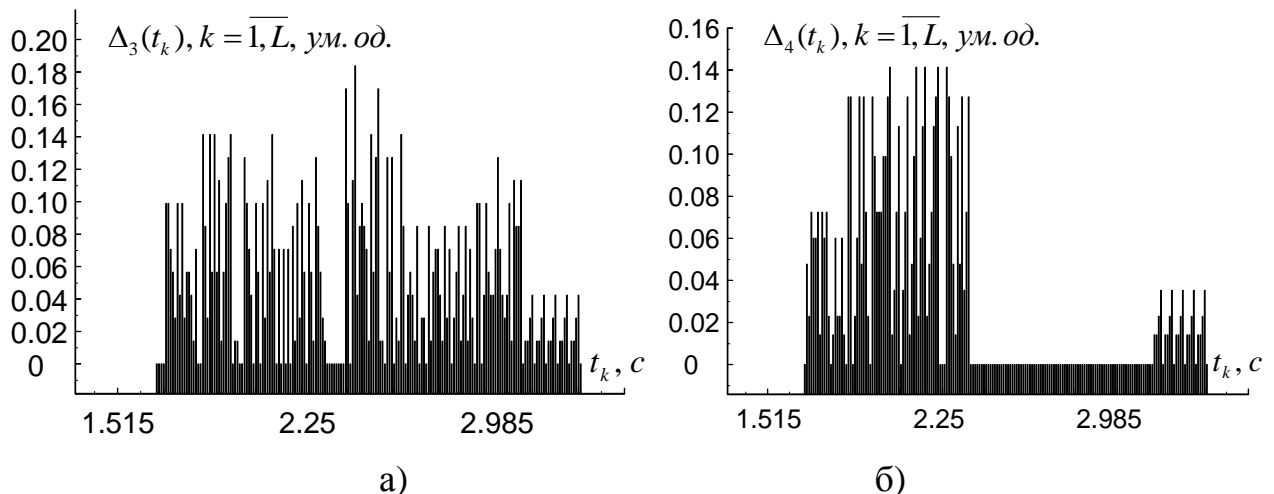


Рис. 5.6. Середньоквадратичні абсолютні похибки відліків другого циклу передискретизованих циклічних сигналів із урахуванням різних ритмічних структур: а) метод змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції; б) метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури

Результати середніх значень середньоквадратичних похибок передискретизованих відліків, абсолютної та відносної, зведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Середньоквадратичні похибки відліків передискретизованих циклічних сигналів, отриманих із урахуванням різних ритмічних структур

Методи оцінювання ритмічних структур	Абсолютна похибка	Відносна похибка
1	2	3
Метод кусково-лінійної інтерполяції (відомий метод)	0,09	0,05
Метод змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної	0,11	0,06
Метод змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної	0,10	0,055
Метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури	0,07	0,04

Необхідно сказати, що на різних сегментах-циклах чи сегментах-зонах значення похибок передискретизації будуть інші. Проте середня середньоквадратична відносна похибка не буде перевищувати наведених у таблиці значень для досліджуваних циклічних сигналів.

У загальному середньоквадратична відносна похибка передискретизації відліків циклічних сигналів розробленими методами оцінювання ритмічної структури складає 0,06. При застосуванні методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури вона дорівнює 0,04 і менша у порівнянні з відомим методом оцінювання ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції, яка складає 0,05. Оскільки відносні похибки передискретизації не суттєво відрізняються між собою то з цього слідує, що різні оцінені ритмічні структури не суттєво впливають на результати передискретизації циклічних сигналів.

5.2. Методи статистичного опрацювання циклічних сигналів із урахуванням оцінених їх ритмічних структур

Провівши процедуру передискретизації та отримавши строго циклічний сигнал (для якого крок дискретизації є нерівномірним, а кількість відліків на циклах $L = const$), можна застосовувати методи його статистичного опрацювання.

Статистичне опрацювання циклічних сигналів (використовуючи стохастичний підхід) на базі їх математичної моделі у вигляді циклічного випадкового процесу із сегментною структурою є однією із важливих задач теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів. У роботах [163, 168, 175, 192, 201, 205] наведено розв'язок задачі статистичного опрацювання (оцінювання ймовірнісних характеристик) циклічних сигналів, а саме, в медицині при опрацюванні ЕКС [163, 192] та механіці при опрацюванні циклічних сигналів рельєфних утворень [348, 349, 431, 446].

Розглянемо необхідне математичне забезпечення методів для проведення статистичного опрацювання циклічних сигналів (зосередимо увагу на циклічних сигналах, математичними моделями яких є циклічні випадкові процеси).

У додатку М, підпункт М.1 наведено основні математичні залежності необхідна для проведення статистичного опрацювання циклічних сигналів (оцінювання їх ймовірнісних характеристик).

Відома процедура статистичного опрацювання (оцінювання ймовірнісних характеристик) циклічного сигналу моделлю якого є циклічний випадковий процес складається з таких етапів [163, 201, 205]:

1. Визначення початку t_i та закінчення t_{i+1} i -го (довільного) циклу циклічного випадкового процесу $\xi(\omega, t) \in \Psi$, $\omega \in \Omega, t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$. Тобто визначається півінтервал $\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1})$.

2. Розбиття півінтервалу $\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1})$ на L півінтервалів точками $\{t_{i,l}, l = \overline{1, L}\}$, де $t_{i,1} = t_i$.

3. Формування вкладеного у неперервний процес $\xi(\omega, t) \in \Psi$,

$\omega \in \Omega, t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$ дискретний циклічний випадковий процес $\xi(\omega, t_{i,l})$,
 $\omega \in \Omega, t_{i,l} \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$, що заданий на дискретній множині
 $\mathbf{D} = \mathbf{D}_c = \{t_{i,l}, i = \overline{1, C}, l = \overline{1, L}\}$ або $\mathbf{D} = \mathbf{D}_z = \{t_{j,l}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, l = \overline{1, L_j}\}$ шляхом
знаходження цієї множини за оціненою ритмічною структурою та множиною
 $\{t_{i,l}, l = \overline{1, L}\}$, а саме (5.2), або $\{t_{j,l}, l = \overline{1, L_j}\}$, відповідно (5.3).

4. Формування вектора L φ -серій $\{\varphi_l(\omega, i) = \xi(\omega, t_{i,l}), i \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}\}$, які є
стаціонарними та стаціонарно пов'язаними випадковими послідовностями.

5. До вектора L стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових
послідовностей, за припущення їх ергодичності та ергодичної пов'язаності,
застосовуються відомі методи їх статистичного аналізу [163, 201, 205].

Розроблені в роботах [163, 201, 205] методи статистичного опрацювання
циклічного випадкового процесу є узагальненням методів статистичного
оцінювання ймовірнісних характеристик стохастично періодичних процесів.

У роботах [201, 205] показано статистичне опрацювання циклічних процесів
за умови стохастичної незалежності його циклів. Також в цих же роботах
доведено еквівалентність двох методів статистичного опрацювання циклічних
сигналів, а саме, синфазного методу (метод φ -серій) через функцію ритму та
методу статистичного оцінювання за ансамблем зведених до однієї області
визначення, статистично узгоджених між собою його циклів.

Таким чином встановлений у роботах [201, 205], факт стохастичної
незалежності циклів циклічного випадкового процесу дає змогу визначити його
ймовірнісні (статистичні) характеристики за ймовірнісними (статистичними)
характеристиками лише одного довільного його циклу.

Розглянемо, як впливає на процедуру статистичного опрацювання
врахування різних оцінених ритмічних структур, зокрема ритмічної структури
оціненої на основі відомого методу кусково-лінійної інтерполяції, оціненої на
основі нових методів змішаної інтерполяції квадратичним чи кубічним сплайнами
та кусково-лінійної інтерполяції, оціненої на основі нового методу адаптивної

ідентифікації ритмічної структури.

5.2.1. Оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних сигналів із урахуванням різних ритмічних структур. На рисунках 5.7–5.10 наведено оцінки ймовірнісних характеристик циклічного сигналу з урахуванням різних оцінених ритмічних структур. У якості циклічного сигналу використано тестовий електрокардіосигнал.

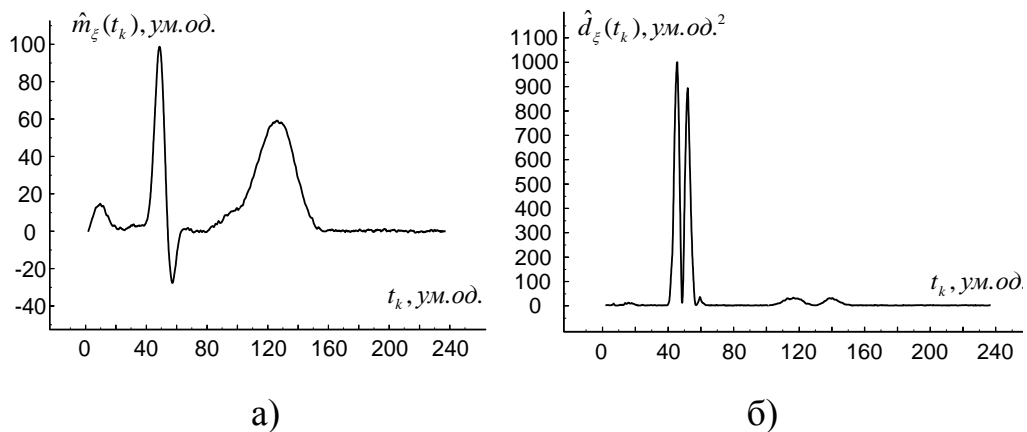


Рис. 5.7. Результати статистичного оцінювання: оцінка математичного сподівання та дисперсії циклічного ЕКС із урахуванням відомого методу кусково-лінійної інтерполяції: а) математичне сподівання; б) дисперсія

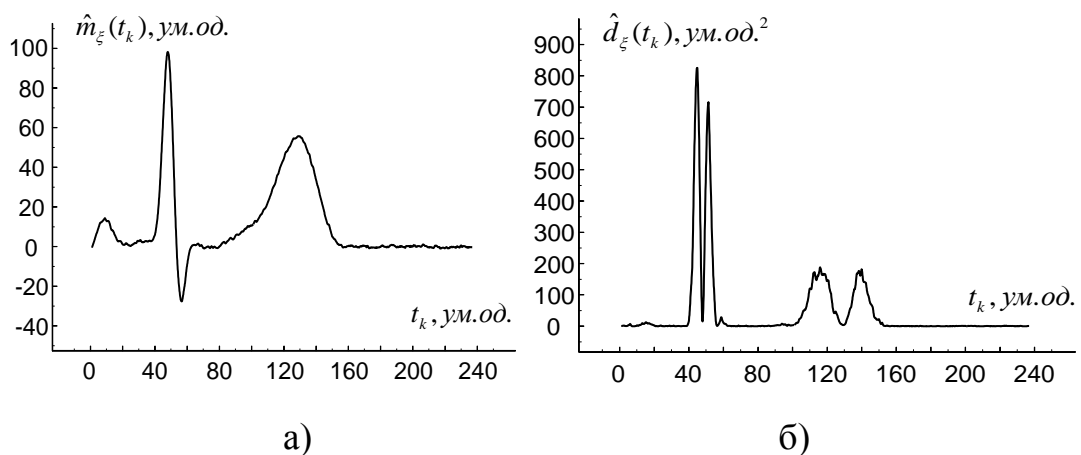


Рис. 5.8. Результати статистичного оцінювання: оцінка математичного сподівання та дисперсії циклічного ЕКС із урахуванням змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної функції: а) математичне сподівання;

б) дисперсія

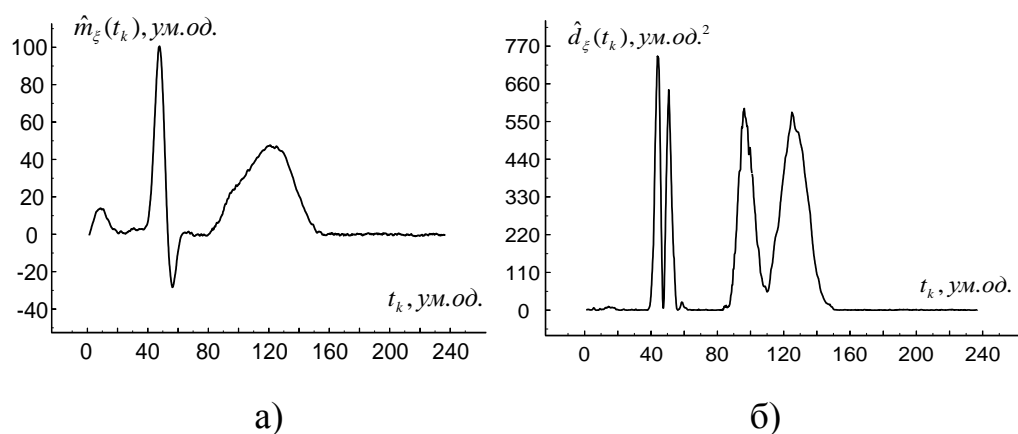


Рис. 5.9. Результати статистичного оцінювання: оцінка математичного сподівання та дисперсії циклічного ЕКС із урахуванням змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції: а) математичне сподівання; б) дисперсія

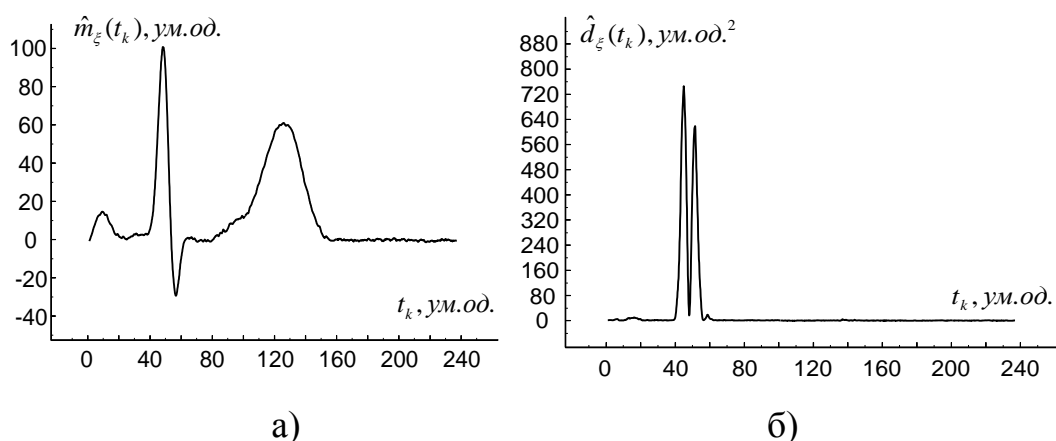


Рис. 5.10. Результати статистичного оцінювання: оцінка математичного сподівання та дисперсії циклічного ЕКС із урахуванням адаптивної ідентифікації ритмічної структури: квадратичним сплайном та кусково-лінійної інтерполяції: а) математичне сподівання; б) дисперсія

З отриманих результатів статистичних оцінок імовірнісних характеристик випливає, що врахування ритмічної структури на основі застосування методу адаптивної її ідентифікації є кращим за відомий метод, заснований на кусково-лінійній інтерполяції, оскільки величина оцінки дисперсії значно менша у випадку застосування нового методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури. При статистичному опрацюванні із застосуванням ритмічних структур,

оцінених на основі методів змішаної інтерполяції кубічним та квадратичним сплайнами та кусково-лінійної інтерполяції, хоча максимальне значення оцінки дисперсії є меншим у порівнянні з дисперсією, отриманою на основі врахування відомого методу кусково-лінійної інтерполяції. Проте на графіках є незначні спотворення в оцінці математичного сподівання на сегменті-T тестового циклічного електрокардіосигналу, які також відображаються на оцінках дисперсії (див. рис. 5.8, б) та 5.9, б). Отримані результати свідчать про більшу ефективність статистичного опрацювання з урахуванням ритмічної структури за рахунок її адаптивної ідентифікації, ніж при використанні інших методів оцінювання ритмічної структури, в тому числі й відомого на основі кусково-лінійної інтерполяції.

5.3. Методи статистичного опрацювання сумісних ймовірнісних характеристик вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів із урахуванням різних ритмічних структур

У роботах [175, 192, 201, 292] дано означення вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. Дані процеси ефективно застосовуються при моделюванні та сумісному статистичному опрацюванні синхронно зареєстрованих циклічних сигналів. До сигналів, що синхронно реєструються та паралельно опрацьовуються належать кардіосигнали різної фізичної природи, різні взаємопов'язані циклічні економічні процеси та інші циклічні сигнали.

Відомими статистичними методами сумісного опрацювання [201, 205, 292] сукупності синхронно зареєстрованих циклічних сигналів є методи, які ґрунтуються на ідеї їх стаціонарності та стаціонарної пов'язаності, що не є адекватною реальним сигналам із циклічною структурою, це зазначено у роботах [201, 205, 292]. У праці [201] відзначено, що для сумісного статистичного аналізу нестационарних процесів розроблені методи лише для оцінювання періодичних взаємних кореляційних функцій вектора періодично корельованих та періодично корельовано пов'язаних випадкових процесів.

Застосовані відомі методи статистичного оцінювання як для випадку одного циклічного випадкового процесу, так і для вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів, ґрунтуються на припущенні, що є відомою (оціненою) функція ритму $T(t, n)$ циклічного випадкового процесу $\xi(\omega, t)$ чи циклічного випадкового вектора $\Theta_N(\omega, t)$. Хоча в багатьох практичних випадках вона є невідомою й потребує свого попереднього визначення (оцінювання), як методами розробленими у четвертому розділі.

Алгоритмічне забезпечення методів статистичного оцінювання циклічних сигналів наведено на рисунку 5.11.

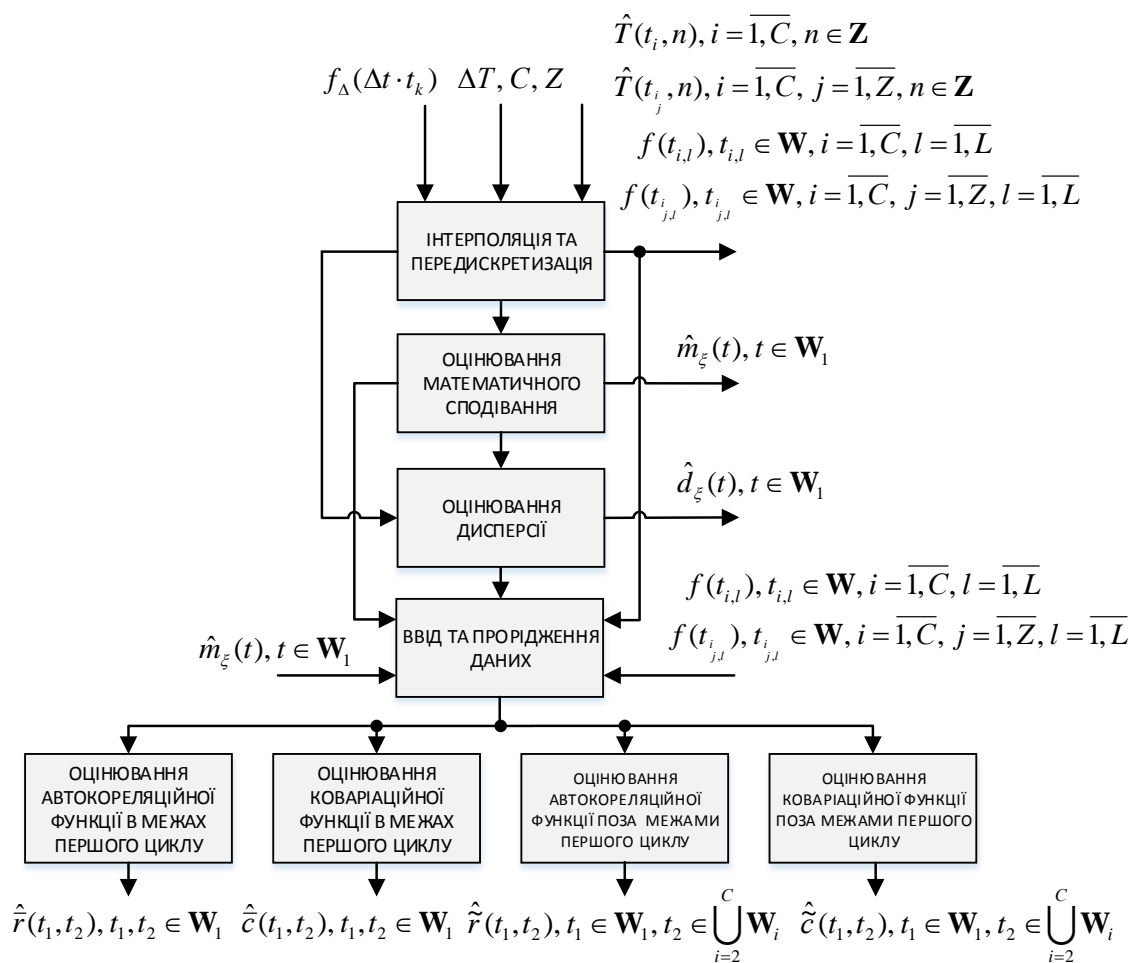


Рис. 5.11. Структурна схема алгоритмічного забезпечення методів статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних сигналів

Дана структурна схема поєднує в собі блоки для опрацювання циклічних сигналів як для сумісного опрацювання вектора ритмічно пов'язаних випадкових процесів, так і опрацювання одинарних реалізацій циклічних випадкових процесів.

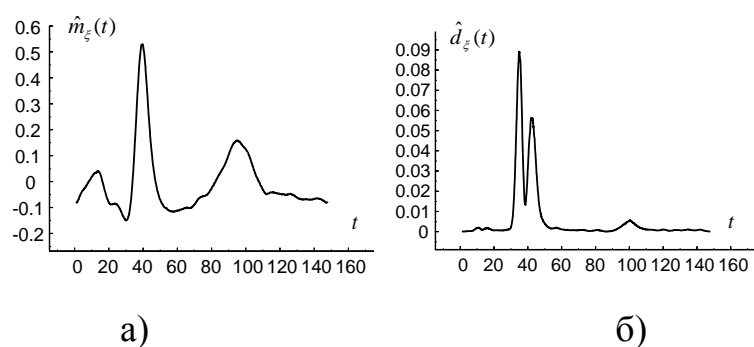
процесів. При цьому для статистичного опрацювання синхронно зареєстрованих циклічних сигналів передбачено введення їх імовірнісних характеристик та передискретизованих циклічних сигналів (з нерівномірним кроком дискретизації). Основні математичні залежності методів сумісного статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних сигналів наведені у додатку М, підпункт М.2

Після застосування методів сумісного статистичного оцінювання отримують оцінки ймовірнісних характеристик кореляційної функції в межах циклу $\hat{r}(t_1, t_2), t_1, t_2 \in \mathbf{W}_1$ та поза його межами $\hat{r}(t_1, t_2), t_1 \in \mathbf{W}_1, t_2, \dots, t_k \in \bigcup_{i=2}^{C_1} \mathbf{W}_i$, коваріаційної функції в межах циклу $\hat{c}(t_1, t_2), t_1, t_2 \in \mathbf{W}_1$ та поза його межами $\hat{c}(t_1, t_2), t_1 \in \mathbf{W}_1, t_2, \dots, t_k \in \bigcup_{i=2}^{C_1} \mathbf{W}_i$, а також отримують характеристики авто-функцій.

Розглянемо результати статистичного опрацювання запропонованими методами циклічних сигналів у різних галузях у медицині, механіці та економіці.

5.4. Результати застосування методів статистичного опрацювання циклічних сигналів з урахуванням оцінених ритмічних структур у різних галузях

5.4.1. Результати статистичного опрацювання циклічних кардіосигналів (у медицині). Результати статистичного опрацювання різних циклічних кардіосигналів наведено в роботах [163, 168, 175, 192, 213]. Для прикладу, покажемо деякі з них. На рисунку 5.12 наведені оцінки математичних сподівань та дисперсії в умовних одиницях.



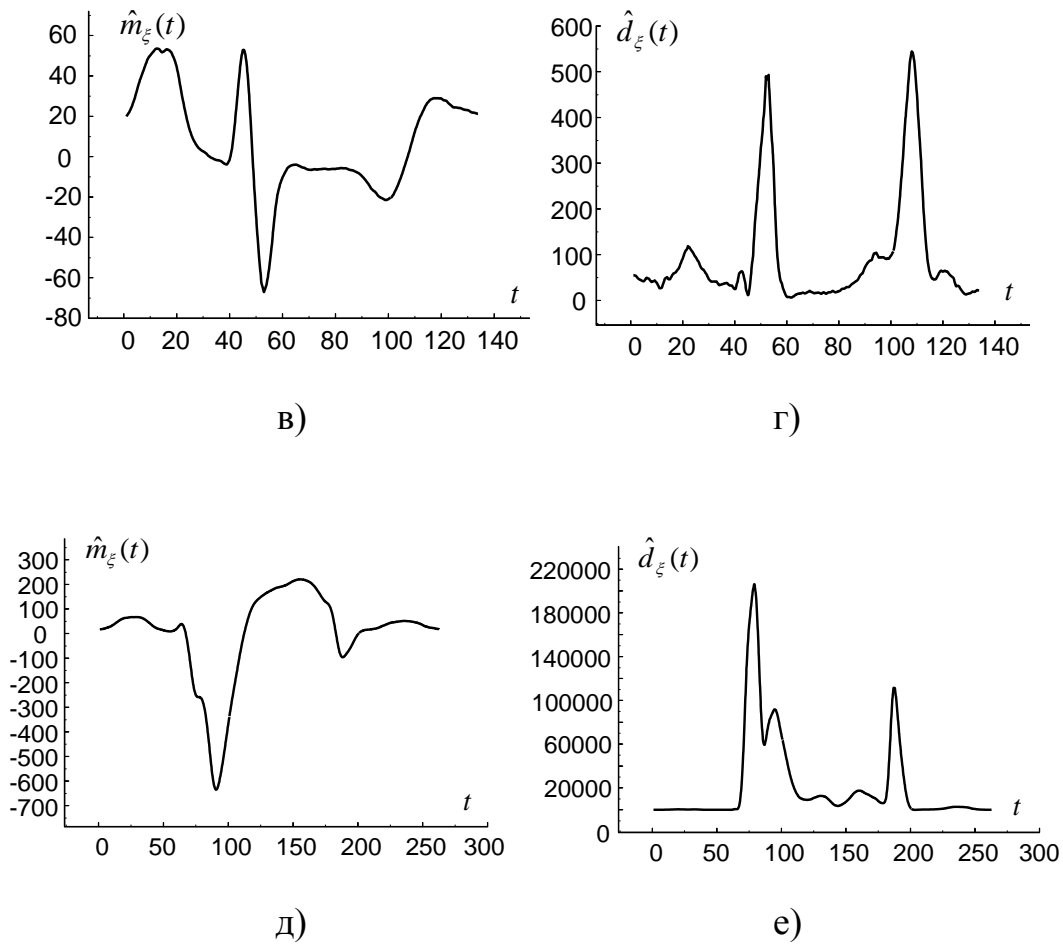
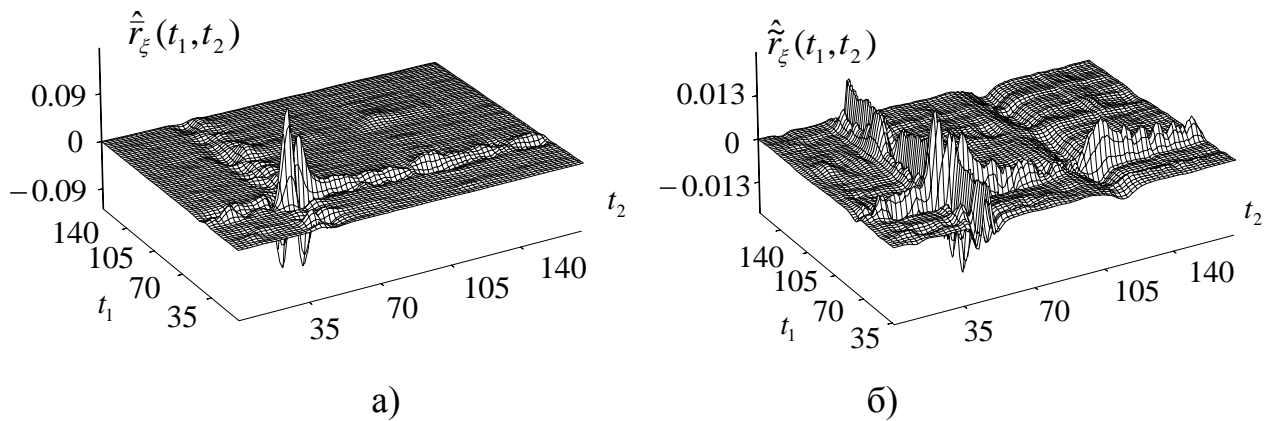


Рис. 5.12. Результати статистичного опрацювання електрокардіосигналів, реалізації оцінок математичного сподівання (а, в, д) та реалізації оцінок дисперсій (б, г, е): а), б) електрокардіосигнал, діагноз – умовно здорова людина; в), г) електрокардіосигнал, діагноз – патологія, порушення морфологічного характеру; д), е) електрокардіосигнал, діагноз – патологія, порушення серцевого ритму



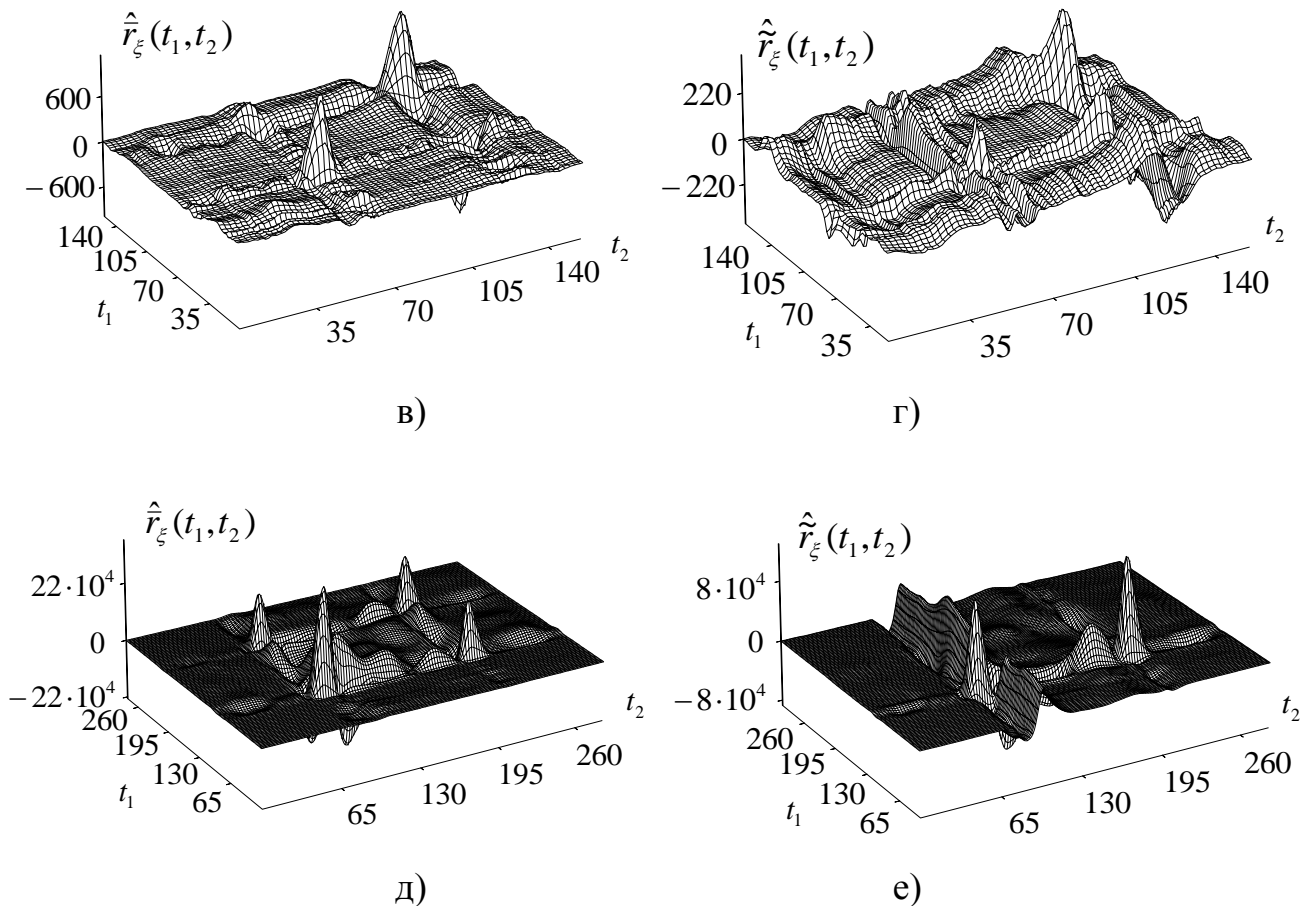


Рис. 5.13. Результати статистичного опрацювання електрокардіосигналів, реалізації оцінок автокореляційних функцій в межах циклу (а, б, в) та реалізації оцінок автокореляційних функцій поза межами циклу (г, д, е): а), б) електрокардіосигнал, діагноз – умовно здорова людина; в), г) електрокардіосигнал, діагноз – патологія, порушення морфологічного характеру; д), е) електрокардіосигнал, діагноз – патологія, порушення серцевого ритму

Отримані статистичні оцінки електрокардіосигналів у подальшому використовують для комп'ютерного моделювання реалізацій циклічних сигналів, а також для проведення діагностування, як це буде показано у наступному розділі дисертаційної роботи.

5.4.2. Результати статистичного опрацювання циклічних процесів рельєфних утворень на поверхні металів (у механіці). У роботі [431] обґрунтовано використання математичної моделі процесу рельєфних утворень на поверхні металу під механічним чи лазерним впливом на нього, у якості

циклічного випадкового процесу. Оскільки під впливами різних навантажень на досліджувані металічні взірці на поверхні відбуваються самоорганізаційні процеси в їх структурі. Такі рельєфні утворення відображають процес організації фрагментів поверхні й мають структуру, яку обґрунтовано можна розглядати як повторювану, циклічну [431]. У додатку Б наведено додаткову інформацію стосовно дослідження циклічних сигналів рельєфних утворень, використовуючи даний підхід. Існує низка фізичних передумов виникнення впорядкованого рельєфу, зокрема й за принципом самовпорядкованого формування [249, 259, 398]. Одним із найвідоміших є ефект «шахової дошки» – впорядкованого розподілу напружень і деформацій у поверхневих шарах і на інтерфейсах у твердих тілах та зовнішніх полях (механічних, теплових, електричних).

В роботі [431] обґрунтовано математичну модель (5.3) процесу рельєфних утворень на поверхні металів викликаного механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливом на неї у вигляді циклічного випадкового процесу та обґрунтовано методи їх статистичного опрацювання

$$h(\omega, l) = \sum_{i=1}^c h_i(\omega, l), \omega \in \Omega, l \in \mathbf{W}. \quad (5.3)$$

У роботі [426] визначені статистичні оцінки математичного сподівання та дисперсії для циклічних процесів рельєфних утворень, враховуючи обґрунтовану математичну модель.

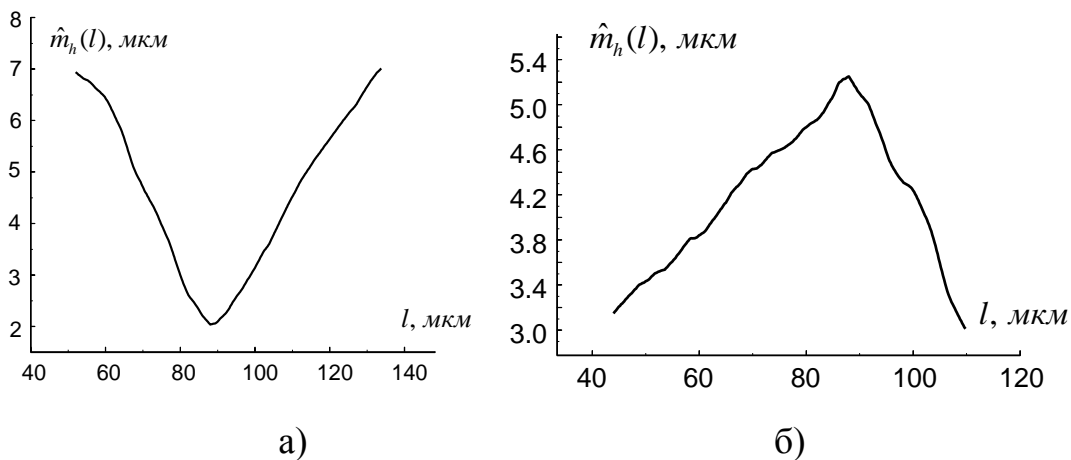


Рис. 5.14. Результати статистичного опрацювання циклічного процесу рельєфних утворень нанотитану після лазерної ударно-хвильової обробки: а), б) реалізації оцінок математичного сподівання, а) на повітрі, б) у воді

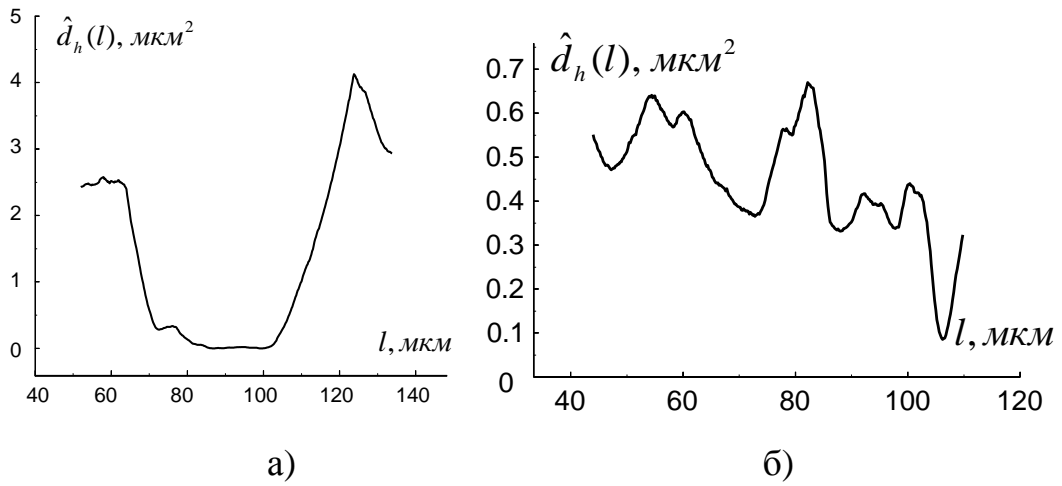


Рис. 5.15. Результати статистичного опрацювання циклічного процесу рельєфних утворень нанотитану після лазерної ударно-хвильової обробки: а), б) реалізації оцінок дисперсій, а) на повітрі, б) у воді

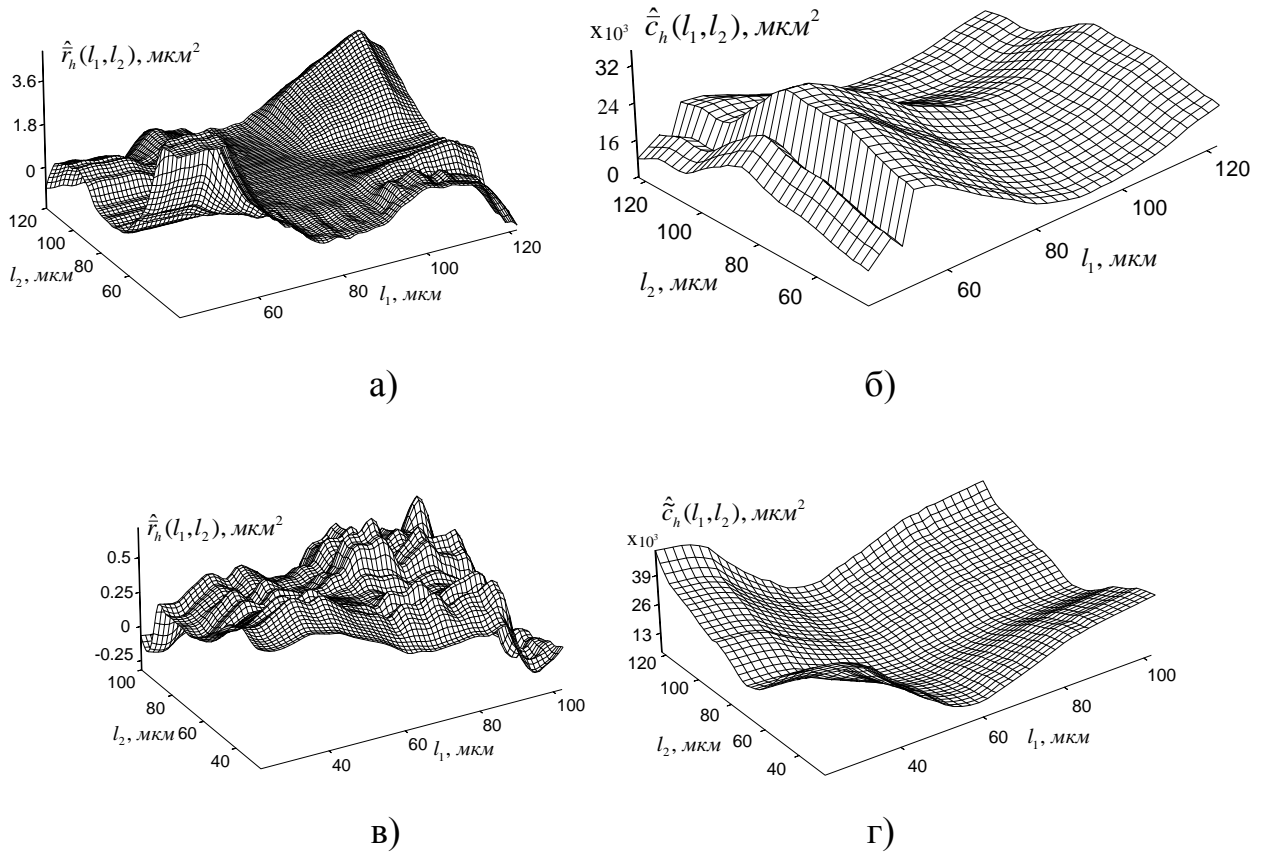


Рис. 5.16. Результати статистичного опрацювання циклічного процесу рельєфних утворень нанотитану після лазерної ударно-хвильової обробки: а), в) реалізації оцінок автокореляційних функцій в межах циклу, б) реалізація оцінки коваріаційної функції в межах циклу, г) реалізація оцінки коваріаційної функції поза межами циклу, а) на повітрі, в) у воді

Для прикладу, на рисунку 5.14 та 5.15 наведені результати статистичного опрацювання процесів рельєфних утворень на поверхні металів під силовим чи енергетичним впливом на них, у роботах [348, 349, 414, 416, 431, 446] наведено отримані результати.

Результати сумісного статистичного опрацювання циклічних процесів рельєфних утворень на поверхні металів наведено на рисунку 5.16. Отримані статистичні оцінки кореляційних та коваріаційних функцій можуть бути використані як діагностичні ознаки при дослідженні стану поверхні металів, за аналогією до досліджень ЕКС. Але таке твердження вимагає подальших ґрунтовних наукових досліджень і не було метою даного дисертаційного дослідження.

5.4.3. Результати статистичного опрацювання циклічних економічних процесів (в економіці). Приклади отриманих результатів статистичного опрацювання циклічних економічних процесів наведені у роботі [92].

Для прикладу, на рисунку 5.17, 5.18 наведено отримані результати.

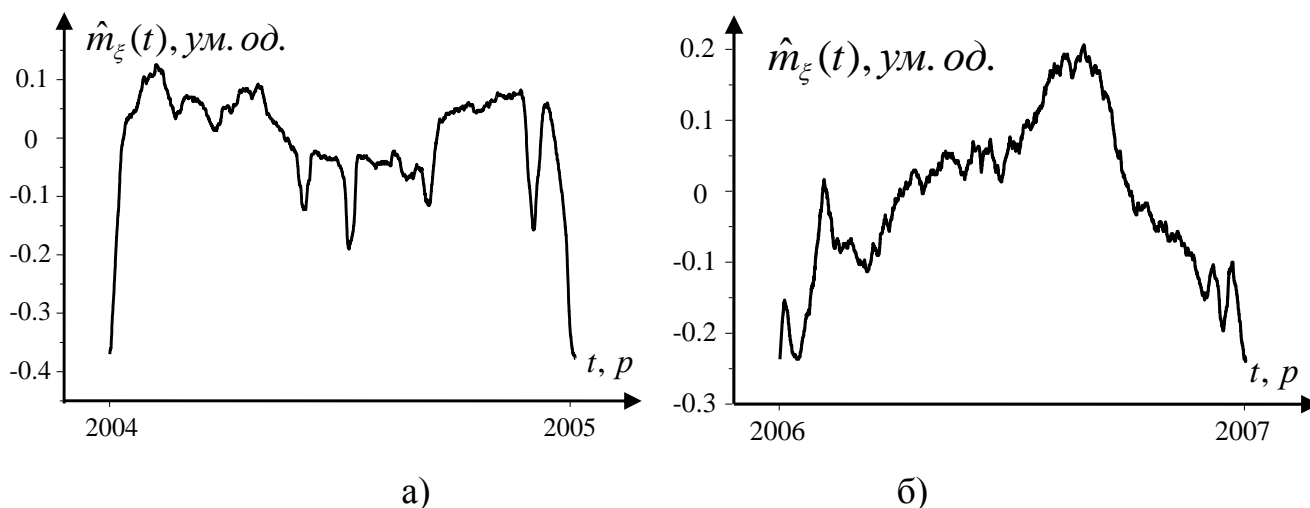


Рис. 5.17. Результати статистичного опрацювання циклічних економічних процесів: а), б) реалізації оцінок математичних сподівань, а) індекс показників маркетингу та реклами США; б) індекс активності автофінансування США

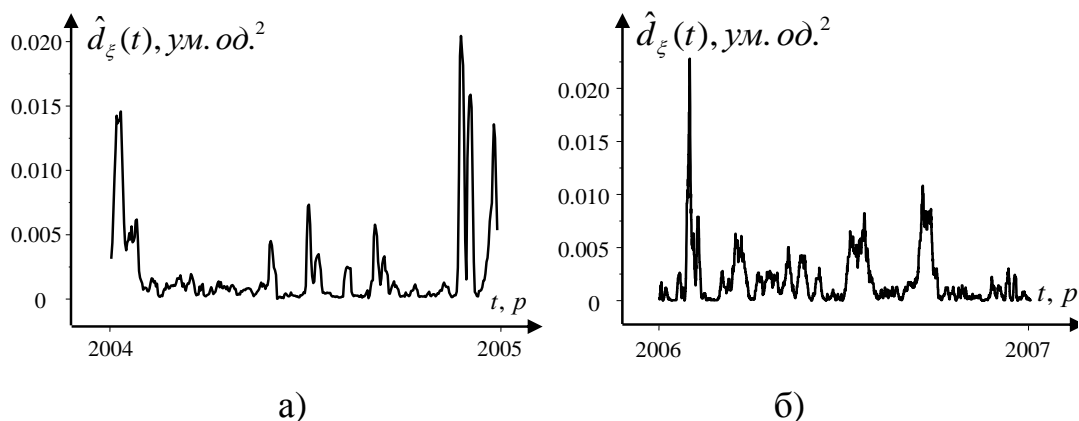


Рис. 5.18. Результати статистичного опрацювання циклічних економічних процесів: а), б) реалізації оцінок дисперсій, а) індекс показників маркетингу та реклами США; б) індекс активності автофінансування США

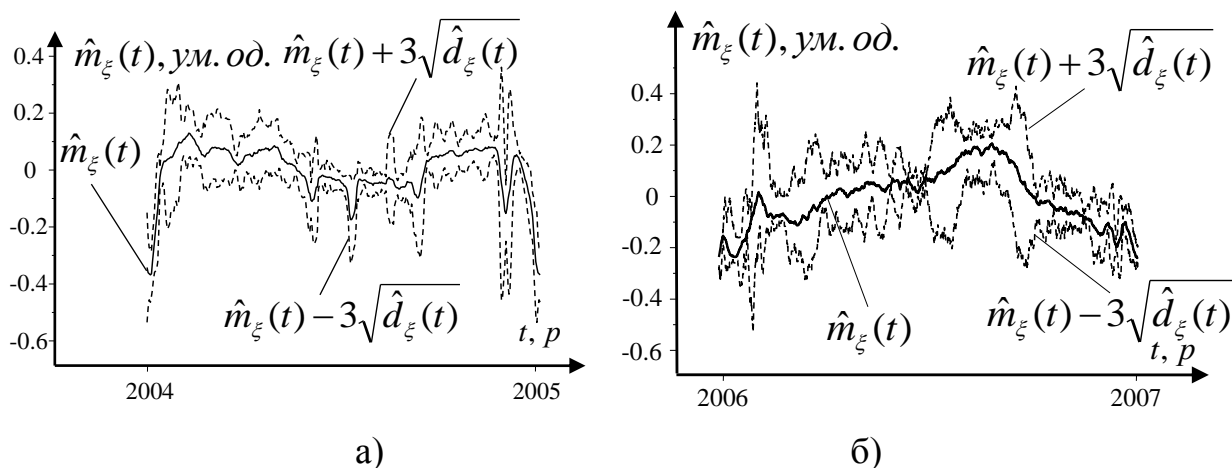


Рис. 5.19. Результати статистичного опрацювання циклічних економічних процесів: а), б) реалізації оцінок математичних сподівань, визначені для них довірчі інтервали з ймовірністю довіри ($p = 0,997$), а) індекс показників маркетингу та реклами США, б) індекс активності автофінансування США

Отримані результати статистичних оцінок та визначені довірчі інтервали (див. рис. 5.19) використовуються при побудові річного прогнозу за циклічними економічними процесами. Застосування отриманих статистичних оцінок при побудові прогнозу буде показано у наступному розділі.

5.5. Комп'ютерне моделювання циклічних сигналів із урахуванням їх оцінених ритмічних структур

Моделювання різноманітних циклічних сигналів за допомогою систем цифрової обробки та їх комп'ютерного моделювання є важливою науковою задачею, розв'язок якої дозволяє визначати можливості відомих і створених методів опрацювання циклічних сигналів на різних етапах їх аналізу та методів сегментації, тестуючи їх із використанням змодельованих реалізацій. Крім цього, моделювання циклічних сигналів дозволяє проводити навчання створених систем прийняття рішень (діагностичних чи прогностичних), методів розпізнавання біомедичних образів шляхом їх навчання й тестування.

Під час проведення тестування алгоритмів та методів опрацювання циклічних сигналів зручно мати велику базу репрезентативних реалізацій циклічних сигналів (відомою базою кардіосигналів наприклад є <https://physionet.org/>). Також зручно поєднувати бази реальних циклічних сигналів (опрацьовані експертами) з інструментами, що дозволяють проводити комп'ютерне моделювання циклічних сигналів. При цьому в циклічні сигнали, що моделюються, за умови що дозволяє математична модель, закладаються ті параметри й характеристики, на які реагує досліджуваний метод (алгоритм) і які необхідно дослідити методами, що розробляються.

Ефективність методів опрацювання та моделювання циклічних сигналів суттєво залежить від їх математичними моделей, оскільки в даній дисертаційній роботі для моделювання використано методи комп'ютерного моделювання, описані в роботах [92, 175, 201, 205], розглянемо їх.

При проведенні комп'ютерного моделювання вхідними даними є морфологічні та ритмічні характеристики та параметри циклічних сигналів. На рисунку 5.20 наведено структурну схему алгоритмічного забезпечення методу моделювання циклічних сигналів із використанням двох підходів – детермінованого та стохастичного. Особливості форми циклічних сигналів враховуються в блоці морфологічних характеристик та параметрів. Тут необхідно

ввести репрезентативний цикл циклічного сигналу $f_1(t), t \in \mathbf{W}$, використовуючи детермінований підхід щодо імітаційного моделювання циклічного сигналу. Або ввести реалізації статистичних оцінок математичного сподівання $\hat{m}_\xi(t), t \in \mathbf{W}$ та дисперсії $\hat{d}_\xi(t), t \in \mathbf{W}$, використовуючи стохастичний підхід щодо імітаційного моделювання циклічного сигналу. Крім цього, для внесення додаткової стохастичності в дані, які моделюються, при потребі можна додавати білий шум з нормальним законом розподілу, як адитивну компоненту імітаційної моделі. Крім морфологічних характеристик при моделюванні враховуються параметри сегментних структур, а саме, кількість циклів C та зон Z , а також характеристики та параметри ритму у відповідному блоці на структурній схемі.

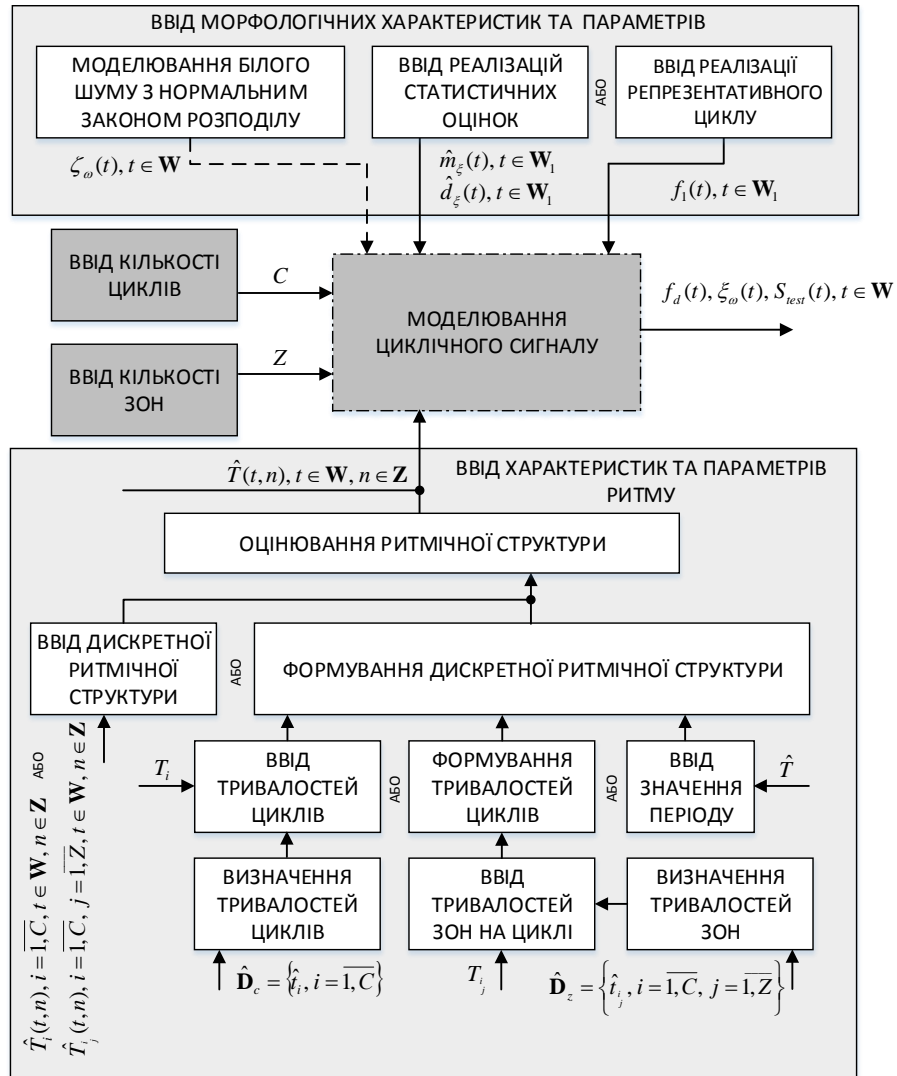


Рис. 5.20. Структурна схема алгоритмічного забезпечення методу комп'ютерного моделювання циклічних сигналів

При цьому в блоці формування (моделювання) ритму можуть бути введені наступні дані: дискретна ритмічна структура, якщо вона відома, для випадків ідентифікованої сегментної циклічної структури $T(t_i, n), t_i \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}, i = \overline{1, C}$ та ідентифікованої сегментної зонної структури $T(t_{i_j}, n), t_{i_j} \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$; множини відліків сегментної циклічної структури \mathbf{D}_c чи множини відліків сегментної зонної структури \mathbf{D}_z . У випадку, коли відомі визначені тривалості відповідних сегментів-циклів $T_i, i = \overline{1, C}$ чи сегментів-зон $T_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$ або оцінка значення періоду \hat{T} , то ритм може бути заданий, враховуючи зазначені параметри. Вхідними даними для моделювання реалізації циклічного сигналу є неперервна функція ритму, яка може бути оцінена в блоці «оцінювання ритмічної структури», враховуючи один із розроблених методів, наведених у дисертаційній роботі, або якщо вона відома наперед, то може бути введена в блоці характеристик і параметрів ритму.

Для стохастичного випадку проведення комп'ютерного моделювання реалізацій циклічних сигналів відбувається як моделювання та послідовне об'єднання стохастичних, незалежних циклів

$$\xi(\omega, t) = \bigcup_{i=1}^C \xi_i(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{W}. \quad (5.4)$$

У випадку моделювання з урахуванням сегментів-зон

$$\xi(\omega, t) = \bigcup_{i=1}^C \bigcup_{j=1}^Z \xi_{i_j}(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{W}. \quad (5.5)$$

Урахування зв'язку сегментної циклічної та сегментної зонної структур реалізацій циклічних сигналів

$$\xi_i(\omega, t) = \bigcup_{j=1}^Z \xi_{i_j}(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{W}. \quad (5.6)$$

Комп'ютерне моделювання послідовності стохастичних, еквівалентних, незалежних циклів

$$\xi_i(\omega, t) = \{(y_i(t_1), g_i(\omega, t_1)), t_1 \in \mathbf{W}_1\}, i = \overline{1, C}, t \in \mathbf{W}, \quad (5.7)$$

де $y_i(t_1)$ - функція перетворення шкали, яка враховує ритмічну структуру [201, 205]; $g_i(\omega, t_1)$ - множина незалежних базових (репрезентативних) циклів

$$y_i(t_1) = t_1 + T(t_1, n), i = \overline{1, C}, t_1 \in \mathbf{W}_1. \quad (5.8)$$

При такому моделюванні атрибутами є реалізації статистичних оцінок (математичного сподівання та дисперсії) або реалізація репрезентативного циклу циклічного сигналу (у випадку детермінованого підходу щодо моделювання циклічного сигналу).

$$\begin{aligned} m_g(t_1) &= \hat{m}_\xi(t_1 + T(t_1, n)), d_g(t_1) = \hat{d}_\xi(t_1 + T(t_1, n)), n \in \mathbf{Z}; \\ m_g(t_1) &= f_1(t_1 + T(t_1, n)), n \in \mathbf{Z}. \end{aligned} \quad (5.9)$$

У даній структурній схемі (див. рис. 5.20) характеристики ритму (ритмічні структури) можуть бути отримані через урахування сегментних структур множини $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$ або $\mathbf{D}_z = \{t_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$. Крім цього, можна враховувати змінний ритм, задаючи відповідні множини тривалостей циклів $\{T_i, i = \overline{1, C}\}$ чи множини тривалості зон $\{T_{i_j}, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}\}$ на циклі. Врахування стабільного ритму здійснюється за рахунок введення значення періоду \hat{T} .

Далі розглянемо приклади результатів застосування методу комп'ютерного

моделювання циклічних сигналів з урахуванням різних ритмічних структур у різних галузях.

5.5.1. Результати комп'ютерного моделювання циклічних кардіосигналів (у медицині). Наведемо приклади результатів комп'ютерного моделювання ЕКС, наведених у роботах [168, 169, 175].

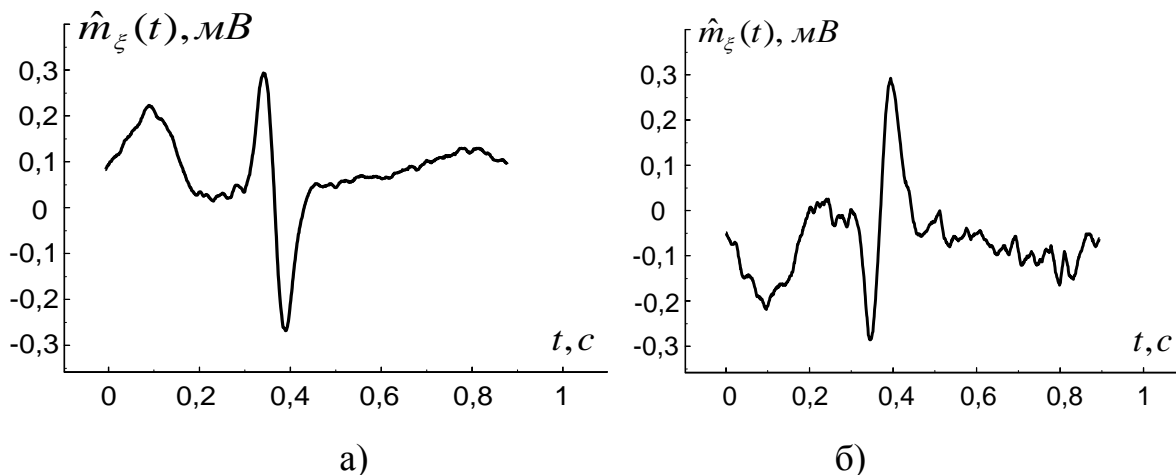


Рис. 5.21. Вхідні дані для комп'ютерного моделювання циклічних сигналів (електрокардіосигналів), реалізації оцінок математичних сподівань: а) оцінка математичного сподівання ЕКС (II відведення), діагноз – патологія гіпертрофія правого та лівого шлуночків; б) оцінка математичного сподівання ЕКС (aVR відведення), діагноз – гіпертрофія правого та лівого шлуночків

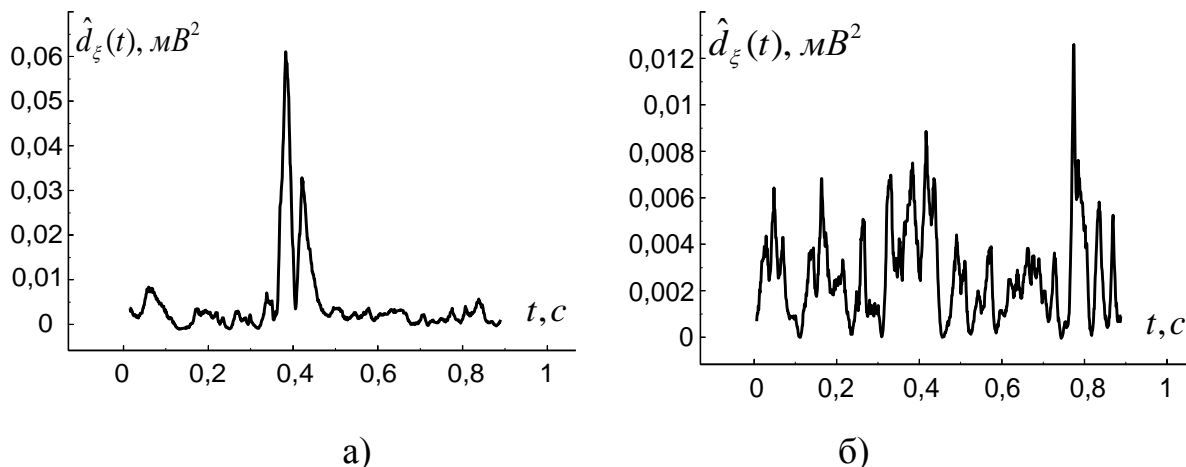


Рис. 5.22. Вхідні дані для комп'ютерного моделювання циклічних сигналів (електрокардіосигналів), реалізації оцінок дисперсії: а) оцінка дисперсії ЕКС (II відведення), діагноз – гіпертрофія правого та лівого шлуночків; б) оцінка дисперсії ЕКС (aVR відведення), діагноз – патологія гіпертрофія правого та лівого шлуночків

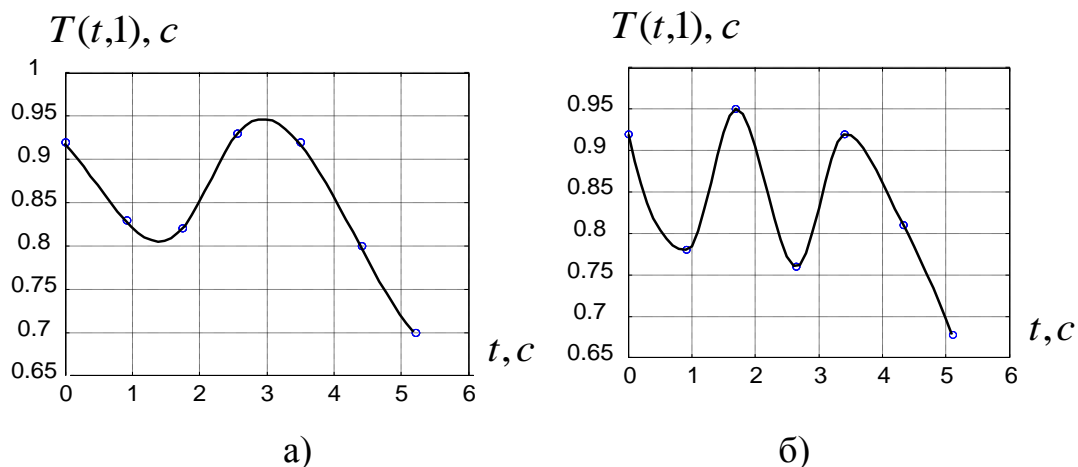


Рис. 5.23. Вхідні дані для комп'ютерного моделювання циклічних сигналів (електрокардіосигналів), реалізації оцінених ритмічних структур: а) змішана інтерполяція: кубічним сплайном та кусково-лінійна; б) змішана інтерполяція: квадратичним сплайном та кусково-лінійна

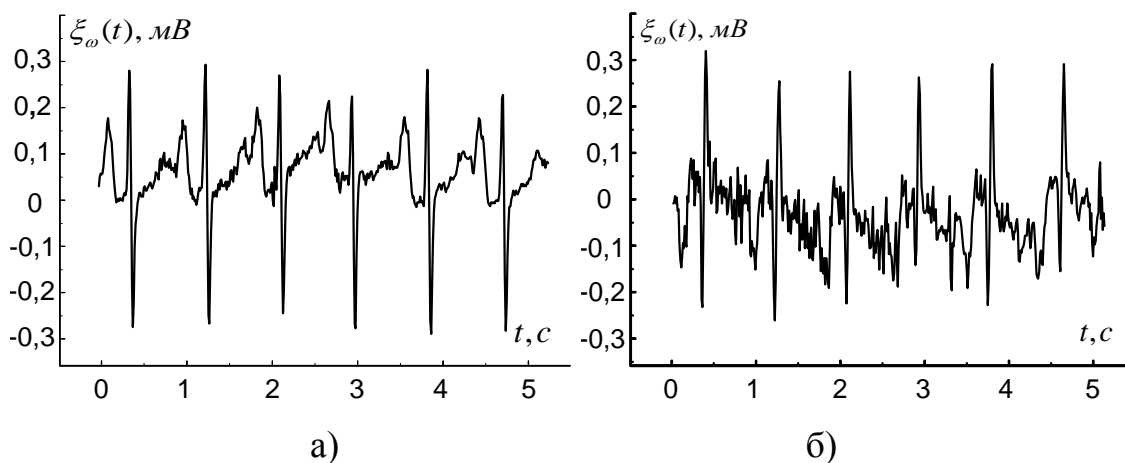


Рис. 5.24. Результати комп'ютерного моделювання реалізацій циклічних сигналів: а) реалізація електрокардіосигналу (II відведення), діагноз – патологія гіпертрофія правого та лівого шлуночків; б) реалізація електрокардіосигналу (aVR відведення), діагноз – патологія гіпертрофія правого та лівого шлуночків

5.5.2. Результати комп'ютерного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень на поверхні металів (у механіці). Розглянемо приклади змодельованих циклічних процесів рельєфних утворень на поверхні металів, наведених у роботах [349, 416, 417], та порівняємо їх з реальними досліджуваними даними експерименту.

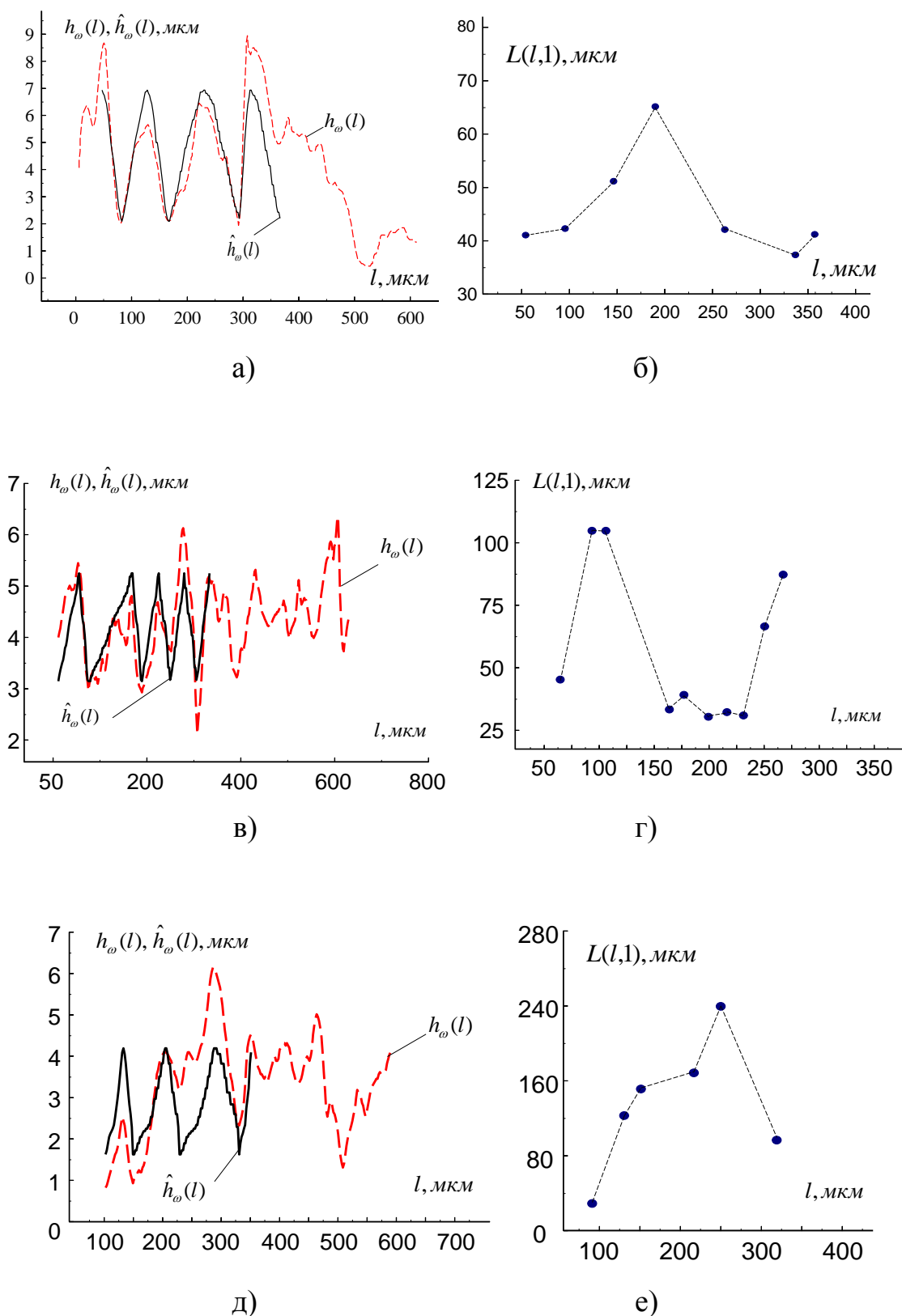


Рис. 5.25. Реалізації комп'ютерно-змодельованих та реальних циклічних процесів рельєфних утворень нанотитана після лазерної ударно-хвильової обробки а), в), д) та оцінені їх ритмічні структури б), г), е), суцільна лінія – результати комп'ютерного моделювання, пунктирна лінія – реальні дані експерименту

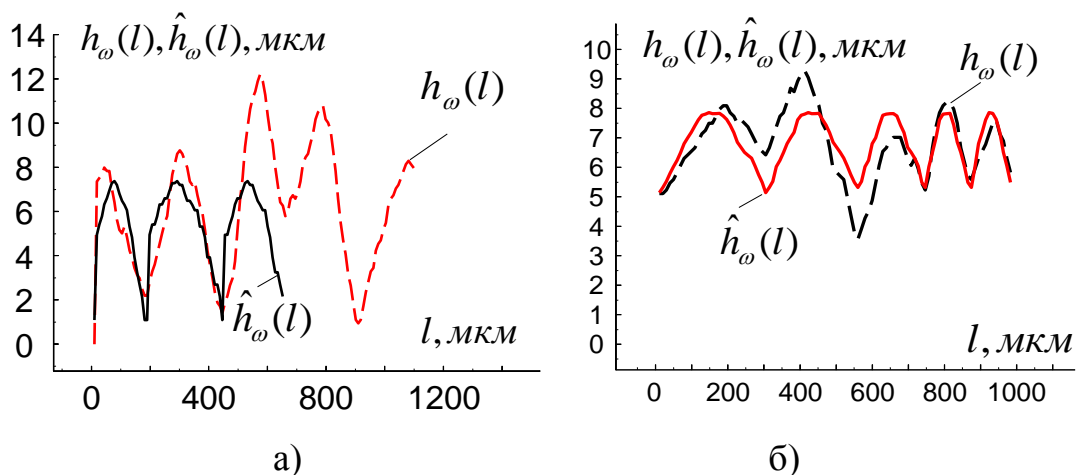


Рис. 5.26. Реалізації комп'ютерно-змодельованих та реальних циклічних процесів рельєфних утворень на поверхні алюмінієвого сплаву Д16чт, процес рельєфних утворень наведено у вигляді графіка «ширина елемента рельєфу – довжина аналізованої області» за відносної деформації $\varepsilon=13,0\%$ (а); $\varepsilon=15,5\%$ (б), суцільна лінія – результати моделювання; пунктирна лінія – реальні дані експерименту

5.5.3. Результати комп'ютерного моделювання циклічних економічних процесів (в економіці). У роботі [92] наведено результати моделювання циклічних економічних процесів. Приклади змодельованої реалізації та вхідних даних для моделювання наведено на рисунках 5.27 та 5.28.

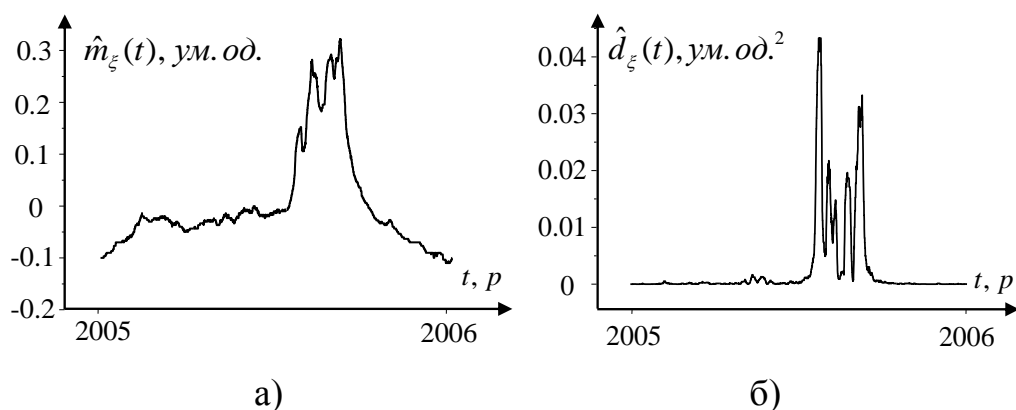
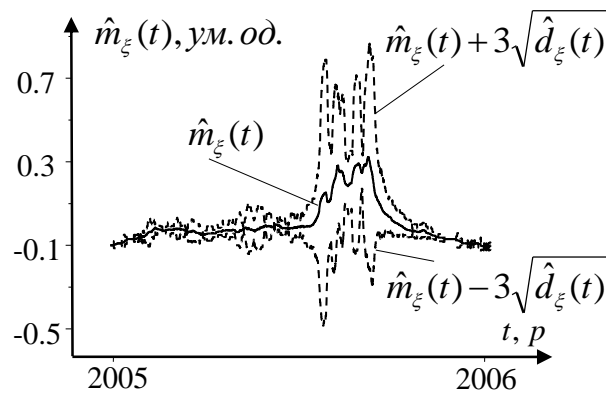
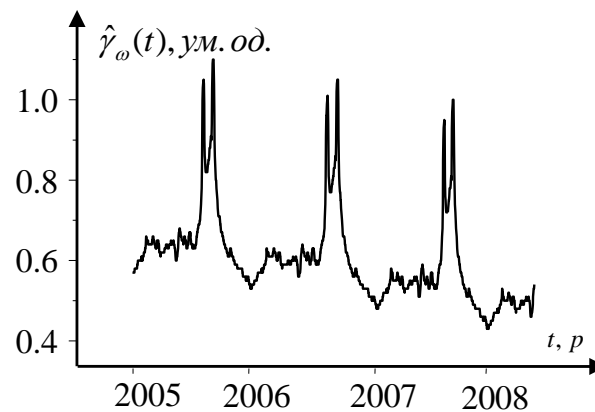


Рис. 5.27. Вхідні дані для моделювання реалізації оцінок ймовірнісних характеристик: а) оцінка математичного сподівання; б) реалізація оцінки дисперсії циклічної компоненти циклічного економічного процесу індексу комп'ютерних та електронних показників США



а)



б)

Рис. 5.28. Довірчі інтервали та змодельована реалізація економічного циклічного процесу: а) визначені довірчі інтервали; б) реалізація циклічного економічного процесу індексу комп'ютерних та електронних показників США

Отримані результати статистичних оцінок та побудовані на їх основі довірчі інтервали для змодельованих циклів циклічних економічних процесів наведено на рисунку 5.28.

5.5.4. Оцінювання точності методу комп'ютерного моделювання циклічних сигналів із урахуванням різних ритмічних структур. Похибки комп'ютерного моделювання циклічних сигналів. У даному підрозділі розглянемо, як приклад, похибки комп'ютерного моделювання для циклічних процесів рельєфних утворень, досліджених у роботах [416, 417]. На рисунках 5.29 та 5.30 наведено оцінки середньоквадратичних абсолютних та відносних похибок комп'ютерного моделювання циклічних сигналів. Похибки визначалися за

формулами (4.74) та (4.75) для значень змодельованої реалізації $\hat{h}_\omega(l)$ і вхідного досліджуваного циклічного сигналу $h_\omega(l)$.

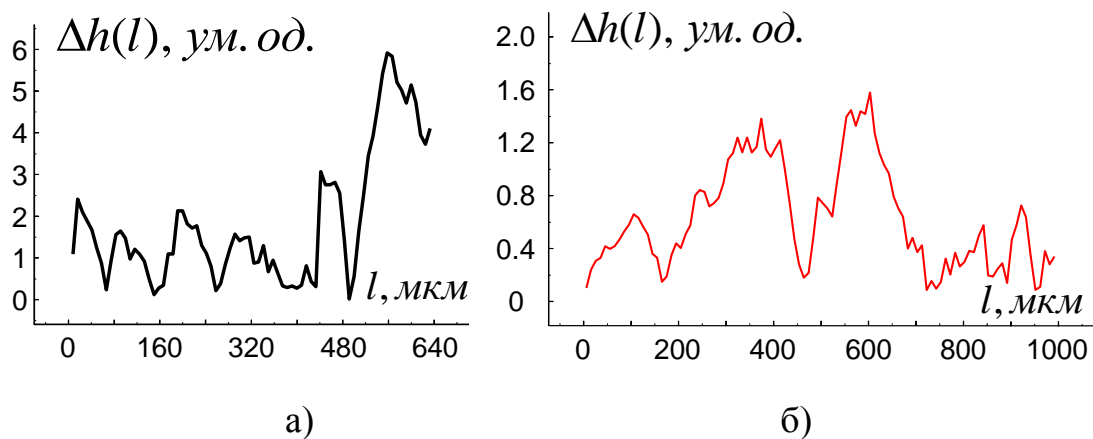


Рис. 5.29. Похибки моделювання геометрії рельєфних утворень на поверхні алюмінієвого сплаву Д16чт: абсолютна похибка моделювання за відносної деформації $\varepsilon = 13,0\%$ (а); $\varepsilon = 15,5\%$ (б)

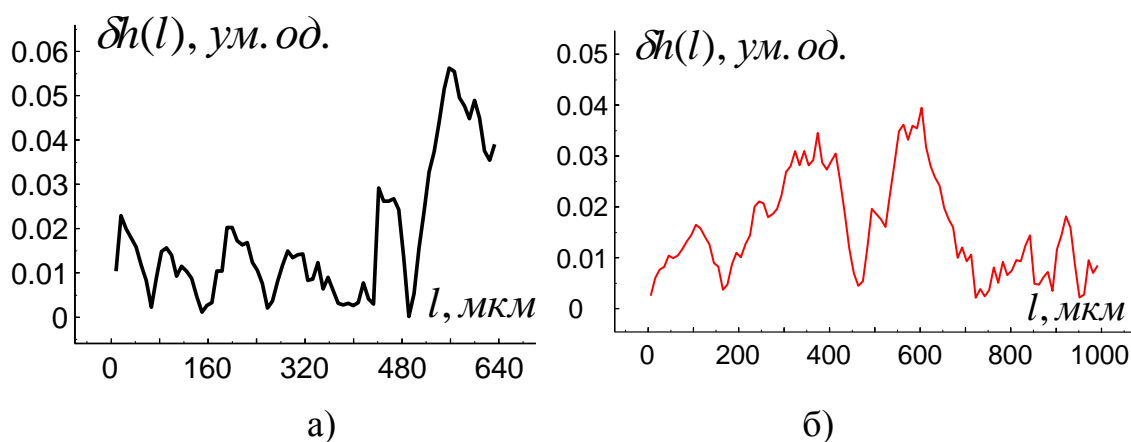


Рис. 5.30. Похибки моделювання геометрії рельєфних утворень на поверхні алюмінієвого сплаву Д16чт: середньоквадратична відносна похибка моделювання за відносної деформації $\varepsilon = 13,0\%$ (а); $\varepsilon = 15,5\%$ (б)

У таблиці 5.2 зведені середні похибки комп'ютерного моделювання для різних циклічних сигналів у медицині, механіці та економіці.

Порівняльна таблиця похибок оцінювання точності методу комп'ютерного моделювання циклічних сигналів із урахуванням різних ритмічних структур

Тип циклічного сигналу	Абсолютні похибки	Відносні похибки
1	2	3
Сигнали в медицині (електрокардіосигнал), $q = 1$	8,3	4,2
$q = 3$	9,7	5,1
$q = 4$	11,5	6,7
$q = 5$	7,7	3,1
Сигнали в механіці, $q = 1$	6,1	3
$q = 3$	8,5	6,1
$q = 4$	10,1	8,4
$q = 5$	5,3	2,1
Сигнали в економіці (циклічної компоненти), $q = 1$	0,3	0,15
$q = 3$	0,51	0,44
$q = 4$	0,87	0,93
$q = 5$	0,22	0,10

Необхідно сказати, що при моделюванні різних циклічних сигналів використовувалися різні методи оцінювання ритмічних структур у випадку застосування методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури. Точність моделювання циклічних сигналів була більша у порівнянні з іншими методами оцінювання ритмічних структур, у тому числі й з відомим методом на основі кусково-лінійної інтерполяції. В загальному випадку похибка моделювання при використанні ритмічної структури, оціненої на основі методу її адаптивної ідентифікації, для досліджуваних циклічних сигналів складає 2–9%.

5.6. Метод перевірки статистичної гіпотези про належність досліджуваного сигналу до класу циклічних (метод верифікації циклічності)

Під час дослідження різних сигналів, які мають повторювану структуру, виникає питання, чи відноситься досліджуваний сигнал (чи може він бути описаний математичною моделлю у вигляді циклічної функції), який на інтуїтивному рівні розглядається як циклічний до класу циклічних. З цією метою

був розроблений метод, який може бути застосований для встановлення належності досліджуваного сигналу до класу циклічних. Перед тим, як розглянути даний метод, необхідно сказати, що він заснований на врахуванні апіорної інформації про розподіл значень досліджуваних сигналів, який для нашого випадку має нормальний закон розподілу. Даний факт підтверджується наступними роботами: при дослідженні карідосигналів [185, 292], механічних процесів рельєфних утворень на поверхні металів [133], економічних циклічних процесів [90].

Даний метод може бути застосований для експериментальних даних за умови достатньої кількості зареєстрованих циклів. Його можна застосовувати для двох підходів – стохастичного та детермінованого, вибравши відповідну математичну модель. Розглянемо суть даного методу для стохастичного випадку, оскільки детермінований входить до стохастичного як частинний випадок.

1. Вхідними даними для даного методу є реалізація досліджуваного сигналу $\xi_{\omega}(t), t \in \mathbf{W}$. Першим кроком є розділення реалізації на дві окремих частини (може проводитись автоматично або за участю експерта). При цьому не потрібно синхронізувати початки відліків двох частин досліджуваних реалізацій. Це буде здійснено на етапі сегментації, синхронізувавши однофазні відліки початків циклів.

При даному підході аналізуються дві окремі частини сигналу, тобто

$$\xi_{\omega}(t) = \sum_{q=1}^2 \xi_{q\omega}(t), \quad \xi_{1\omega}(t), t \in \dot{\mathbf{W}}, \quad \xi_{2\omega}(t), t \in \ddot{\mathbf{W}}, \quad \mathbf{W} = \dot{\mathbf{W}} \cup \ddot{\mathbf{W}}. \quad (5.10)$$

Наступним кроком методу є здійснення сегментації окремо кожної з двох частин сигналу. При цьому отримуються множини часових відліків чи просторових, залежно від природи досліджуваних сигналів, для ідентифікованої сегментної циклічної структури $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, \hat{C}}\}$ чи ідентифікованої сегментної

зонної структури $\hat{\mathbf{D}}_z = \left\{ \hat{t}_{i_j}, i = \overline{1, \hat{C}}, j = \overline{1, \hat{Z}} \right\}$, першої частини сигналу чи аналогічно

$\hat{\mathbf{D}}_c = \left\{ \hat{t}_i, i = \overline{1, \hat{C}} \right\}$ та $\hat{\mathbf{D}}_z = \left\{ \hat{t}_{i_j}, i = \overline{1, \hat{C}}, j = \overline{1, \hat{Z}} \right\}$ для другої частини досліджуваного

сигналу, де \hat{C} , \hat{C} - кількість сегментів-циклів для відповідної першої чи другої частини сигналу; \hat{Z} , \hat{Z} - кількість сегментів-зон на відповідних сегментах-циклах частини сигналу.

Наступним етапом є оцінювання ритмічної структури окремо кожної частини із досліджуваного сигналу. Для цього використовуються методи, описані у четвертому розділі. На цьому етапі у випадку проведеного аналізу ритму, коли встановлено, що він є стабільним, отримують оцінки значень періоду \hat{T}_{ξ_1} , \hat{T}_{ξ_2} , або у випадку, коли ритм є змінним, отримують дискретні ритмічні структури $\hat{T}_{\xi_1}(t, 1)$, $\hat{T}_{\xi_2}(t, 1)$. Це відбувається за такими співвідношеннями:

Якщо ритм змінний $\hat{T}_{\xi_1}(t, 1)$, $t \in \hat{\mathbf{W}}$ для сегментної циклічної чи сегментної зонної структур $\hat{\mathbf{D}}_c$, $\hat{\mathbf{D}}_z$ відповідно

$$\hat{T}_{\xi_1}(t, 1) = \begin{cases} \hat{t}_{i+1} - \hat{t}_i \neq \hat{t}_{i+2} - \hat{t}_{i+1} \neq \dots, \\ \hat{t}_{j+1} - \hat{t}_j \neq \hat{t}_{j+1} - \hat{t}_{j+1} \neq \dots, \end{cases} \quad i = \overline{1, \hat{C}}, j = \overline{1, \hat{Z}}. \quad (5.11)$$

Якщо ритм постійний $\hat{T}_{\xi_1}(t, 1)$, $t \in \hat{\mathbf{W}}$ для сегментної циклічної чи сегментної зонної структур $\hat{\mathbf{D}}_c$, $\hat{\mathbf{D}}_z$ відповідно

$$\hat{T}_{\xi_1}(t, 1) = \begin{cases} \hat{t}_{i+1} - \hat{t}_i = \hat{t}_{i+2} - \hat{t}_{i+1} = \dots = \hat{T}_{\xi_1}, \\ \hat{t}_{j+1} - \hat{t}_j = \hat{t}_{j+1} - \hat{t}_{j+1} = \dots, \hat{T}_{\xi_1} = \sum_{j=1}^{\hat{Z}} \hat{T}_{i_j}, \end{cases} \quad i = \overline{1, \hat{C}}, j = \overline{1, \hat{Z}}, \quad (5.12)$$

де \hat{T}_{i_j} - тривалість j -го сегмента-зони на i -му сегменті-циклі.

Аналогічним чином оцінюється ритмічна структура для другої частини сигналу $\ddot{T}_{\xi_2}(t,1)$ чи значення періоду \ddot{T}_{ξ_2} .

2. Наступним кроком є оцінювання статистичних характеристик частин сигналу з урахуванням їх ритмічних структур. На цьому етапі отримуються оцінки математичних сподівань та дисперсії для першої $\hat{m}_{\xi_1}(t)$, $\hat{d}_{\xi_1}(t)$ та другої $\ddot{m}_{\xi_2}(t)$, $\ddot{d}_{\xi_2}(t)$ частин сигналу, використовуючи співвідношення (М.4) та (М.5), додатку М. Статистичне опрацювання частин сигналу здійснюється з урахуванням оцінених ритмічних структур чи оцінених значень періодів.

Під час статистичного опрацювання проводиться синхронізація відліків досліджуваних реалізацій з урахуванням умови однофазності їх відліків. Після проведення статистичного опрацювання отримуються оцінки, $\hat{m}_{\xi_1}(t), t \in \dot{\mathbf{W}}_1, \hat{d}_{\xi_1}(t), t \in \dot{\mathbf{W}}_1; \ddot{m}_{\xi_2}(t), t \in \ddot{\mathbf{W}}_1, \ddot{d}_{\xi_2}(t), t \in \ddot{\mathbf{W}}_1$ відповідно для двох частин сигналу.

3. Після отримання статистичних оцінок відбувається їх нормування. При цьому область визначення нормованих оцінок приймається рівною області визначення першого сегмента-циклу чи сегмента-зони $\mathbf{W}_n = \mathbf{W}_1$, а тривалість нормованого циклу буде дорівнювати відповідно тривалості першому циклу $T_n = \hat{T}_{\xi_1}$. Для нормування статистичних оцінок використовуємо співвідношення для відповідних частин сигналу

$$\hat{m}_n(t) = \hat{m}_{\xi_1}\left(t \cdot \frac{\hat{T}_{\xi_1}}{T_n}\right), t \in \mathbf{W}_n, \hat{d}_n(t) = \hat{d}_{\xi_1}\left(t \cdot \frac{\hat{T}_{\xi_1}}{T_n}\right), t \in \mathbf{W}_n, \quad (5.13)$$

$$\ddot{m}_n(t) = \ddot{m}_{\xi_2}\left(t \cdot \frac{\ddot{T}_{\xi_2}}{T_n}\right), t \in \mathbf{W}_n, \ddot{d}_n(t) = \ddot{d}_{\xi_2}\left(t \cdot \frac{\ddot{T}_{\xi_2}}{T_n}\right), t \in \mathbf{W}_n. \quad (5.14)$$

4. На завершальному етапі відбувається перевірка статистичної гіпотези. На цьому етапі враховуються особливості реалізацій статистичних оцінок ймовірнісних характеристик частин сигналу. При цьому формуються оцінки інтервалів довіри $\dot{v}_{\max}(t)$, $\dot{v}_{\min}(t)$, $\ddot{v}_{\max}(t)$, $\ddot{v}_{\min}(t)$ для відповідних частин сигналу (взяті з ймовірністю $p = 0,997$). Інтервали довіри формуються за співвідношеннями

$$\begin{aligned} \dot{v}_{\max}(t) &= \hat{m}_n(t) + 3 \cdot \sqrt{\hat{d}_n(t)}, t \in \mathbf{W}_n, \dot{v}_{\min}(t) = \hat{m}_n(t) - 3 \cdot \sqrt{\hat{d}_n(t)}, t \in \mathbf{W}_n, \\ \ddot{v}_{\max}(t) &= \ddot{m}_n(t) + 3 \cdot \sqrt{\ddot{d}_n(t)}, t \in \mathbf{W}_n, \ddot{v}_{\min}(t) = \ddot{m}_n(t) - 3 \cdot \sqrt{\ddot{d}_n(t)}, t \in \mathbf{W}_n. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Оскільки відомий факт нормального розподілу значень досліджуваних циклічних сигналів, використовуємо визначені інтервали довіри [143, 321]. Слід зазначити, що при дослідженні сигналів, значення яких мають розподіл, відмінний від нормального, слід врахувати інші, встановлені вагомими властивостями характеристик досліджуваних сигналів і відповідно врахувати інший статистичний критерій у блоці «Врахування особливостей статистичних оцінок характеристик циклічних сигналів», рисунок 5.31. Звісно, такий підхід вимагає подальших ґрунтовних досліджень, які не є метою даної дисертаційної роботи.

На цьому етапі припускається, що оцінки ймовірнісних характеристик однієї частини сигналу (математичне сподівання) мають бути стохастично еквівалентні (стохастичний випадок) або рівні, чи перебувати в межах певного інтервалу (детермінований випадок). При такому підході статистичні оцінки першої частини сигналу мають знаходитися в межах коридора довіри, визначеного через статистичні оцінки другої частини сигналу, і навпаки. При цьому висувається нульова гіпотеза H_0 – коли досліджуваний сигнал є циклічним (який може мати змінний чи постійний ритм (періодичний)); і протилежна, альтернативна (конкуруюча) гіпотеза H_1 – коли досліджуваний сигнал не є циклічним. Застосовуючи критерій порівняння нормованих статистичних оцінок математичних сподівань $\hat{m}_n(t)$, $\ddot{m}_n(t)$ для двох окремих частинах, який наведено у

ВИГЛЯДІ

$$H = \begin{cases} H_0, & \begin{cases} \ddot{v}_{\min}(t) < \hat{m}_h(t) < \ddot{v}_{\max}(t), t \in \mathbf{W}_h, \\ \dot{v}_{\min}(t) < \dot{m}_h(t) < \dot{v}_{\max}(t), t \in \mathbf{W}_h, \end{cases} \\ H_1, & \text{при невиконанні умов чи умови,} \end{cases} \quad (5.16)$$

де $\dot{v}_{\min}(t)$, $\ddot{v}_{\min}(t)$, $\dot{v}_{\max}(t)$, $\ddot{v}_{\max}(t)$ – відповідно нижні та верхні межі для інтервалів довіри першої та другої частин досліджуваного сигналу.

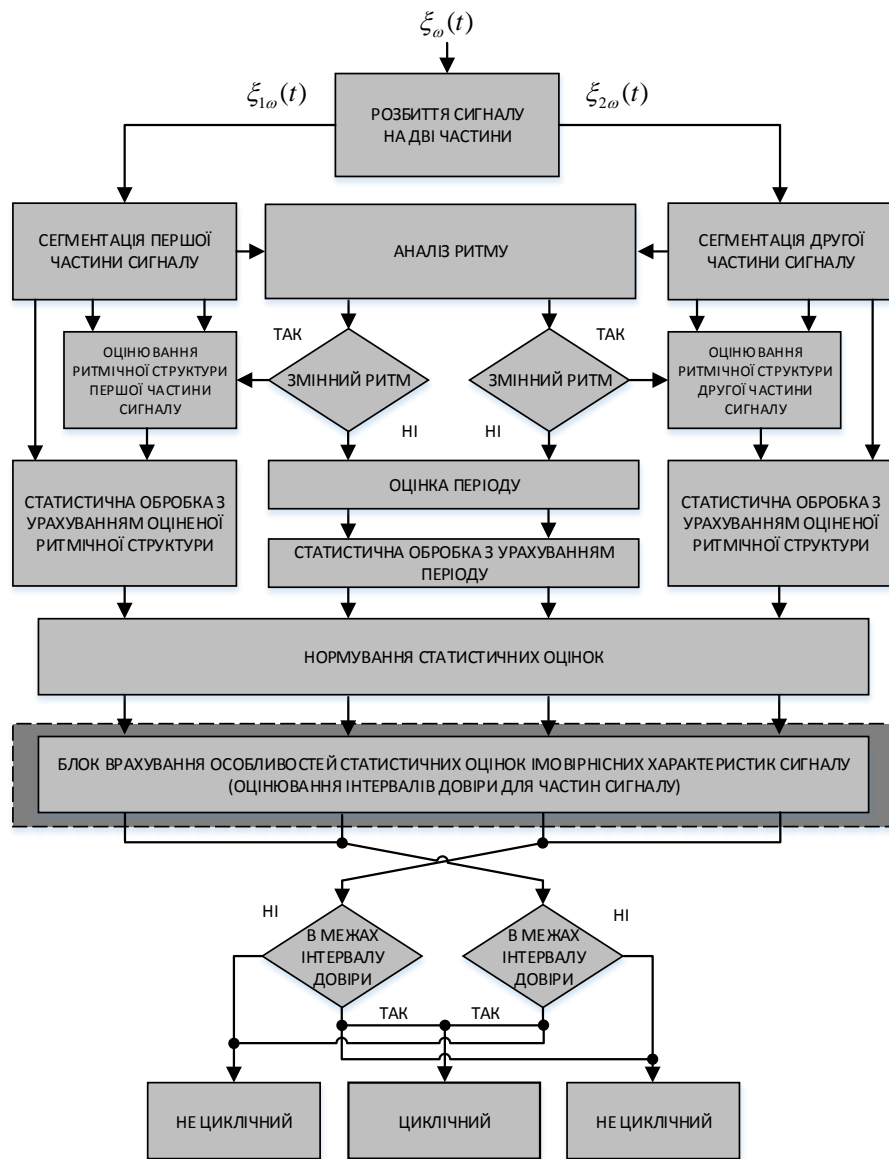


Рис. 5.31. Структурна схема алгоритмічного забезпечення методу верифікації циклічності (перевірка статистичної гіпотези про належність досліджуваного сигналу до класу циклічних)

Оскільки при такому підході вважаємо, що статистичні характеристики на двох частинах досліджуваного сигналу мають бути еквівалентні, тому порівняємо значення отриманих оцінок математичних сподівань на цих двох частинах досліджуваного сигналу з метою встановлення помилок першого та другого роду, які мають місце при перевірці статистичних гіпотез.

Прийняття рішення пов'язане з вибором однієї з гіпотез про рівність математичних сподівань характеризується ймовірностями помилок першого та другого роду. Помилка першого роду виникає, коли відкидається основна гіпотеза H_0 , у випадку, коли вона вірна, рівень значущості критерію α (ймовірність того, що припуститься помилка першого роду). Ймовірність помилки другого роду β , приймається гіпотеза H_0 , коли вірна гіпотеза H_1 , де потужність критерію визначається як ймовірність того, щоб не припуститися помилки другого роду $1 - \beta$.

Залежно від вигляду конкуруючої гіпотези H_1 обираємо двосторонню критичну область, оскільки тут припускаємо, що отримані статистичні оцінки математичних сподівань не рівні між собою на досліджуваних частинах сигналу. За таких обставин границі критичних областей $\Theta_{кр1}$, $\Theta_{кр2}$ при заданому рівні значущості визначаються з відповідних співвідношень

$$P(\tilde{\Theta}_n < \Theta_{кр2}) = P(\tilde{\Theta}_n > \Theta_{кр1}) = \frac{\alpha}{2}.$$

У випадку правильної гіпотези H_0 проведемо оцінювання статистики z , яка для випадку точкової оцінки буде визначатися

$$z = \frac{\hat{m}_n - \ddot{m}_n}{\sqrt{\frac{\hat{d}_n}{\hat{C}} + \frac{\ddot{d}_n}{\ddot{C}}}} \quad (5.17)$$

і мати нормальний закон розподілу. Необхідно врахувати, що нам потрібно буде визначити статистику не для точкової оцінки, а для всіх значень $t \in \mathbf{W}_n$, де \hat{C} , \ddot{C} -

кількість циклів для першої та другої частин досліджуваного сигналу.

У випадку конкуруючої гіпотези H_1 обирають двох сторонню критичну область, критичне значення статистики $\Phi(z_{кр}) = \Phi(z_{1-\alpha}) = 1 - \alpha$. Якщо фактичне значення статистики z (z – критерій), що спостерігається більше за $z_{кр}$, що його визначено на рівні значущості α (за абсолютною величиною), тобто $z > z_{кр}$, то гіпотезу H_0 відкидаємо, інакше робимо висновок, що гіпотеза не містить протиріччя до оцінюваних даних.

Беручи рівень значущості, що дорівнює 0,05 (5%) отримаємо для визначення критичної області $\Phi(z_{кр}) = 0,95$, враховуючи значення аргументу, за таблицею стандартного нормального розподілу знаходимо $z_{кр} = 1,96$. Таким чином, при виконанні умови $z < z_{кр} = 1,96$ приймаємо гіпотезу H_0 на рівні значущості $\alpha = 0,05$.

Оскільки при опрацюванні статистичних оцінок маємо не точкові оцінки математичного сподівання та дисперсії, а їх значення $\dot{m}_n(t), \ddot{m}_n(t)$, на $t \in \mathbf{W}_n$, то пропонується використовувати критерій z для отриманих точкових оцінок, при цьому врахувавши, щоб для 95% чи більше виконувалась гіпотеза H_0 , ($z < z_{кр}$). Тоді приймається рішення про правильність застосування критерію для всіх $\dot{m}_n(t), \ddot{m}_n(t)$, з інтервалу $t \in [1, T_n]$, де T_n – тривалість інтервалу нормованого циклу досліджуваних частин сигналу. У таблиці 5.3 зведено результати обчислення статистики (5.17) для всіх $t \in [1, T_n]$ досліджуваних частин сигналу, наведено у відсотках.

Таблиця 5.3

Оцінювання значення статистики при дослідженні помилок першого та другого роду

Сегменти досліджуваного сигналу	Виконання умови $z < z_{кр}$, %	Невиконання умови $z \geq z_{кр}$, %
Перший сегмент-зона (перша частина сигналу)	99	1
Другий сегмент-зона (перша частина сигналу)	95	5

З таблиці 5.3 бачимо що для всіх частин досліджуваного сигналу на інтервалі $t \in [1, T_n]$ виконалась умова $z < z_{кр}$ для більше або рівне, ніж 95% усіх точкових оцінок. Тому приймаємо рішення про правильність обраної гіпотези H_0 – досліджувана реалізація сигналу є циклічним сигналом (див. рис. 5.32).

Алгоритмічне забезпечення розробленого методу верифікації циклічності досліджуваного сигналу наведені у вигляді структурної схеми алгоритмічного забезпечення на рисунку 5.31. На рисунках 5.32–5.41 наведено, як приклад, результати застосування даного методу верифікації циклічності змодельованого тестового сигналу (див. рис. 5.30).

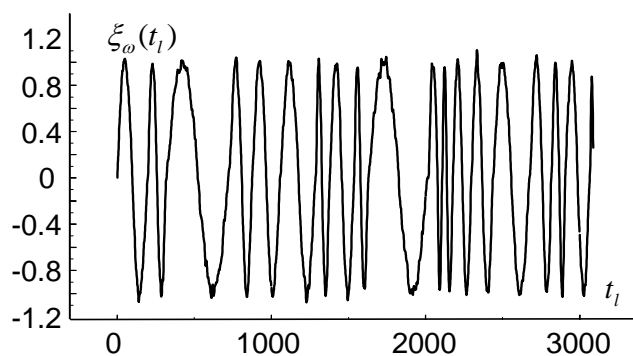


Рис. 5.32. Змодельована тестова реалізація для перевірки методу верифікації циклічності

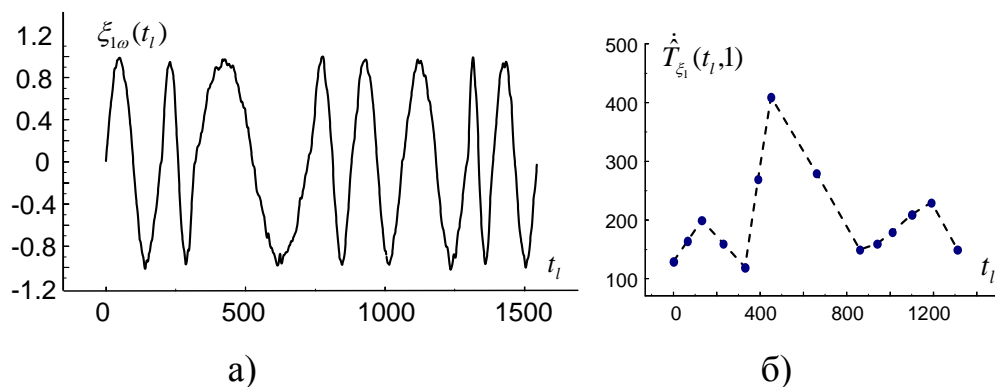


Рис. 5.33. Перша частина досліджуваного сигналу та оцінена ритмічна структура, пунктиром позначена кусково-лінійна функція ритму: а) перша частина сигналу; б) оцінена ритмічна структура першої частини сигналу

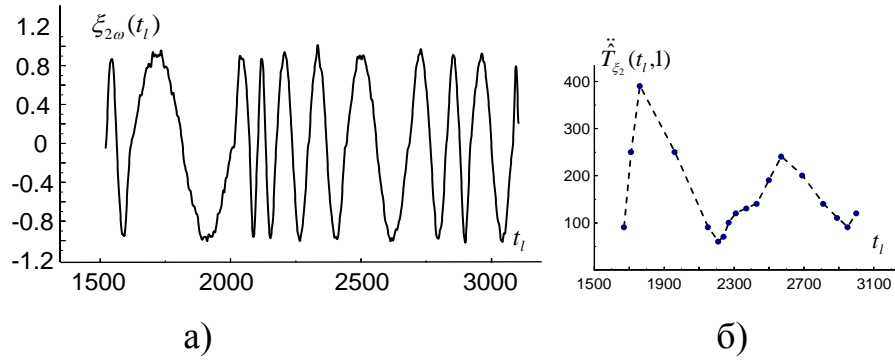


Рис. 5.34. Друга частина досліджуваного сигналу та оцінена ритмічна структура, пунктиром позначена кусково-лінійна функція ритму: а) друга частина сигналу; б) оцінена функція ритму другої частини сигналу

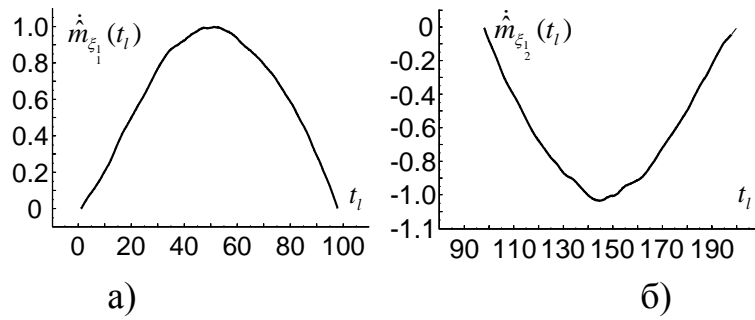


Рис. 5.35. Реалізації оцінок математичних сподівань першої частини сигналу для сегментів-зон: а) перший сегмент-зона; б) другий сегмент-зона

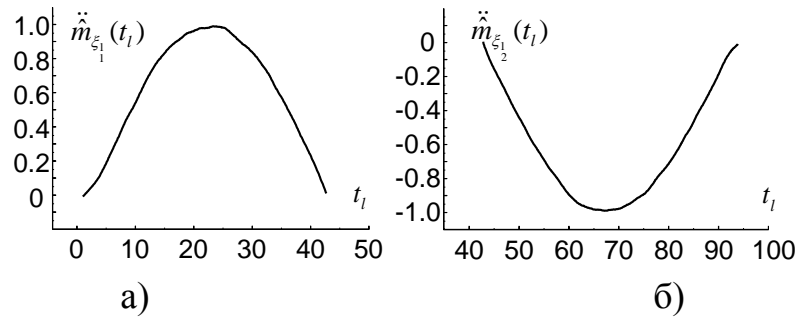


Рис. 5.36. Реалізації оцінок математичних сподівань другої частини сигналу для сегментів-зон: а) перший сегмент-зона; б) другий сегмент-зона

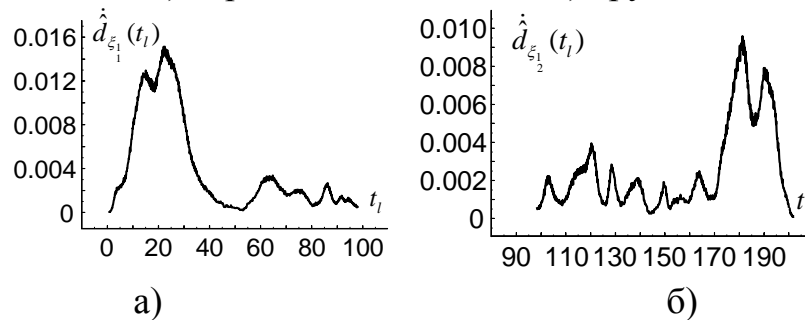


Рис. 5.37. Реалізації оцінок дисперсій першої частини сигналу для сегментів-зон: а) перший сегмент-зона; б) другий сегмент-зона

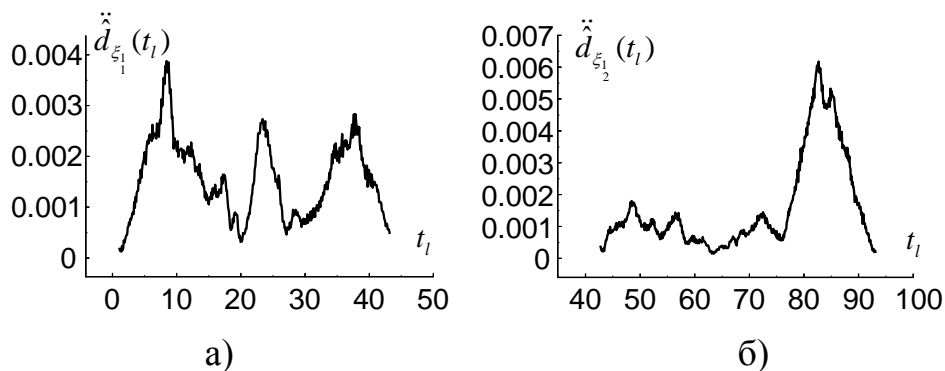


Рис. 5.38. Реалізації оцінок дисперсій другої частини сигналу для сегментів-зон:

а) перший сегмент-зона; б) другий сегмент-зона

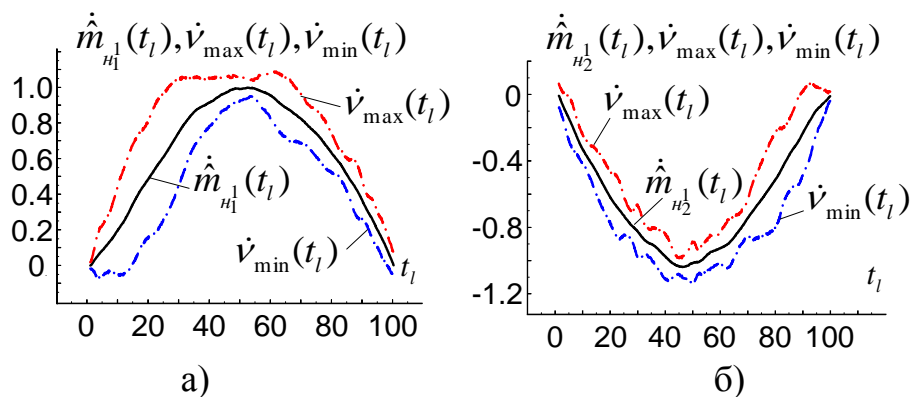


Рис. 5.39. Інтервали довіри нормованих реалізацій оцінок (математичного сподівання та дисперсії) першої частини сигналу (ймовірність довіри $p = 0,997$):

а) перший сегмент-зона, б) другий сегмент-зона

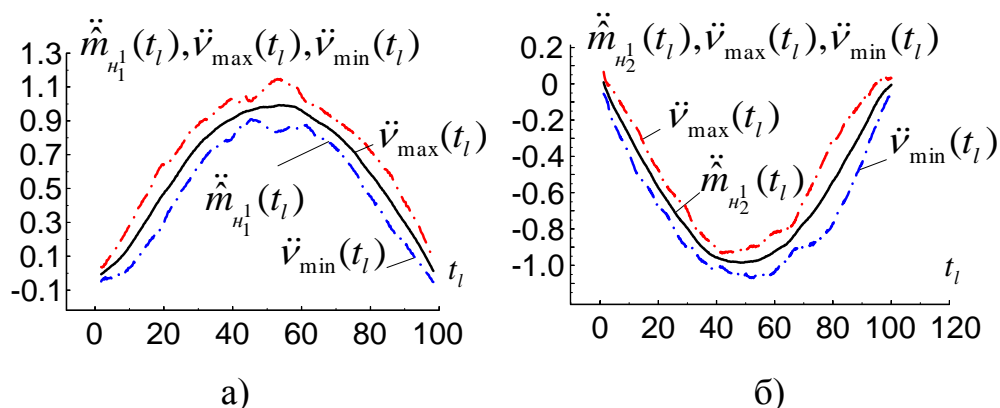


Рис. 5.40. Інтервали довіри нормованих реалізацій оцінок (математичного сподівання та дисперсії) другої частини сигналу (ймовірність довіри $p = 0,997$):

а) перший сегмент-зона, б) другий сегмент-зона

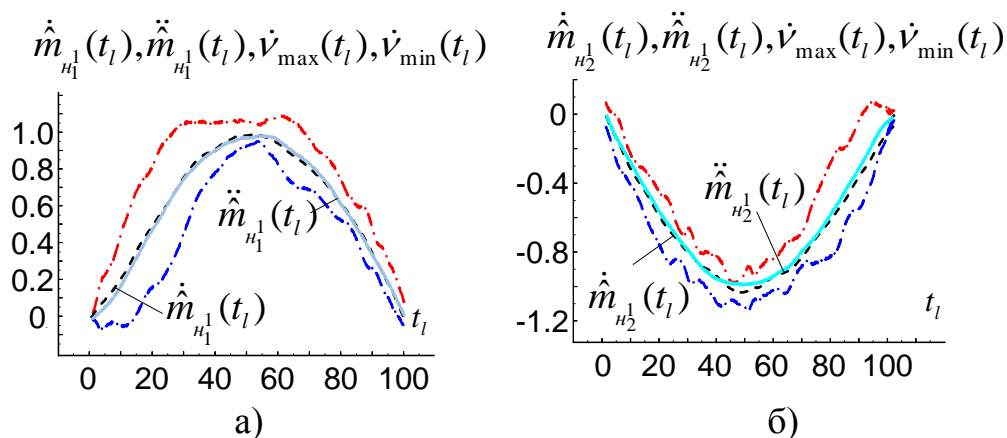


Рис. 5.41. Інтервали довіри нормованих реалізацій оцінок першої частини сигналу та математичне сподівання другої частини сигналу: а) перший сегмент-зона, б) другий сегмент-зона

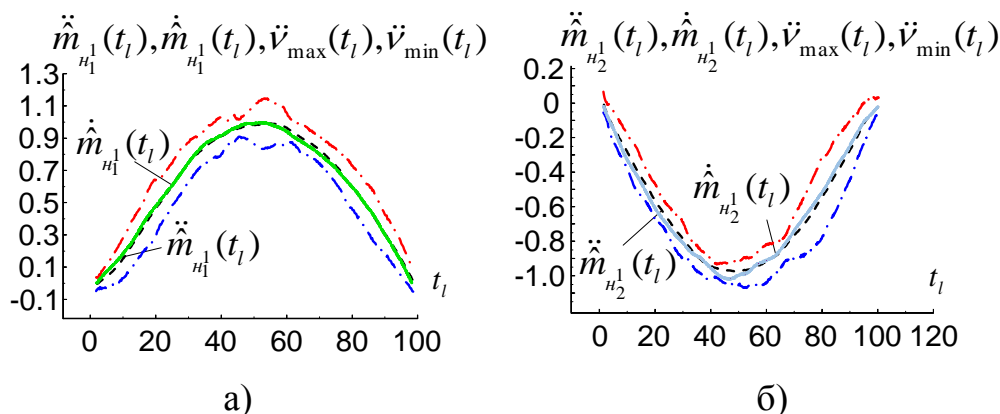


Рис. 5.42. Інтервали довіри нормованих реалізацій оцінок другої частини сигналу та математичне сподівання першої частини сигналу: а) перший сегмент-зона, б) другий сегмент-зона

Для даного прикладу отримані статистичні оцінки математичних сподівань відповідних сегментів-зон першої частини сигналу знаходяться в інтервалах довіри, визначених через статистичні оцінки математичних сподівань і дисперсій відповідних сегментів-зон другої частини сигналу, що підтверджує висунуту гіпотезу H_0 – досліджуваний сигнал є циклічним. Слід зазначити, що при застосуванні методу у випадку, коли ідентифікована сегментна-зонна структура необхідно проводити верифікацію циклічності окремо для відповідних сегментів-зон (як це наведено на рисунках 5.33–5.42). А у випадку ідентифікованої

сегментної циклічної структури проводити верифікацію для відповідних сегментів-циклів.

5.7. Висновки до п'ятого розділу

1. Враховуючи розроблені методи оцінювання ритмічних структур циклічних сигналів проведено, оцінювання похибок, які виникають при передискретизації циклічних сигналів із урахуванням різних оцінених ритмічних структур. Встановлено, що середня похибка передискретизації циклічних сигналів на різних циклах не є високою, і тому не суттєво впливає на результати передискретизації циклічних сигналів. Її середнє значення на досліджуваних реалізаціях циклічних сигналів складає 0,06. Для ритмічних структур, оцінених відомим методом на основі кусково-лінійної інтерполяції, вона складає 0,05, а на основі методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури похибка є найменшою і дорівнює 0,04.

2. Враховуючи відомі методи статистичного опрацювання циклічних сигналів, досліджено, як впливають на результати статистичного опрацювання циклічних сигналів (оцінювання їх ймовірнісних характеристик) різні ритмічні структури, оцінені розробленими та відомим методами. Встановлено, що при статистичному опрацюванні із застосуванням ритмічних структур на основі методів змішаної інтерполяції – кубічним чи квадратичним сплайнами та кусково-лінійної інтерполяції спостерігаються незначні спотворення значень оцінки дисперсії. Проте максимальні значення оцінки дисперсії є меншими у порівнянні з значенням дисперсії, отриманої при врахуванні ритмічної структури на основі відомого методу кусково-лінійної інтерполяції. Серед досліджуваних методів оцінювання ритмічних структур найменша дисперсія є у випадку застосування ритмічної структури, отриманої на основі методу її адаптивної ідентифікації, що свідчить про підвищення точності статистичного опрацювання циклічних сигналів.

3. Враховуючи відомий метод комп'ютерного моделювання циклічних

сигналів, досліджено, як впливають різні оцінені ритмічні структури на результати комп'ютерного моделювання реалізацій циклічних сигналів. Проведено комп'ютерне моделювання реалізацій різних циклічних сигналів на основі врахування розроблених у роботі методів оцінювання ритмічних структур. Визначено похибки комп'ютерного моделювання. Встановлено, що відносна похибка комп'ютерного моделювання реалізацій не перевищує 10%.

4. Обґрунтовано математичну модель та методи статистичного опрацювання процесу рельєфних утворень на поверхні металів викликані механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливом на неї у вигляді циклічного випадкового процесу. Це дозволило використовувати відомі методи оцінювання статистичних характеристик таких циклічних сигналів у задачах технічного діагностування стану її поверхні. У цілому це дозволило розширити апарат опрацювання та комп'ютерного моделювання процесів рельєфних утворень на поверхні металів на основі стохастичного підходу.

5. Розроблено метод верифікації математичних моделей циклічних сигналів, заснований на перевірці гіпотези про належність досліджуваного сигналу до класу циклічних з метою коректного застосування розроблених у роботі методів їх опрацювання та комп'ютерного моделювання.

РОЗДІЛ 6

ДІАГНОСТИЧНІ ТА ПРОГНОСТИЧНІ ОЗНАКИ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ. КОМПЛЕКС КОМП'ЮТЕРНИХ ПРОГРАМ ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ Й КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ

У шостому розділі проведено апробацію теоретичних положень та прикладних результатів даного дисертаційного дослідження в системах цифрової обробки даних у різних сферах за кардіосигналами, процесами рельєфних утворень на поверхні металів та економічними циклічними процесами. Обґрунтовано інформативні ознаки, які можуть бути використані при побудові нових систем цифрової обробки, зокрема, систем діагностики за зареєстрованими циклічними кардіосигналами чи процесами рельєфних утворень на поверхні металів. Наведено математичні співвідношення для визначення інформативних ознак (діагностичних чи прогностичних) та їх аналіз під час кардіодіагностики, технічного діагностування стану поверхні металів та аналізу й прогнозування економічних циклів. Розроблено комплекс комп'ютерних програм для автоматизованого опрацювання циклічних сигналів, який реалізує розроблені у дисертаційній роботі методи.

Основні результати шостого розділу опубліковані в роботах [81, 91, 168, 171, 176, 177, 213, 214, 293–299, 387, 417, 423, 427].

6.1. Інформативні ознаки в системах цифрової обробки циклічних сигналів

Під час проектування систем цифрової обробки циклічних сигналів (інформаційних систем) та їх підсистем, підтримки прийняття рішень (діагностичних чи прогностичних) важливим етапом є вибір та обґрунтування розмірності вектора інформативних ознак, який буде використовуватися при діагностуванні чи прогнозуванні в процедурах класифікації й розпізнавання

отриманих образів досліджуваних циклічних сигналів. За такого підходу діагностичні ознаки, що використовуються й за якими здійснюється автоматизована, комп'ютерна діагностика чи то функціонального стану серцево-судинної системи людини, чи то технічна діагностика стану поверхні металів повинні бути інформативними. Під інформативністю діагностичних ознак розуміється їх чутливість до зміни станів системи й при цьому одночасна нечутливість до різних завад (неінформативних шумових факторів), викликаних чинниками технічного чи біологічного походження. Інформативність діагностичних ознак у кількісному відношенні може визначатися величиною відношення мінімальної чи середньоквадратичної відстані між класами (навчаючими сукупностями) та середнім діаметром відповідних класів, що відповідають різним станам системи у векторному метричному просторі діагностичних ознак [201]. У разі, якщо таке відношення є значним, то компоненти вектора діагностичних ознак є інформативними.

Обґрунтуємо вектор діагностичних ознак, які є інформативними для здійснення діагностування стану серця людини. Тут зосередимо свою увагу саме на опрацюванні електрокардіосигналів. Проте подібний підхід може бути поширений на інші циклічні сигнали в інших галузях, під час їх морфологічного аналізу (аналізу форми циклів та зон), за якими здійснюється процедура діагностування стану досліджуваної системи. Спочатку розглянемо діагностичні ознаки, які відповідають одновимірним біомедичним образам, а згодом перейдемо до розгляду діагностичних ознак, які відповідають двовимірним біомедичним образам.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи наведені методи статистичної обробки [163, 169, 201], які дозволяють отримати статистичні оцінки імовірнісних характеристик із урахуванням різних ритмічних структур, оцінених розробленими методами в даній дисертаційній роботі. Наприклад, отримати статистичну оцінку математичного сподівання циклічного сигналу (електрокардіосигналу) та статистичну оцінку дисперсії, з урахуванням методу адаптивної ідентифікації

ритмічної структури. Отримані одновимірні статистичні оцінки ймовірнісних характеристик це і є біомедичні образи, для яких обґрунтовано інформативні ознаки, які можуть бути використані при побудові нових систем діагностики функціонального стану серцево-судинної системи людини. Діагностичний образ, наприклад, у вигляді оцінки математичного сподівання, яка відображає, у часі, усереднені значення повного циклу процесу скорочення серцевого м'яза і яка містить діагностичну інформацію про стан серцево-судинної системи людини, некоректно використовувати у тому вигляді, в якому вона отримана. Оскільки таким діагностичним ознакам властивий недолік, пов'язаний зі значною кількістю відліків, які їх задають (нагадаємо, що кількість відліків, отриманих статистичних оцінок імовірнісних характеристик визначають розмірність простору діагностичних ознак, яка для зручності їх використання в автоматизованих системах прийняття діагностичних рішень має бути невеликою). В автоматизованих системах цифрового опрацювання циклічних сигналів подання інформативних ознак в тому вигляді, в якому отримано, наприклад, оцінку математичного сподівання суттєво ускладнює їх використання при побудові навчальних сукупностей в діагностичних системах цифрової обробки та аналізу діагностичних образів. З метою зменшення розмірності простору діагностичних ознак при проведенні діагностування за отриманими оцінками ймовірнісних характеристик, як біомедичними діагностичними образами, пропонується використовувати не самі статистичні оцінки імовірнісних характеристик, а коефіцієнти їх розкладів у ряди по ортогональних базисах, які пропонується використовувати в якості інформативних діагностичних ознак. Даний підхід наведено у додатку Н, підпункт Н.1.

В даній роботі використовуємо подібний підхід, але для задачі класифікації

діагностичних ознак циклічних сигналів. Отже, природно провести дослідження розкладу різних статистичних оцінок імовірнісних характеристик циклічних сигналів по різних ортогональних базисах. Враховуючи розроблений узагальнений підхід до моделювання та опрацювання різних типів циклічних сигналів, моделями яких є циклічні функції які враховують сегментну структуру, наприклад, при кардіодіагностиці – це електрокардіосигнали в нормі та з різними видами патологій, то проведення повноцінного аналізу розкладів у різних ортонормованих базисах для різних типів циклічних сигналів у рамках однієї дисертаційної роботи не є можливим. Тому обмежимося дослідженням розкладів лише по кількох відомих ортогональних базисах і, як приклад, для кількох типів циклічних сигналів, оскільки навіть обмеження предметною областю – кардіометрією вимагає широких та ґрунтовних досліджень за спільною участю провідних лікарів-кардіологів з метою дослідження всіх можливих біомедичних образів, які відповідають різноманітним типам патологій, що відображаються типовими циклами електрокардіосигналів (для прикладу, низка таких патологій наведена у додатку А, підпункт А.2).

До відомих та поширених з добре вивченими властивостями ортогональних базисів належать поліноми дискретного аргументу Чебишева, Кравчука, Лагера [231] та дискретні тригонометричні функції. Основні відомості про дискретні поліноми, за якими проводилися розклади отриманих статистичних оцінок імовірнісних характеристик наведено в додатку Н, підпункт Н.2.

При виборі системи ортогональних функцій критерієм, за якими будуть здійснюватися розклади у ряди, отримані статистичні оцінки імовірнісних характеристик циклічних сигналів, будемо використовувати критерій мінімуму кількості перших коефіцієнтів ортогонального ряду при однаковому їх процентному вкладі в загальну енергію оцінок імовірнісних характеристик циклічних сигналів. Тобто застосуємо відомий критерій, так званий

«енергетичний критерій», такий підхід дозволить мінімізувати розмірність діагностичного простору та кількість інформативних діагностичних ознак і при цьому відтворити за отриманими коефіцієнтами статистичні оцінки імовірнісних характеристик циклічних сигналів, які розкладаються, з мінімальними спотвореннями.

Провівши розклади оцінки математичного сподівання в ряди по чотирьох ортогональних базисах: Чебишева, Кравчука, Лагера та ряд тригонометричних функцій, виходячи з критерію мінімуму кількості членів ряду, які вносять у повну енергію отриманих оцінок вклад не менше 95% [185], встановлено, що найменша кількість коефіцієнтів ряду використовується при розкладі в ряд за ортогональними поліномами Чебишева та в ряд тригонометричних функцій.

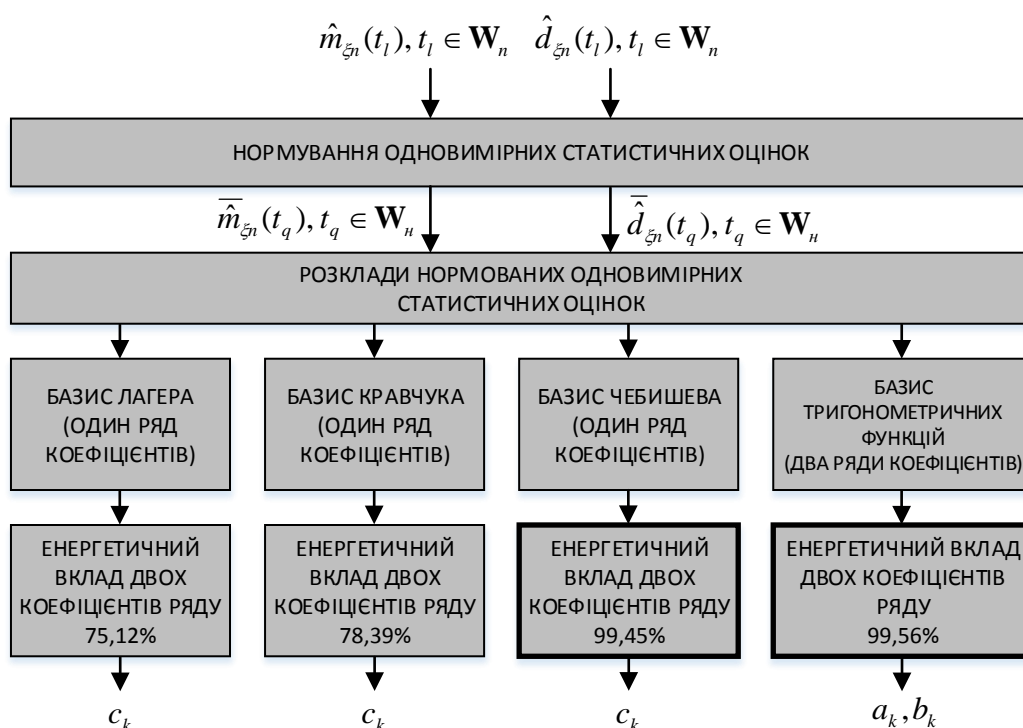


Рис. 6.1. Структурна схема дослідження одновимірних статистичних оцінок імовірнісних характеристик циклічних сигналів шляхом їх нормування та розкладу у різних базисах Лагера, Кравчука, Чебишева та ряду тригонометричних функцій

На рисунку 6.1 у вигляді структурної схеми наведено алгоритмічне

забезпечення для дослідження отриманих оцінок імовірнісних характеристик, як приклад, математичного сподівання та дисперсії шляхом їх розкладу у різних базисах. Для однотипного порівняння отриманих результатів розкладів статистичних оцінок імовірнісних характеристик математичного сподівання $\hat{m}_{\xi_n}(t_l), t_l \in \mathbf{W}_1, n = \overline{1, N}$ та дисперсії $\hat{d}_{\xi_n}(t_l), t_l \in \mathbf{W}_1, n = \overline{1, N}$ у даній структурній схемі передбачено процедуру їх нормування. Дана процедура нормування для отриманих статистичних оцінок імовірнісних характеристик математичного сподівання та дисперсії визначається за формулами (6.1).

$$\begin{aligned} \bar{m}_{\xi_n}(t_q) &= \hat{m}_{\xi_n}(t_q \cdot \frac{T_n}{T_n}), \hat{m}_{\xi_n}(t_l), t_l \in \mathbf{W}_n, t_q \in \mathbf{W}_n, n = \overline{1, N}, \\ \bar{d}_{\xi_n}(t_q) &= \hat{d}_{\xi_n}(t_q \cdot \frac{T_n}{T_n}), \hat{d}_{\xi_n}(t_l), t_l \in \mathbf{W}_n, t_q \in \mathbf{W}_n, n = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (6.1)$$

де \mathbf{W}_n - область визначення нормованих статистичних оцінок математичного сподівання та дисперсії; T_n - тривалість нормованої статистичної оцінки математичного сподівання та дисперсії; T_n - тривалість отриманої n -ї статистичної оцінки математичного сподівання та відповідно дисперсії, $n = \overline{1, N}$; \mathbf{W}_n - область визначення отриманих n -их статистичних оцінок математичного сподівання та відповідно дисперсії; t_q - кількість часових відліків нормованої статистичної оцінки математичного сподівання та відповідно дисперсії, $t_q = \overline{1, T_n}$; t_l - кількість часових відліків статистичної оцінки математичного сподівання та відповідно дисперсії, $t_l = \overline{1, T_n}$, $n = \overline{1, N}$.

Із отриманих результатів розкладів нормованих статистичних оцінок $\bar{m}_{\xi_n}(t_q), t_q \in \mathbf{W}_n, n = \overline{1, N}$, $\bar{d}_{\xi_n}(t_q), t_q \in \mathbf{W}_n, n = \overline{1, N}$, використовуючи енергетичний критерій, впливає, що значний вклад в енергію відповідної статистичної оцінки імовірнісних характеристик вносять перші два коефіцієнти ряду Чебишева $\{c_k, k = \overline{0, 1}\}$ та два коефіцієнти рядів тригонометричних функцій $\{a_k, b_k, k = \overline{0, 1}\}$

(див. рис. 6.1). Для ряду тригонометричних функцій вклад складає 99,6%, що є краще на одну десяту за коефіцієнти ряду Чебишева, вклад яких складає 99,5% проте при розкладі в тригонометричні ряди ми отримуємо не два коефіцієнти, а чотири, оскільки процедура розкладу передбачає два ряди коефіцієнтів. Тому будемо використовувати для розкладу саме ряд Чебишева і два коефіцієнти цього ряду в якості інформативних діагностичних ознак при проведенні процедури класифікації діагностичних образів на класи. При дослідженні різних циклічних сигналів будемо використовувати множину векторів їх статистичних оцінок імовірнісних характеристик $\{Y_n(\omega, t), n = \overline{1, N}\}$, а також множину векторів їх нормованих статистичних оцінок імовірнісних характеристик $\{\bar{Y}_n(\omega, t), n = \overline{1, N}\}$.

Як приклад, на рисунках 6.2–6.4 наведено результати розкладу нормованих статистичних оцінок імовірнісних характеристик циклічних сигналів у ряд Чебишева, які відповідають електрокардіосигналам у нормі та з різними видами патологій. Далі розглянемо побудову діагностичних просторів на основі врахування отриманих перших двох коефіцієнтів розкладу у ряд Чебишева як інформативних діагностичних ознак, необхідних при проведенні кардіодіагностики.

6.1.1. Діагностичні ознаки в системах цифрової діагностики стану серця людини за електрокардіосигналами (у медицині). Під час проведення кардіодіагностики лікарям важливо мати ефективний, діагностичний інструмент, який дозволяє досліджувати й достовірно виявляти різні серцево-судинні захворювання. Таким інструментом може виступати складова спеціалізованого програмного забезпечення систем цифрової обробки циклічних сигналів, яка дозволяє класифікувати й розпізнавати досліджувані морфологічні характеристики (характеристики форми сегментів-циклів та сегментів-зон) електрокардіосигналів. З цією метою використаємо обґрунтовані інформативні діагностичні ознаки у вигляді перших двох коефіцієнтів розкладу оцінок математичного сподівання у ряд Чебишева для побудови діагностичного простору. Для прикладу, розглянемо кілька класів діагностичних ознак електрокардіосигналів у нормі та з різними видами патологій.

Позначимо отримані вектори діагностичних ознак у вигляді коефіцієнтів ортогональних розкладів у ряд Чебишева статистичних оцінок імовірнісних характеристик циклічних електрокардіосигналів у нормі $\{N(c_0, c_1)\}$, та при патологіях $\{P_1(c_0, c_1), \dots, P_n(c_0, c_1)\}$. Побудуємо на діагностичному просторі з відповідними координатами c_0 та c_1 , де c_0, c_1 – відповідно нульовий та перший коефіцієнти ортогонального розкладу у ряді Чебишева статистичної оцінки математичного сподівання циклу електрокардіосигналу.

6.1.1.1. Діагностичні ознаки у вигляді перших двох коефіцієнтів розкладу оцінки математичного сподівання електрокардіосигналу у ряд Чебишева. Провівши статистичний аналіз циклічних електрокардіосигналів із урахуванням оцінених ритмічних структур методами, описаними у четвертому розділі дисертаційної роботи (наведені далі результати отримані з використанням методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури) в нормі та з різними видами патологій, отримуємо статистичні оцінки їх математичних сподівань. Для прикладу, розглянемо ЕКС при патології ішемії (аномалії сегмента-зони Т та сегмента-зон ST, що свідчить про порушення реполяризації шлуночків). У таких ЕКС може бути, наприклад, асиметрична інверсія сегмента Т або він взагалі відсутній. Та розглянемо ЕКС при патології – синдромі CLC (синдром Клерка-Леві-Кристеско характеризується вкороченим сегментом-зон $PQ < 0,12$ с). Отримані нормовані статистичні оцінки математичного сподівання проходили розклад у базисі Чебишева, для прикладу, наведено результати 30 електрокардіосигналів (10 ЕКС при нормі $\{N(c_0, c_1)\}$, 10 – при ішемії $\{P_1(c_0, c_1)\}$, 10 – при синдромі CLC $\{P_2(c_0, c_1)\}$). Діагностичні ознаки, які зображені у вигляді точок, ромбів та квадратів мають координати коефіцієнтів c_0, c_1 наведені на рисунку 6.5.

На рисунках 6.2–6.4 наведено статистичні оцінки математичних сподівань та їх розклади у ряд Чебишева.

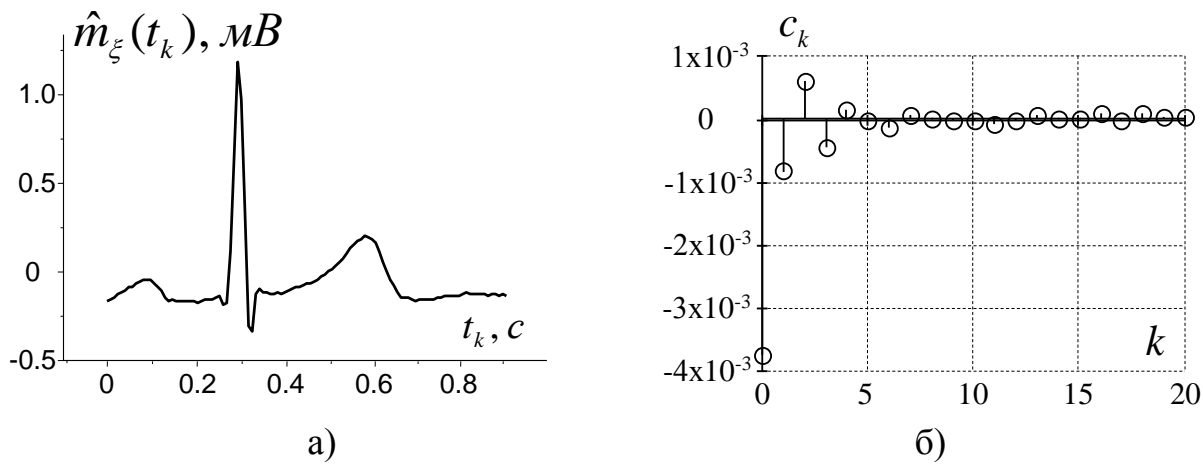


Рис. 6.2. Реалізація статистичної оцінки математичного сподівання ЕКС та коефіцієнти її розкладу у ряд Чебишева: а) реалізація статистичної оцінки математичного сподівання в нормі (діагноз – умовно здорова людина); б) спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

Після побудови класів діагностичних ознак (див. рис. 6.5) на діагностичному просторі знаходимо їх центри та відстані між центрами класів діагностичних ознак, а також середньоквадратичне відхилення діагностичних ознак від центру в межах класу.

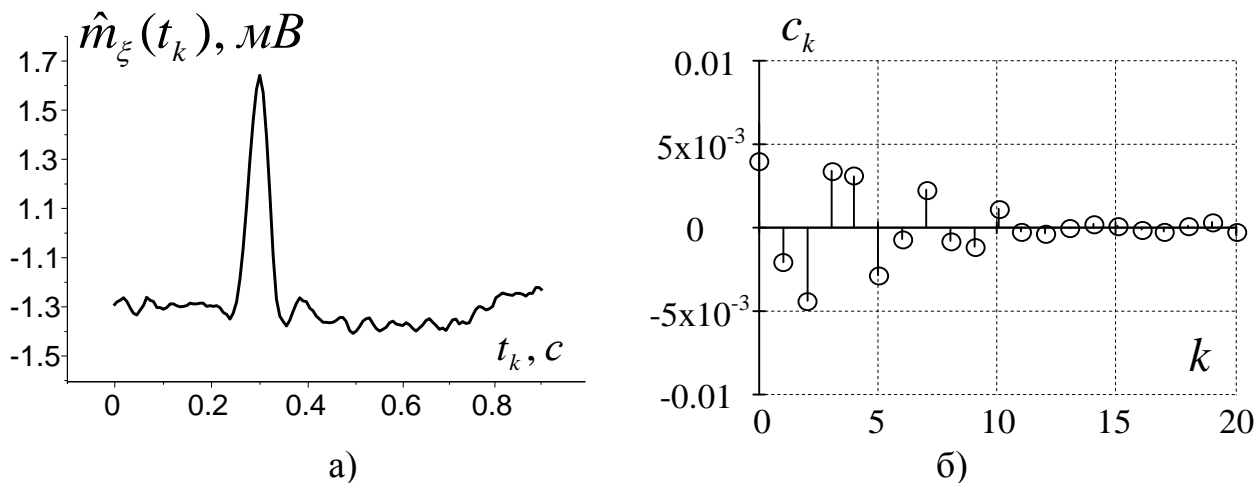


Рис. 6.3. Реалізація статистичної оцінки математичного сподівання ЕКС та коефіцієнти її розкладу у ряд Чебишева: а) реалізація статистичної оцінки математичного сподівання при патології (діагноз – ішемія); б) спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

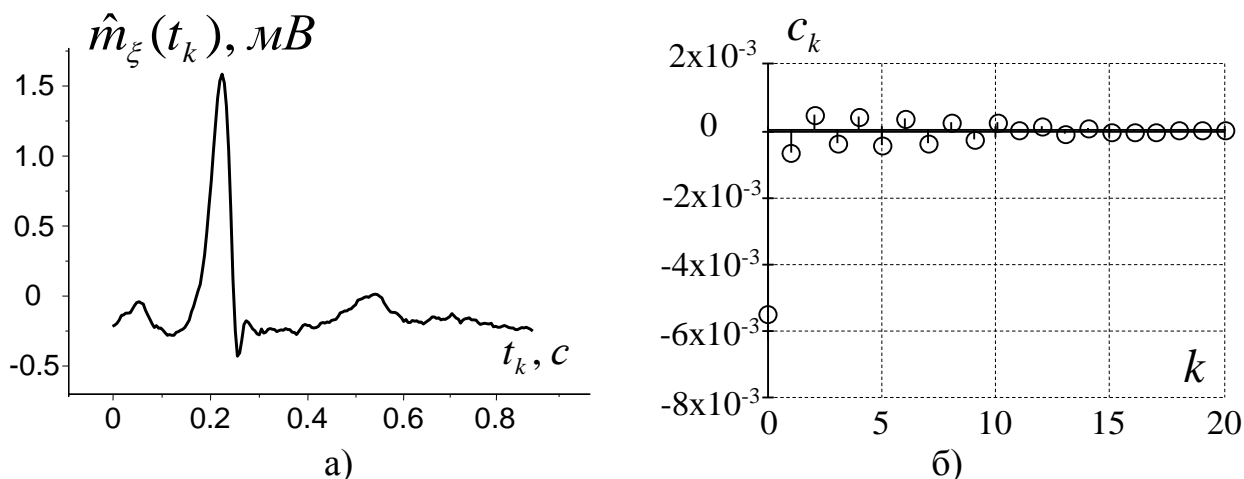


Рис. 6.4. Реалізація статистичної оцінки математичного сподівання ЕКС та коефіцієнти її розкладу в ряд Чебишева: а) реалізація статистичної оцінки математичного сподівання при патології (діагноз – синдром CLC); б) спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

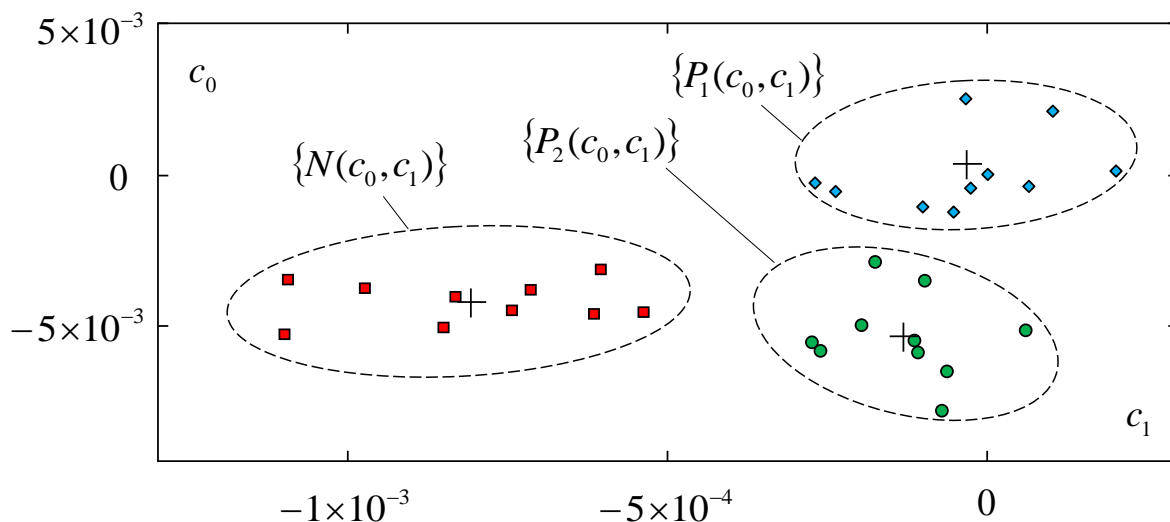


Рис. 6.5. Діагностичний простір коефіцієнтів ортогональних розкладів нормованих статистичних оцінок математичного сподівання (червоні квадрати – ЕКС умовно здорової людини, сині ромби – ЕКС при патології ішемії, зелені крапки – ЕКС при патології синдрому CLC)

У таблиці 6.1 зведені відстані між центрами трьох класів діагностичних ознак $\{N(c_0, c_1)\}$, $\{P_1(c_0, c_1)\}$ та $\{P_2(c_0, c_1)\}$.

Таблиця 6.1

Відстані між центрами класів діагностичних ознак

Норма – Ішемія $\{N(c_0, c_1)\} - \{P_1(c_0, c_1)\}$	Норма – Синдром CLC $\{N(c_0, c_1)\} - \{P_2(c_0, c_1)\}$	Ішемія – Синдром CLC $\{P_1(c_0, c_1)\} - \{P_2(c_0, c_1)\}$
$4.42 \cdot 10^{-3}$	$5.47 \cdot 10^{-3}$	$1.31 \cdot 10^{-3}$

У таблиці 6.2 зведені середньоквадратичні відхилення діагностичних ознак від центрів трьох класів діагностичних ознак $\{N(c_0, c_1)\}$, $\{P_1(c_0, c_1)\}$ та $\{P_2(c_0, c_1)\}$.

Таблиця 6.2

Середньоквадратичні відхилення діагностичних ознак від центрів класів діагностичних ознак

Норма $\{N(c_0, c_1)\}$	Ішемія $\{P_1(c_0, c_1)\}$	Синдром CLC $\{P_2(c_0, c_1)\}$
$6.02 \cdot 10^{-4}$	$9.99 \cdot 10^{-4}$	$9.91 \cdot 10^{-4}$

У таблиці 6.3 зведений кількісний показник інформативності ознак між трьома класами діагностичних ознак $\{N(c_0, c_1)\}$, $\{P_1(c_0, c_1)\}$ та $\{P_2(c_0, c_1)\}$.

Таблиця 6.3

Кількісний показник інформативності ознак між класами діагностичних ознак

Норма – Ішемія $\{N(c_0, c_1)\} - \{P_1(c_0, c_1)\}$	Норма – Синдром CLC $\{N(c_0, c_1)\} - \{P_2(c_0, c_1)\}$	Ішемія – Синдром CLC $\{P_1(c_0, c_1)\} - \{P_2(c_0, c_1)\}$
7.34	5.47	1.32

Результати зведені в таблиці 6.3 – це відношення відстаней між класами діагностичних ознак та середньоквадратичним відхиленням класів відповідних діагностичних ознак (можна розглядати як середній радіус, який описує клас). Зі встановлених результатів випливає, що чим більше визначене значення кількісного показника, тим коректніше буде визначена належність до того чи іншого класу діагностичних ознак. Наприклад, класи діагностичних ознак, які відповідають двом патологіям, розташовані на значно більшій відстані від класу

діагностичних ознак у нормі (для цього класу показник інформативності є більшим) і ближче один до одного, що дозволяє достовірніше розпізнати приналежність вектора діагностичних ознак до класу, що відповідає нормі, ніж до класів двох зазначених патологій (ішемії та синдрому CLC).

Для прикладу, в додатку П, підпункт П.1 наведено результати розкладів різних оцінок імовірнісних характеристик ЕКС та механічних процесів рельєфних утворень на поверхні металів, зумовлених силовим чи енергетичним впливом на них.

В даній роботі робиться спроба охопити широке коло різних типів циклічних сигналів, а опрацювання здійснювалося лише для кількох типів ЕКС в нормі та з різними видами патологій, тому в майбутньому необхідно буде провести розклади статистичних оцінок в інших базисах які не були розглянуті у даній роботі (наприклад, розклад у базисі Карунена-Лоева та інших), з метою однозначного ствердження, що використання коефіцієнтів Чебишева буде найкращим з точки зору енергетичного критерію для всіх можливих видів циклічних сигналів. Такі ґрунтовні дослідження неможливо провести в рамках однієї дисертаційної роботи, оскільки вони вимагають опрацювання значної кількості циклічних сигналів з різними видами патологій. Тому залишимо це питання відкритим для подальших наукових досліджень.

Розглянемо двовимірні статистичні оцінки імовірнісних характеристик циклічних сигналів, такі, як кореляційна та коваріаційна функції.

6.1.1.2. Діагностичні ознаки у вигляді перших п'ятидесяти коефіцієнтів розкладу сумісних імовірнісних характеристик кореляційної функції та коваріаційної функції електрокардіосигналу у тригонометричні ряди. В працях [171, 177] наведено двовимірні діагностичні ознаки електрокардіосигналів, які можуть бути використані в задачах діагностики серцево-судинної системи людини. При використанні діагностичних ознак двовимірних оцінок кореляційної та коваріаційної функцій запропоновано використовувати тригонометричні ряди, оскільки розклади в двовимірні ряди за тригонометричними функціями добре досліджені та широко використовуються на практиці. Однозначно не можна

стверджувати, що розклади запропонованих діагностичних ознак саме у ряд тригонометричних функцій [171, 177] найкраще дозволяють мінімізувати розмірність вектора діагностичних ознак. Тому тут так само необхідно провести додаткове дослідження інших двовимірних розкладів в інших базисах функцій, але таке дослідження виходить за рамки даного дисертаційного дослідження й може бути розвинуто у подальших роботах.

Для розкладу реалізації нормованих статистичних оцінок кореляційних (автокореляційних) та коваріаційних функцій, сумісних кореляційних та коваріаційних функцій у двовимірні ряди використовували формули [171, 177]:

$$a_{k_1, k_2} = \frac{1}{T_{c_1} \cdot T_{c_2}} \int_0^{T_{c_1}} \int_0^{T_{c_2}} B \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_{c_1}} t_1 \cdot k_1 + \frac{2\pi}{T_{c_2}} t_2 \cdot k_2\right) dt_1 \cdot dt_2, k_1, k_2 \in \mathbf{Z}, \quad (6.2)$$

$$b_{k_1, k_2} = \frac{1}{T_{c_1} \cdot T_{c_2}} \int_0^{T_{c_1}} \int_0^{T_{c_2}} B \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_{c_1}} t_1 \cdot k_1 + \frac{2\pi}{T_{c_2}} t_2 \cdot k_2\right) dt_1 \cdot dt_2, k_1, k_2 \in \mathbf{Z}, \quad (6.3)$$

де $\{a_{k_1, k_2}, k_1, k_2 \in \mathbf{Z}\}$ та $\{b_{k_1, k_2}, k_1, k_2 \in \mathbf{Z}\}$ – множини коефіцієнтів відповідно косинусного та синусного спектрів реалізації оцінок взаємної кореляційної функції в межах першого циклу. В такому разі $B = \hat{r}_{\xi_1, \xi_2}(t_1, t_2), t_1, t_2 \in \mathbf{W}_1$, кореляційної функції поза межами першого циклу

$B = \hat{r}_{\xi_1, \xi_2}(t_1, t_2), t_1 \in \mathbf{W}, t_2 \in \bigcup_{i=2}^C \mathbf{W}_i$, коваріаційних функцій у межах першого циклу

$B = \hat{c}_{\xi_1, \xi_2}(t_1, t_2), t_1, t_2 \in \mathbf{W}_1$ та коваріаційних функцій за межами першого циклу

$B = \hat{c}_{\xi_1, \xi_2}(t_1, t_2), t_1 \in \mathbf{W}, t_2 \in \bigcup_{i=2}^C \mathbf{W}_i$, T_{c_1}, T_{c_2} – тривалості відповідних нормованих

сумісних статистичних оцінок кореляційної чи коваріаційної функції.

Аналіз сумісних статистичних оцінок імовірнісних характеристик циклічних сигналів (електрокардіосигналів і процесів рельєфних утворень на поверхні металів, які виникають під силовим чи енергетичним впливом на них)

наведено в роботах [171, 427, 428]. На рисунку 6.6 у вигляді структурної схеми наведено алгоритмічне забезпечення методів дослідження двовимірних діагностичних ознак (кореляційних та коваріаційних функцій) у комп'ютерних системах цифрової обробки даних.

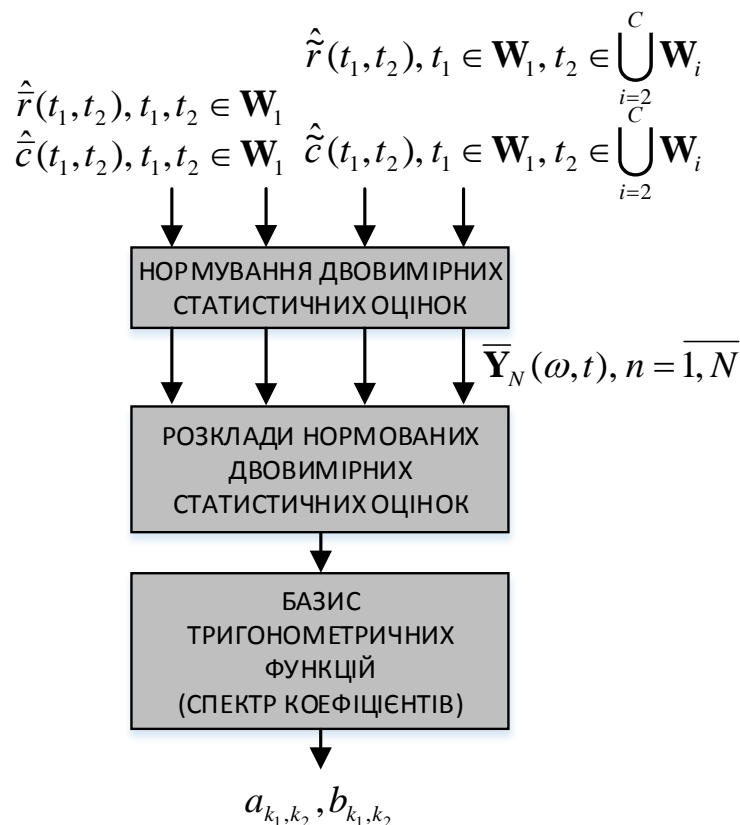


Рис. 6.6. Структурна схема дослідження двовимірних статистичних оцінок імовірнісних характеристик циклічних сигналів шляхом їх нормування та розкладу у базисі тригонометричних функцій

Звісно, для застосування на практиці запропонованих у роботах [171, 427, 428] двовимірних статистичних оцінок імовірнісних характеристик, як діагностичних ознак, у системах цифрової обробки циклічних сигналів необхідні подальші дослідження та тісна співпраця з лікарями-експертами для створення автоматизованих підсистем прийняття діагностичних рішень про стан серцево-судинної системи людини. Такі подальші дослідження дозволять сформулювати велику базу класів діагностичних ознак та побудувати навчаючі сукупності за можливими видами електрокардіосигналів, які характеризують стан системи в

нормі чи з наявними різними видами патологій. Якщо мова йде про технічне діагностування поверхні металу, то про діагностичні ознаки, які характеризують стан, в якому перебуває досліджувана поверхня металу після силового чи енергетичного впливу на неї.

З метою дослідження статистичних оцінок сумісних кореляційних функцій синхронно зареєстрованих циклічних сигналів та аналіз спектрів їх розкладів при застосуванні двовимірних рядів тригонометричних функцій було проведено опрацювання різних циклічних сигналів, зокрема ЕКС, які віднесені лікарями-кардіологами до сигналів у нормі (умовно здорової людини – без ознак захворювання серцево-судинної системи) та сигналів з певною патологією. На рисунках П.33–П.47, додатку П для прикладу, наведено результати проведених експериментів з циклічними сигналами як в нормі, так і з різними видами патологій, як приклад наведено ЕКС, що відповідає патології – нижній інфаркт міокарда.

Розглянемо результати дослідження розкладів статистичних оцінок імовірнісних характеристик інших циклічних сигналів в інших галузях, а саме, для діагностики стану поверхні металу за циклічними процесами рельєфних утворень, які виникають на його поверхні під силовим чи енергетичним впливом.

6.1.2. Діагностичні ознаки в системах цифрової діагностики стану поверхні металу за процесами рельєфних утворень, що виникають під силовим чи енергетичним впливом на неї (у механіці). В роботах [81, 417, 427] наведено розклади статистичних оцінок процесів рельєфних утворень на поверхні металів під силовим чи енергетичним впливами на неї. Для прикладу, на рисунку 6.7 наведено результати такого дослідження.

Для розкладу отриманих реалізацій статистичних оцінок математичного сподівання та дисперсії в базисі тригонометричних функцій, в одновимірний ряд, використовували формули

$$a_k = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_c} t \cdot k\right) dt, k \in \mathbf{Z}, \quad (6.4)$$

$$b_k = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_c} t \cdot k\right) dt, k \in \mathbf{Z}, \quad (6.5)$$

де $\{a_k, k \in \mathbf{Z}\}$ та $\{b_k, k \in \mathbf{Z}\}$ – множини коефіцієнтів відповідно косинусного та синусного спектрів реалізації статистичних оцінок математичного сподівання та дисперсії; T_c – тривалість нормованої статистичної оцінки математичного сподівання чи дисперсії. При розкладі статистичних оцінок математичного сподівання $A = \hat{m}_\zeta(t)$, а при розкладі дисперсії $A = \hat{d}_\zeta(t)$ відповідно.

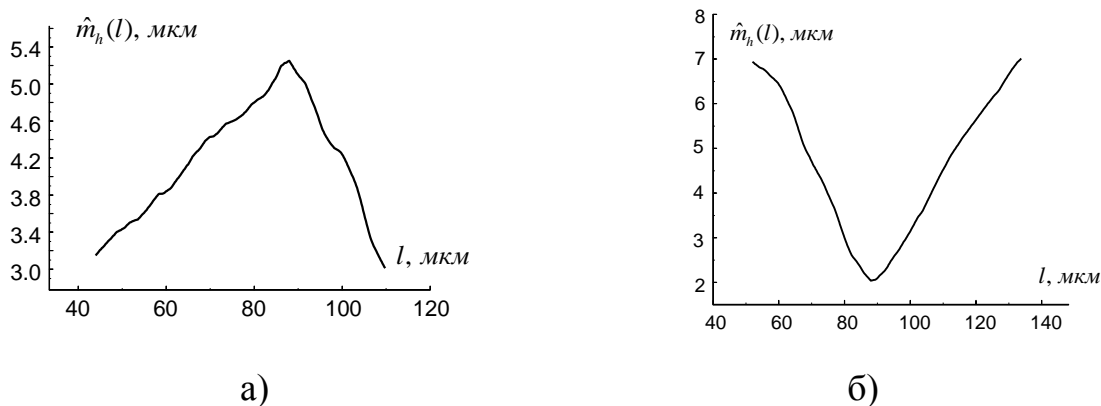


Рис. 6.7. Реалізація статистичної оцінки математичного сподівання ширини рельєфних утворень нанотитану після лазерної ударно-хвильової обробки: а) у воді; б) на повітрі

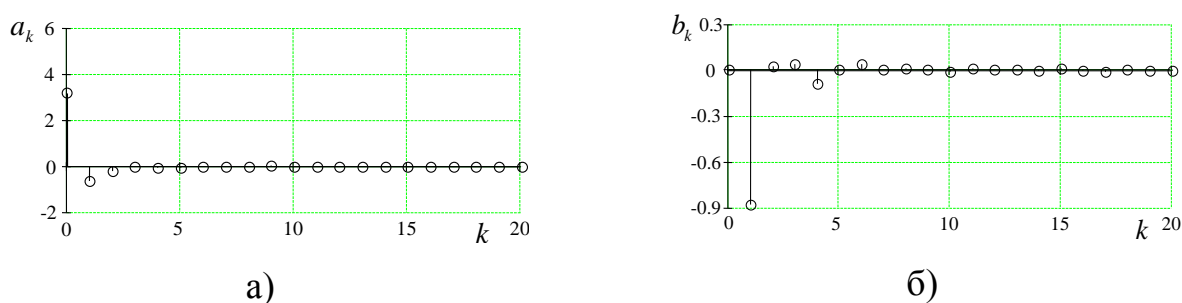


Рис. 6.8. Спектр коефіцієнтів розкладу статистичних оцінок математичного сподівання ширини рельєфних утворень нанотитану після лазерної ударно-хвильової обробки у ряди тригонометричних функцій: а), б) у воді

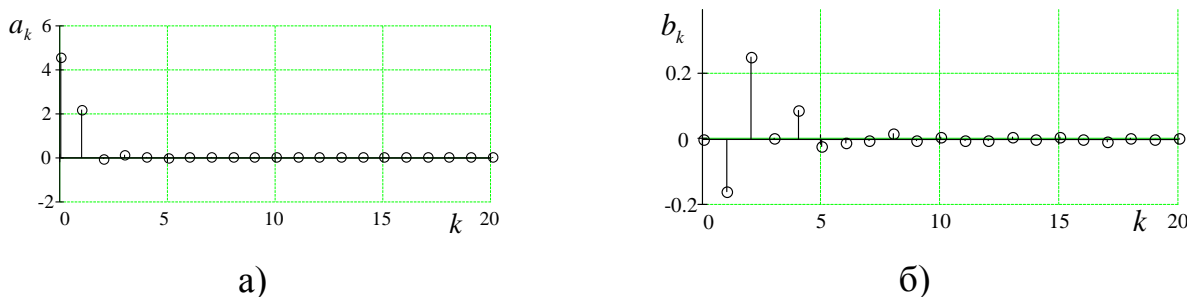


Рис. 6.9 Спектр коефіцієнтів розкладу статистичних оцінок математичного сподівання ширини рельєфних утворень нанотитану після лазерної ударно-хвильової обробки у ряди тригонометричних функцій: а), б) на повітрі

На рисунку 6.10, для прикладу, показано побудову діагностичного простору при використанні перших двох коефіцієнтів розкладу статистичних оцінок математичного сподівання процесу рельєфних утворень у тригонометричні ряди (див. рис. 6.8. та 6.9). Звісно, для побудови класів діагностичних ознак під час проведення діагностування стану поверхні металу необхідно провести значну кількість експериментів, що вимагає подальших досліджень у даному напрямку. В нашому випадку кількість проведених експериментів була обмежена, тому тут наведено підхід до побудови діагностичних просторів при застосуванні двох рядів коефіцієнтів аналогічно до описаного вище дослідження діагностичних ознак для циклічних ЕКС в медицині.

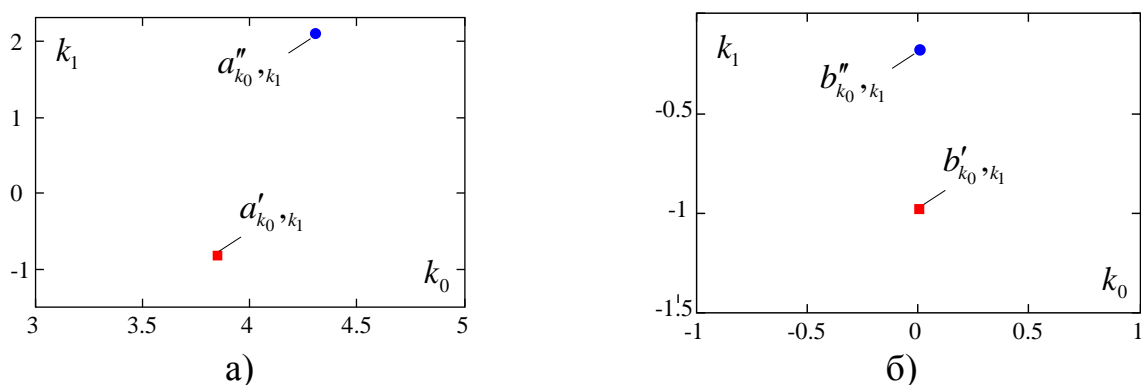


Рис. 6.10. Діагностичні простори коефіцієнтів розкладу реалізацій нормованих статистичних оцінок математичного сподівання ширини рельєфних утворень нанотитану після лазерної ударно-хвильової обробки у ряди тригонометричних функцій: а), б) у воді та на повітрі (червоні квадрати – у воді, сині крапки – на повітрі)

На рисунку 6.10 наведено, як приклад, елементи класів $a'_{k_0,k_1}, b'_{k_0,k_1}$ – які відповідають коефіцієнтам розкладу статистичних оцінок математичного сподівання ширини рельєфних утворень у воді, $a''_{k_0,k_1}, b''_{k_0,k_1}$ – які відповідають коефіцієнтам розкладу статистичних оцінок математичного сподівання ширини рельєфних утворень на повітрі.

На рисунку 6.11 наведено приклади розкладів нормованих двовимірних статистичних оцінок імовірнісних характеристик процесів рельєфних утворень автокореляційних функцій, наведених на рисунках 5.15, а) та 5.15, в).

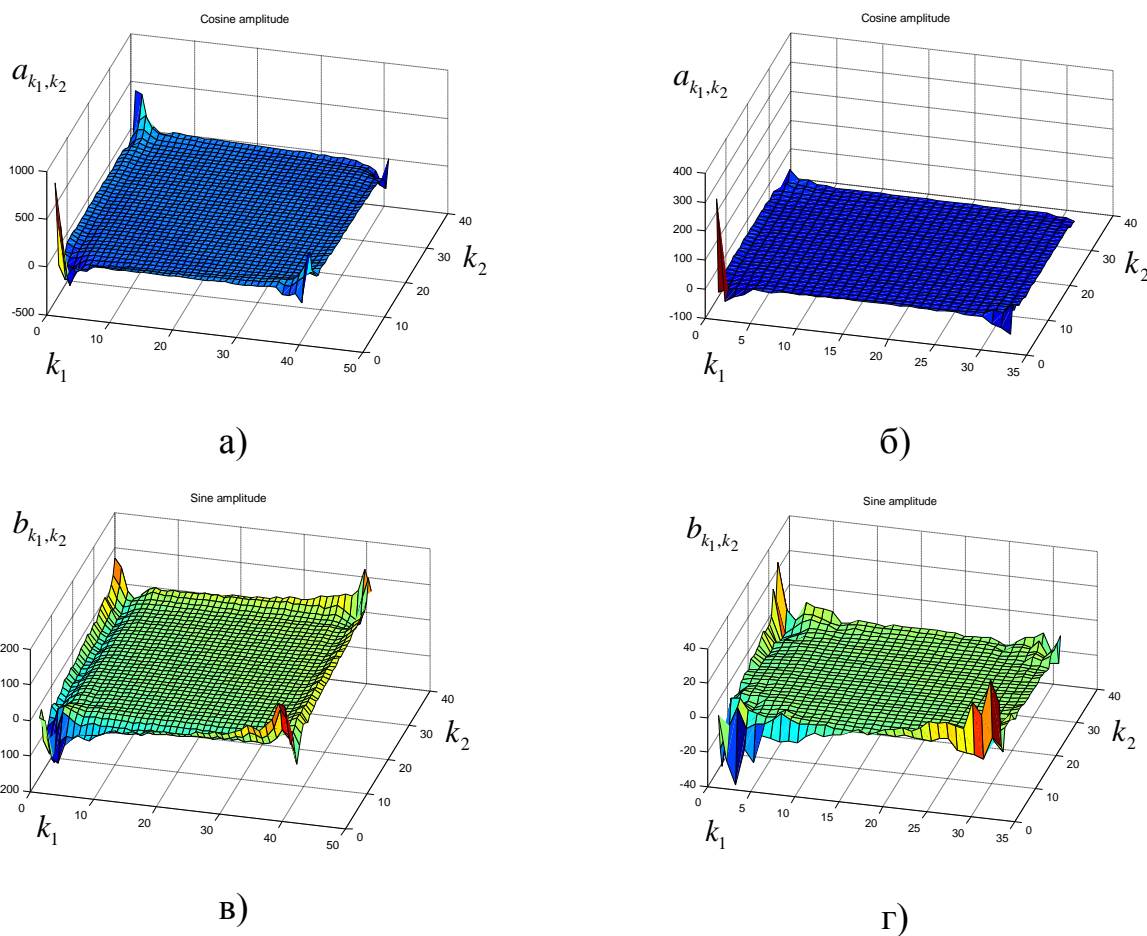


Рис. 6.11. Спектри коефіцієнтів оцінок автокореляційних функцій рельєфних утворень нанотитану після лазерної ударно-хвильової обробки в базисі тригонометричних функцій, на повітрі: а), б) косинусний спектр; в), г) синусний спектр

Використання подібного підходу при діагностуванні стану поверхні металів, як і при кардіодіагностиці вимагає, додаткових подальших досліджень,

оскільки для різних типів металів можна запропонувати й обґрунтувати свою мінімальну кількість інформативних діагностичних ознак у вигляді коефіцієнтів розкладу ряду. Також можна запропонувати й обґрунтувати різні базиси функцій, які будуть використовуватися при її розкладах. У даному дослідженні запропоновано використовувати не коефіцієнти ряду Чебишева, а коефіцієнти тригонометричних функцій, оскільки для таких процесів рельєфних утворень, більша кількість коефіцієнтів (їх чотири) дозволяє проводити інформативну діагностику стану поверхні металів.

6.1.3. Прогностичні ознаки в системах опрацювання циклічних економічних процесів (в економіці). Під час аналізу циклічних економічних процесів важливою задачею є прогнозування досліджуваних даних. Прогноз буває короткотерміновий та довготерміновий. Довготерміновий прогноз, як правило, формується для значної тривалості часової ділянки аналізуємих даних, для прикладу це річний прогноз, короткотерміновий прогноз відповідно формується для часових рамок меншої тривалості, наприклад, тижневий, місячний та інші. У даній роботі будемо акцентувати дослідження циклічних економічних процесів з побудовою довготермінового прогнозу на рік з урахуванням розроблених методів оцінювання різних ритмічних структур методами описаними у четвертому розділі.

На рисунку 6.12 у вигляді структурної схеми наведено алгоритмічне забезпечення для дослідження прогностичних ознак у комп'ютерних системах цифрового опрацювання, аналізу та прогнозу циклічних економічних процесів за допомогою двох методів. Суть двох методів прогнозування, які відображаються даною структурною схемою, наведено у роботі [91]. Вона полягає у побудові сукупності інтервалів довіри $\bar{\gamma}_1(t), \bar{\gamma}_2(t)$ чи $\bar{\bar{\gamma}}_1(t), \bar{\bar{\gamma}}_2(t)$, які із наперед заданою ймовірністю (надійністю) накривають значення майбутнього (прогнозованого) економічного циклу $\hat{\gamma}_\omega(t)$ чи $\hat{\bar{\gamma}}_\omega(t)$. При цьому метод прогнозування циклічних економічних процесів побудовано на основі математичної моделі у вигляді адитивної суміші циклічної компоненти та детермінованої компоненти (функції тренду).

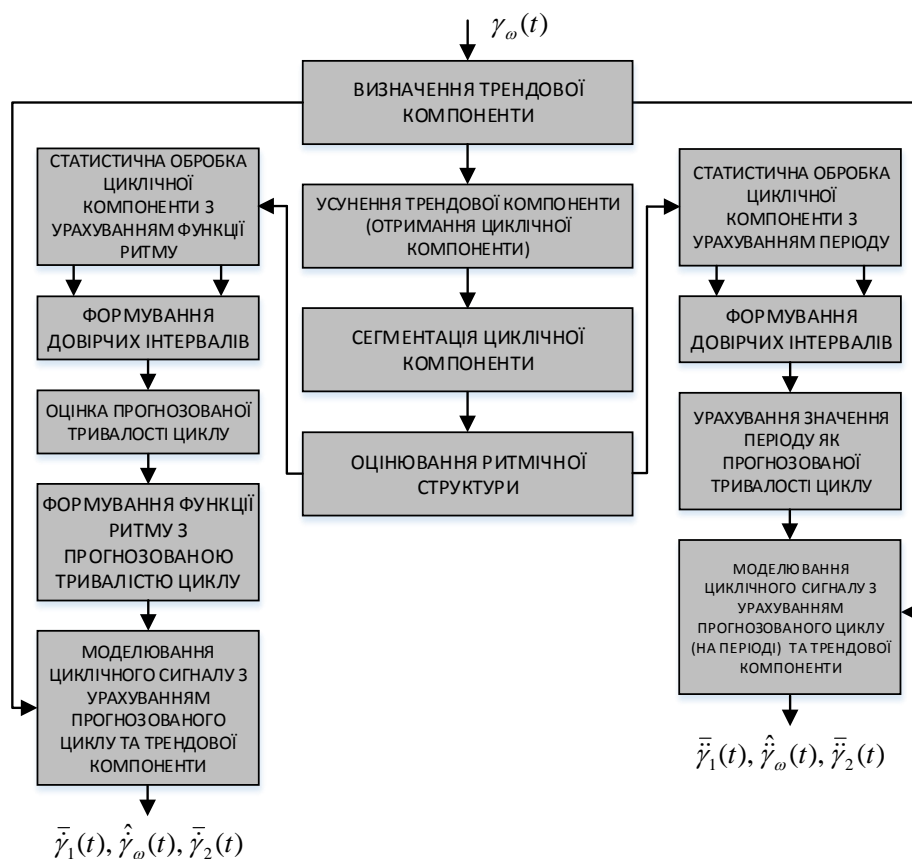


Рис. 6.12. Структурна схема дослідження прогностичних ознак за двома методами опрацювання циклічних економічних процесів

Процедура прогнозування циклічного економічного процесу складається з етапу прогнозування циклічної компоненти як складової циклічного економічного процесу та етапу прогнозування його трендової складової. Відмінність у двох підходах при прогнозуванні циклічної компоненти, наведених на структурній схемі (див. рис. 6.9), полягає в урахуванні різних ритмів (змінного чи постійного) при їх опрацюванні. При врахуванні ритмічною структурою змінного ритму використовується перший метод. При цьому необхідно проводити її оцінювання, а при врахуванні постійного ритму за рахунок визначення чи наперед задавання значення періоду використовується другий метод. Відповідно в двох методах використовуються дві математичні моделі циклічної компоненти. У першому випадку циклічна компонента – це циклічний випадковий процес, що враховує сегментну циклічну структуру, а у другому – стохастично-періодичний випадковий процес.

При першому підході в якості математичної моделі у методі прогнозування використана адитивна модель [91]

$$\dot{\gamma}(\omega, t) = \dot{\xi}(\omega, t) + f_{tr}(t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}, \quad (6.6)$$

де $\dot{\xi}(\omega, t)$ – циклічний випадковий процес як модель циклічної компоненти циклічного економічного процесу; $f_{tr}(t)$ – детермінована функція, що відображає тренд.

При другому підході в якості математичної моделі у методі прогнозування використана адитивна модель [91]

$$\dot{\gamma}(\omega, t) = \ddot{\xi}(\omega, t) + f_{tr}(t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}, \quad (6.7)$$

де $\ddot{\xi}(\omega, t)$ – стохастично-періодичний випадковий процес як модель циклічної компоненти циклічного економічного процесу.

Для результату прогнозування циклічної компоненти економічного процесу на базі моделі у вигляді циклічного випадкового процесу необхідно визначати множину інтервалів довіри $\dot{\gamma}_1(t), \dot{\gamma}_2(t)$ які будуються, виходячи з гіпотези про нормальність закону розподілу значень циклічного економічного процесу, про що сказано у роботах, зокрема у [89, 90, 292]. При такому підході верхня межа інтервалу довіри дорівнює

$$\dot{\gamma}_1(t) = \hat{m}_\xi(t) + 3 \cdot \sqrt{\hat{d}_\xi(t)}. \quad (6.8)$$

Нижня межа інтервалу довіри дорівнює

$$\dot{\gamma}_2(t) = \hat{m}_\xi(t) - 3 \cdot \sqrt{\hat{d}_\xi(t)}. \quad (6.9)$$

Внаслідок нормальності розподілу значень циклічної компоненти економічного процесу з ймовірністю $p = 0,997$ інтервал $\dot{\gamma}_1(t), \dot{\gamma}_2(t)$ охоплює відповідні значення циклічної компоненти економічного процесу.

При такому підході оцінки математичного сподівання та дисперсії будуть визначатись із урахуванням оціненої ритмічної структури згідно (М.4) та (М.5) додатку М.

Результатом прогнозування циклічного економічного процесу на базі моделі у вигляді адитивної суміші циклічного випадкового процесу та детермінованої функції тренду є множини інтервалів $\bar{\dot{\gamma}}_1(t), \bar{\dot{\gamma}}_2(t)$, які визначаються формулами (6.10) та (6.11).

Верхня межа інтервалу довіри дорівнює

$$\bar{\dot{\gamma}}_1(t) = \dot{\gamma}_1(t) + f_{tr}(t). \quad (6.10)$$

Нижня межа інтервалу довіри дорівнює

$$\bar{\dot{\gamma}}_2(t) = \dot{\gamma}_2(t) + f_{tr}(t). \quad (6.11)$$

Аналогічним чином для другого методу можна навести результати прогнозування циклічної компоненти економічного процесу на базі моделі у вигляді стохастично-періодичного випадкового процесу для якої $\ddot{\gamma}_1(t), \ddot{\gamma}_2(t)$ – множина інтервалів довіри, які обчислюють за формулами (6.12) та (6.13).

Верхня межа інтервалу довіри дорівнює

$$\ddot{\gamma}_1(t) = \hat{m}_{\xi}(t) + 3 \cdot \sqrt{\hat{d}_{\xi}(t)}. \quad (6.12)$$

Нижня межа інтервалу довіри дорівнює

$$\ddot{\gamma}_2(t) = \hat{m}_\xi(t) - 3 \cdot \sqrt{\hat{d}_\xi(t)}. \quad (6.13)$$

Реалізації статистичних оцінок імовірнісних характеристик стохастично-періодичного випадкового процесу, отриманих на основі статистичного опрацювання шляхом усереднення значень циклічної компоненти через період T реалізації, обчислюються за формулами (6.14) та (6.15).

Статистична оцінка математичного сподівання

$$\hat{m}_\xi(t) = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^{C-1} \ddot{\xi}_{\omega i}(t + n \cdot T), t \in \mathbf{W}, \quad (6.14)$$

де T – величина періоду, задана або оцінена відомим методом [276], або розробленими в роботі методами сегментації у випадку встановленого постійного значення ритму (періоду); n – величина кратного періоду.

Статистична оцінка дисперсії

$$\hat{d}_\xi(t) = \frac{1}{C-1} \sum_{i=1}^{C-1} \left(\ddot{\xi}_{\omega i}(t + n \cdot T) - \hat{m}_\xi(t + n \cdot T) \right)^2, t \in \mathbf{W}. \quad (6.15)$$

Результатом прогнозування циклічного економічного процесу на базі моделі (6.7) є побудова множини інтервалів $\bar{\gamma}_1(t), \bar{\gamma}_2(t)$, які обчислюються аналогічно до формул (6.14), (6.15) для першого методу, за формулами (6.16) та (6.17) – для другого методу.

Верхня межа інтервалу довіри дорівнює

$$\bar{\gamma}_1(t) = \ddot{\gamma}_1(t) + f_r(t). \quad (6.16)$$

Нижня межа інтервалу довіри дорівнює

$$\bar{\gamma}_2(t) = \ddot{\gamma}_2(t) + f_r(t). \quad (6.17)$$

З метою встановлення факту зменшення похибки при прогнозуванні циклічних економічних процесів за рахунок використання розроблених у роботі методів оцінювання ритмічних структур на противагу відомого методу оцінювання ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції, що враховує математична модель циклічних економічних процесів у вигляді її циклічної компоненти, як циклічний випадковий процес, а також на противагу відомого методу прогнозування, що ґрунтуються на врахуванні циклічної компоненти у вигляді стохастично-періодичної моделі.

Для прикладу, на рисунках 6.13 наведено результати побудови прогнозу з урахуванням двох методів із застосуванням різних ритмічних структур.

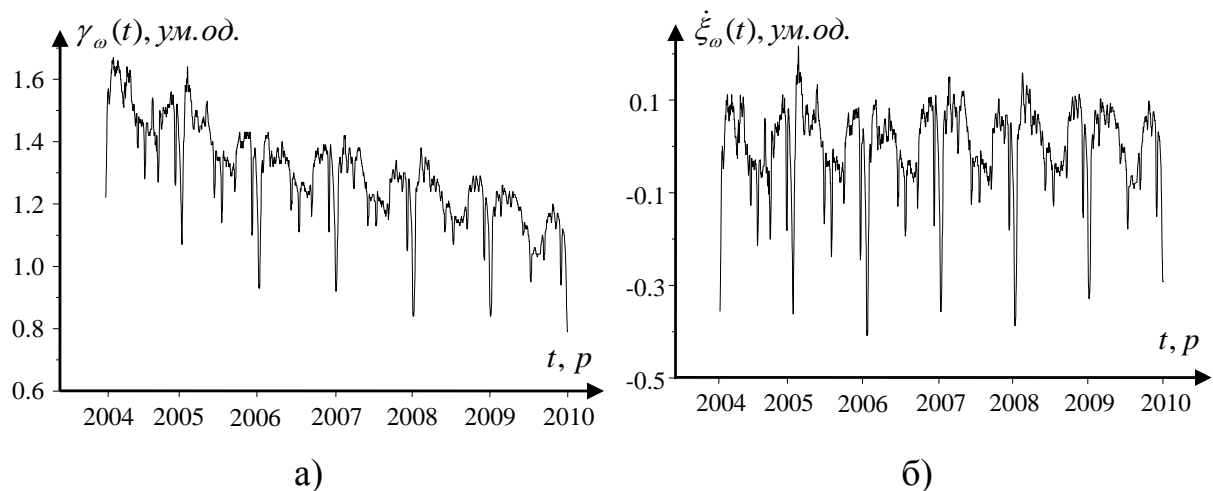


Рис. 6.13. Реалізація циклічного економічного процесу та циклічної компоненти:
а) реалізація циклічного економічного процесу індексу показників маркетингу та реклами США; б) реалізація циклічної компоненти економічного процесу

При використанні першого методу, коли враховується ритмічна структура циклічної компоненти, модель якої наведена у вигляді циклічного випадкового процесу, у такому випадку тривалість прогнозованого економічного циклу може бути визначена як середнє арифметичне значення тривалостей попередніх економічних циклів досліджуваної реалізації циклічних економічних процесів,

$T_{aver} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C T_i$. Тоді область визначення прогнозованого циклу буде

$W_{aver} = [t_i, t_i + T_{aver}]$, $i = \overline{1, C}$, або прийнятою рівно 365 днів, як це у випадку другого методу, коли циклічна компонента наведена у вигляді стохастично-періодичного випадкового процесу (величина періоду $T = 365$ днів).

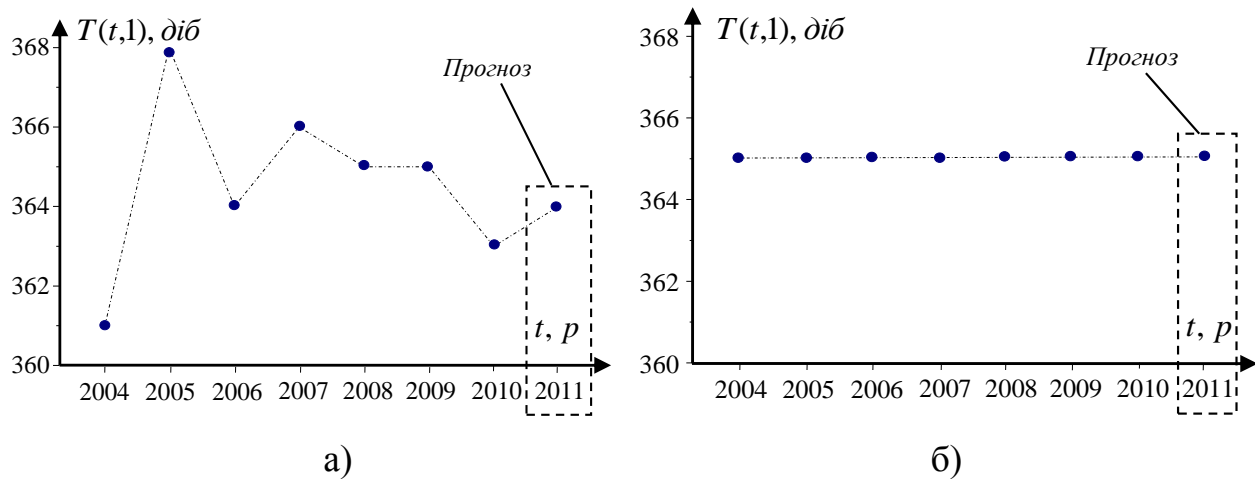


Рис. 6.14. Ритмічні структури для двох методів: а) ритмічна структура циклічної компоненти у вигляді циклічного випадкового процесу; б) ритмічна структура циклічної компоненти у вигляді стохастично-періодичного випадкового процесу (з урахуванням заданого періоду $T = 365$ днів), пунктиром зображено неперервну функцію ритму – кусково-лінійну

Для прогнозування значення економічного циклу використовуємо формули (6.18) для першого методу та (6.19) відповідно для другого:

$$\hat{\gamma}_{\omega}(t) = \hat{m}_{\xi}(t) + f_r(t), \quad (6.18)$$

$$\hat{\gamma}_{\omega}(t) = \hat{m}_{\xi}(t) + f_r(t). \quad (6.19)$$

Для прикладу, на рисунку 6.17 наведено результати прогнозування циклічного економічного процесу, враховуючи два методи.

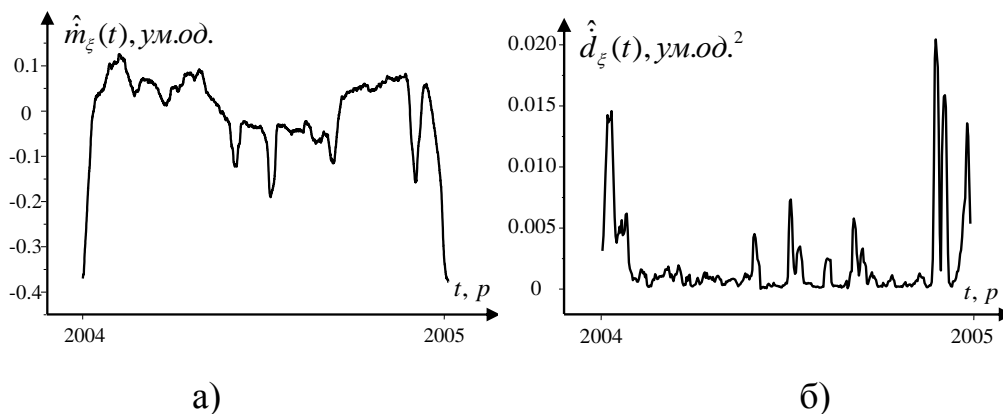


Рис. 6.15. Реалізації статистичних оцінок циклічного економічного процесу індексу показників маркетингу та реклами США: а) реалізації оцінки математичного сподівання з урахуванням ритмічної структури; б) реалізації оцінки дисперсії з урахуванням ритмічної структури

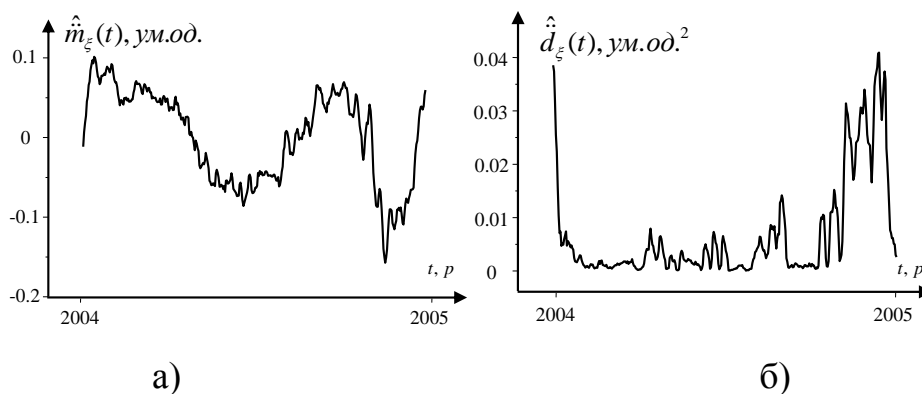


Рис. 6.16. Реалізації статистичних оцінок циклічного економічного процесу індексу показників маркетингу та реклами США: а) реалізації оцінки математичного сподівання з урахуванням періоду; б) реалізації оцінки дисперсії з урахуванням періоду

Для порівняння результатів прогнозів, отриманих на основі двох методів, визначалась абсолютна Δz_1 та відносна δz_1 похибки прогнозування на циклі з урахуванням оцінених різних ритмічних структур (перший метод) та абсолютна Δz_2 й відносна δz_2 похибки прогнозування на періоді з урахуванням значення періоду $T = 365$ (другий метод). Похибки визначалися за формулами, наведеними у роботі [90], результати їх визначення зведені в таблиці 6.4:

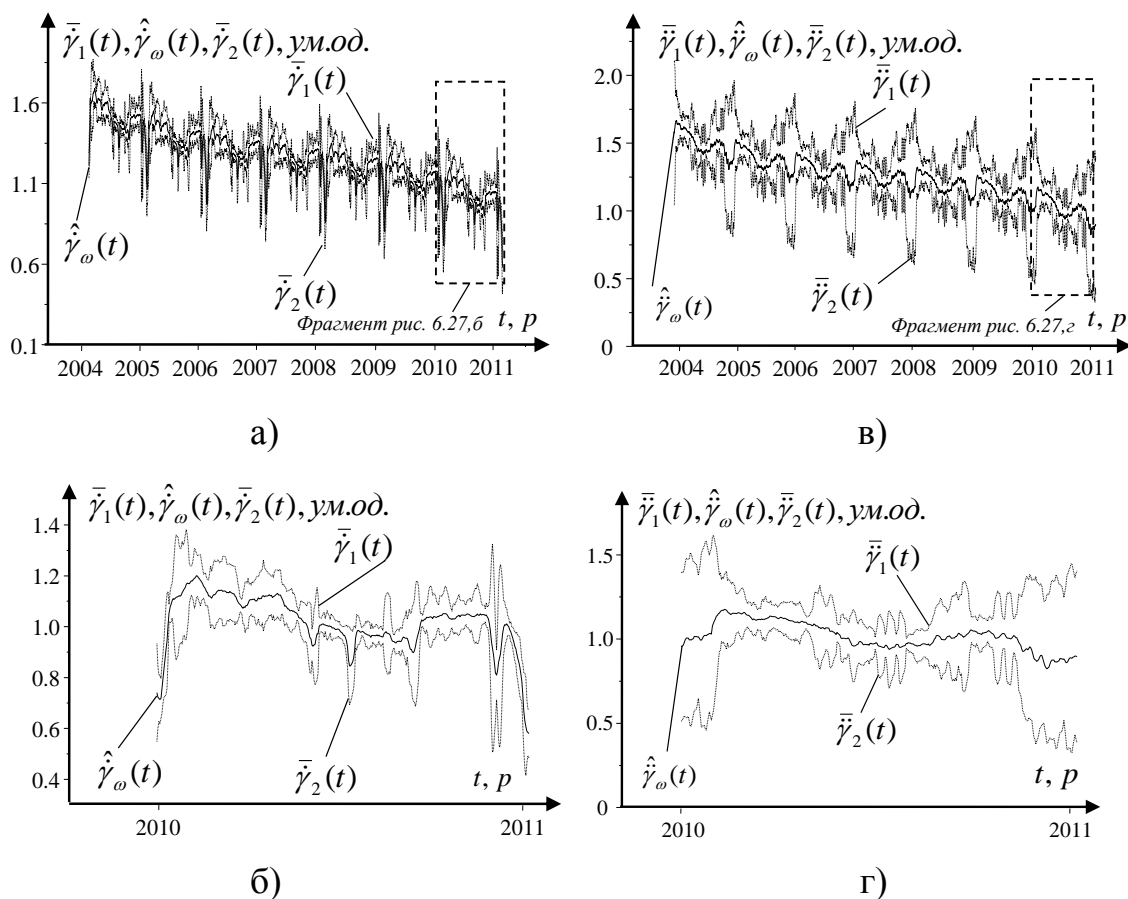


Рис. 6.17. Реалізації циклічного економічного процесу та інтервалів довіри індексу показників маркетингу та реклами США: а) для кожного циклу, враховуючи оцінену ритмічну структуру; б) для прогнозованого циклу на 2011 р., враховуючи ритмічну структуру; в) для кожного періоду, враховуючи другий метод; г) для прогнозованого періоду на 2011 р., враховуючи другий метод

$$\Delta z_1 = \frac{1}{T_{aver}} \sum_{k=1}^{T_{aver}} (\bar{\gamma}_1(t_k) - \bar{\gamma}_2(t_k)) / 2, \quad t_k \in \mathbf{W}_{aver}, \quad (6.20)$$

$$\Delta z_2 = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T (\bar{\gamma}_1(t_k) - \bar{\gamma}_2(t_k)) / 2, \quad t_k \in [0, T], \quad (6.21)$$

$$\delta z_1 = \frac{\Delta z_1}{\frac{1}{T_{aver}} \sum_{k=1}^N \hat{\gamma}_\omega(t_k)}, \quad (6.22)$$

$$\delta z_2 = \frac{\Delta z_2}{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \hat{y}_\omega(t_k)}. \quad (6.23)$$

Таблиця 6.4

Середні абсолютні та відносні похибки прогнозування циклічного економічного процесу на основі двох підходів з урахуванням різних ритмічних структур та з урахуванням періоду

Методи прогнозування на основі врахування різних ритмічних структур			Метод прогнозування на основі врахування значення періоду	
Тип ритмічної структури	Абсолютна похибка, ум.од.	Відносна похибка	Абсолютна похибка, ум.од.	Відносна похибка
1	2	3	4	5
Кусково-лінійна інтерполяція, $q = 1$ (відомий метод)	9,44	0,035	51,09	0,19
Змішана інтерполяція: квадратичним сплайном та кусково-лінійна, $q = 3$	11,32	0,043		
Змішана інтерполяція: кубічним сплайном та кусково-лінійна, $q = 4$	16,78	0,065		
Адаптивна ідентифікація ритмічної структури, $q = 5$	4,82	0,018		

З отриманих результатів визначених похибок випливає, що для випадку прогнозу з урахуванням циклічної компоненти у вигляді математичної моделі циклічного випадкового процесу відносна похибка менша 2%, ніж при використанні прогнозу з урахуванням циклічної компоненти у вигляді математичної моделі стохастично-періодичного випадкового процесу. При аналізі похибок з урахуванням різних ритмічних структур встановлено, що похибка прогнозу менше у випадку оцінювання ритмічної структури новим методом адаптивної її ідентифікації на відміну від відомого методу оцінювання ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції. Таким чином, урахування в методах прогнозу циклічної компоненти з урахуванням ритмічної структури,

оціненої методом її адаптивної ідентифікації, в цілому підвищує точність прогнозування циклічних економічних процесів. Проведення додаткових досліджень з урахуванням, як впливають інші ритмічні структури, оцінені іншими методами, які не були розглянуті в даній дисертаційній роботі, наприклад на основі поліномів Акіми [347], а також дослідження похибок прогнозу, визначених іншими методами, залишимо для подальших досліджень.

6.2. Комплекс комп'ютерних програм для опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів

Заключним етапом даної дисертаційної роботи є створення комплексу комп'ютерних програм для опрацювання: сегментації (ідентифікації сегментної структури), оцінювання ритмічної структури, статистичного опрацювання, визначення та дослідження діагностичних чи прогностичних ознак, а також проведення комп'ютерного моделювання широкого класу циклічних сигналів, моделями яких є циклічні функції [168, 176, 213, 214]. Методологія сегментації, створені методи на її основі та методи оцінювання ритмічних структур, що розроблені в даній дисертаційній роботі, мають практичну цінність і логічне втілення, впровадження в практику у вигляді ПЗ систем цифрової обробки циклічних сигналів. Основною складовою таких автоматизованих систем цифрової обробки даних (інформаційних систем) є спеціалізоване програмне забезпечення, яке власне і задає функціональні можливості такої діагностичної чи прогностичної системи.

На базі розробленої системи методів сегментації та методів оцінювання ритмічних структур циклічних сигналів створено комплекс комп'ютерних програм для опрацювання, аналізу та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів. Він може використовуватися як складова спеціалізованого програмного забезпечення в системах автоматизованої комп'ютерної діагностики чи прогнозу циклічних сигналів у різних галузях науки та медицини при: діагностиці стану серцево-судинної системи людини, діагностиці стану поверхні металів чи

дослідженні та прогнозі циклічних економічних процесів, а також інших циклічних сигналів.

В описаних вище розділах наведені структурні схеми алгоритмічного забезпечення для всіх розроблених у даній роботі методів. На кожному етапі опрацювання й аналізу циклічних сигналів, за рахунок застосування розроблених методів, отримується різна інформація, яка подається на відповідні алгоритмічні блоки, складові комплексу комп'ютерних програм. Взаємодію окремих блоків розробленого алгоритмічного забезпечення наведено у вигляді узагальненої структурної схеми складових комплексу комп'ютерних програм (розробленого програмного забезпечення), наведено на рисунку 6.18.

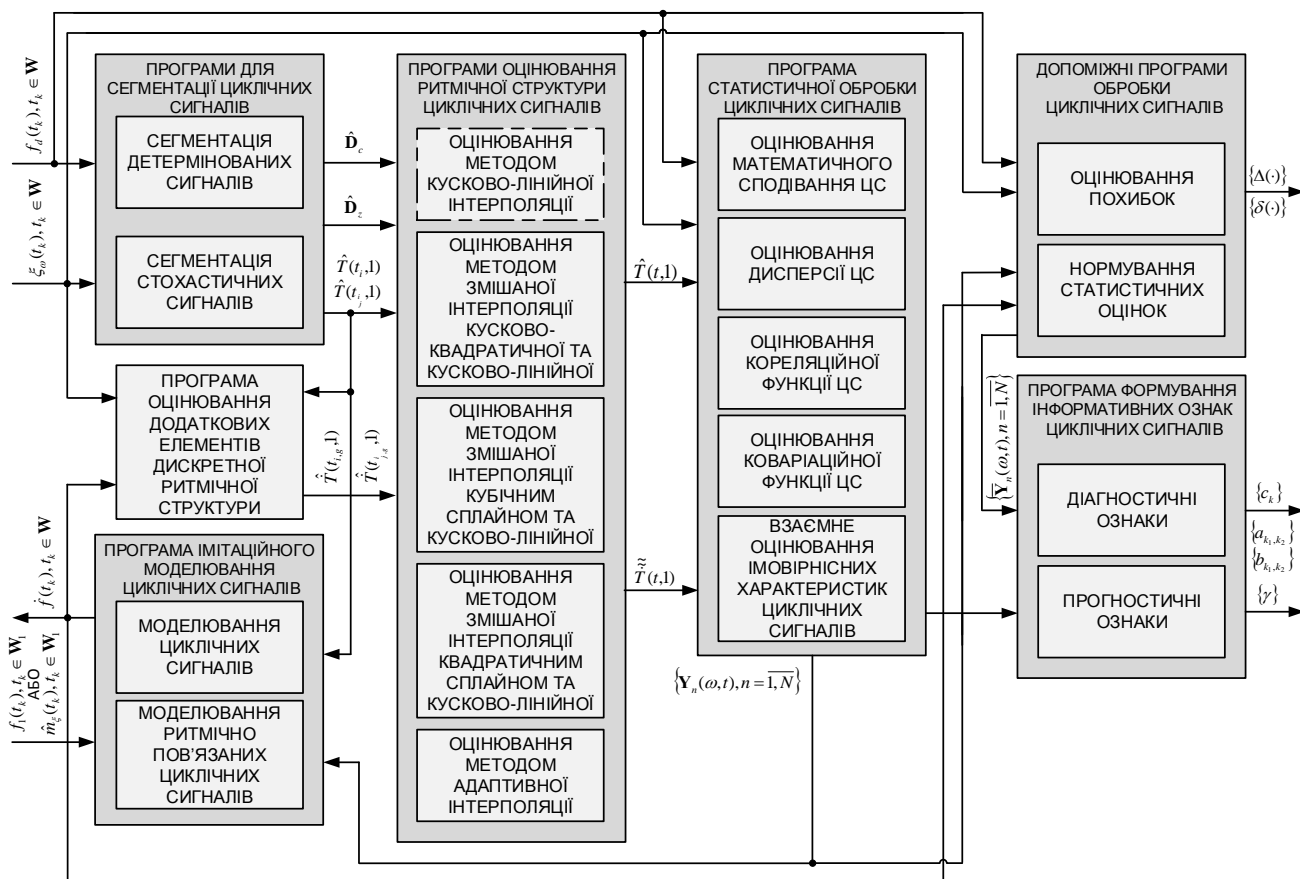


Рис. 6.18. Узагальнена структурна схема комплексу комп'ютерних програм для опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів

На даному рисунку позначено $\{Y_n(\omega, t), n = \overline{1, N}\}$ – множина векторів

статистичних оцінок імовірнісних характеристик; $\{\bar{Y}_n(\omega, t), n = \overline{1, N}\}$ – множина векторів нормованих статистичних оцінок імовірнісних характеристик; $\{\Delta(\cdot)\}, \{\delta(\cdot)\}$ – множини середньоквадратичних абсолютних та відносних похибок; $\{c_k\}, \{a_{k_1, k_2}\}, \{b_{k_1, k_2}\}$ – множини діагностичних ознак у вигляді коефіцієнтів розкладу; $\{\gamma\}$ – множина прогностичних ознак, штрих-пунктиром зображено блок програми, яка реалізує відомий метод оцінювання ритмічної структури [196].

Необхідно зазначити, що на даному рисунку (див. рис. 6.28) зображені не всі програми, які входять до створеного комплексу комп'ютерних програм, а лише основні. Наприклад, тут не наведені програми, які проводять попереднє опрацювання (підготовку даних до опрацювання): фільтрацію сигналу та вилучення тренду. Таке опрацювання можна провести відомими методами [75, 178, 287], а оскільки вони не були предметом розгляду даної дисертаційної роботи, то тут ці програми не наведені, хоча вони і входять до розробленого комплексу комп'ютерних програм. Також не представлені в структурній схемі додаткові, допоміжні програми, які проводять, наприклад, прорідження даних та реалізують інші допоміжні функції опрацювання циклічних сигналів.

Комплекс комп'ютерних програм реалізує наступні функції:

1. Фільтрацію, вилучення тренду (етап попереднього опрацювання циклічних сигналів).

2. Сегментацію циклічного сигналу відомими методами та розробленими (детермінований та стохастичний підходи):

- Метод, заснований на визначенні різницевої функції першого порядку (відомий метод);

- Метод, заснований на визначенні різницевої функції другого порядку (відомий метод);

- Метод визначення зонної часової структури електрокардіосигналу (відомий метод) лише для ЕКС;

- Новий метод сегментації детермінованих циклічних сигналів, моделлю якого є детермінована циклічна числова функція (ідентифікація отриманої

сегментної структури);

- Новий метод сегментації стохастичних циклічних сигналів, моделями яких є циклічні випадкові процеси, циклічний кусково-стаціонарний випадковий процес, випадковий процес із незалежними циклічними приростами, циклічний білий шум, циклічний марківський процес, циклічна інтервальна функція (ідентифікація отриманої сегментної структури).

3. Проведення аналізу ритму з урахуванням ідентифікованої сегментної структури та ідентифікація ритмічної структури (дискретної функції ритму) циклічних сигналів.

4. Оцінювання ритмічної структури (неперервної функції ритму) циклічного сигналу відомим та розробленими методами:

- Оцінювання функції ритму кусково-лінійною інтерполяцією (відомий метод);

- Оцінювання ритмічної структури за новим методом на основі змішаної інтерполяції квадратичної та кусково-лінійної;

- Оцінювання ритмічної структури за новим методом на основі змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійною функцією;

- Оцінювання ритмічної структури за новим методом на основі змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійною функцією;

- Оцінювання ритмічної структури за новим методом шляхом визначення її додаткових елементів (відліків);

- Оцінювання ритмічної структури за новим методом шляхом її адаптивної ідентифікації.

5. Статистичний аналіз циклічних сигналів (відомі методи) з урахуванням ритмічної структури (змінний ритм) та значення періоду (постійний ритм):

- Визначення статистичних оцінок (математичного сподівання, дисперсії, кореляційної та коваріаційної функцій) з урахуванням значення періоду;

- Визначення статистичних оцінок (математичного сподівання, дисперсії, кореляційної та коваріаційної функцій) з урахуванням ідентифікованих ритмічних структур;

- Визначення сумісних статистичних оцінок циклічних сигналів кореляційної та коваріаційної функцій з урахуванням ідентифікованих ритмічних структур у межах першого циклу та поза його межами;

- Метод перевірки статистичної гіпотези про приналежність досліджуваного сигналу до класу циклічних.

6. Оцінювання значень середньоквадратичних похибок (абсолютної та відносної).

7. Формування інформативних ознак циклічних сигналів:

- Нормування статистичних оцінок імовірнісних характеристик (одновимірних та двовимірних);

- Визначення коефіцієнтів ортогональних розкладів одновимірних нормованих статистичних оцінок імовірнісних характеристик (математичного сподівання та дисперсії) в дискретних базисах Чебишева, Кравчука, Лагера та в базисі тригонометричних функцій, як діагностичні ознаки;

- Визначення коефіцієнтів ортогональних розкладів двовимірних статистичних оцінок імовірнісних характеристик (кореляційна та коваріаційна функції) в базисі тригонометричних функцій, як діагностичні ознаки;

- Прогнозування циклічних економічних процесів із урахуванням постійного та змінного ритму (відомий метод).

8. Проведення комп'ютерного моделювання циклічних сигналів широкого класу для задач тестування розроблених методів (відомий метод). Даний метод дозволяє враховувати інформацію морфологічного та ритмічного характеру, яка отримується на основі розроблених у роботі методів.

Комплекс комп'ютерних програм написаний мовою програмування "Delphi 7.0" і має модульну структуру, що дозволяє легко модифікувати його залежно від потреб. Фрагменти лістингу розробленого комплексу програми наведено у додатках Р–У.

На рисунках 6.19–6.25 зображено приклади інтерфейсів розроблених комп'ютерних програм, які входять до комплексу опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів.

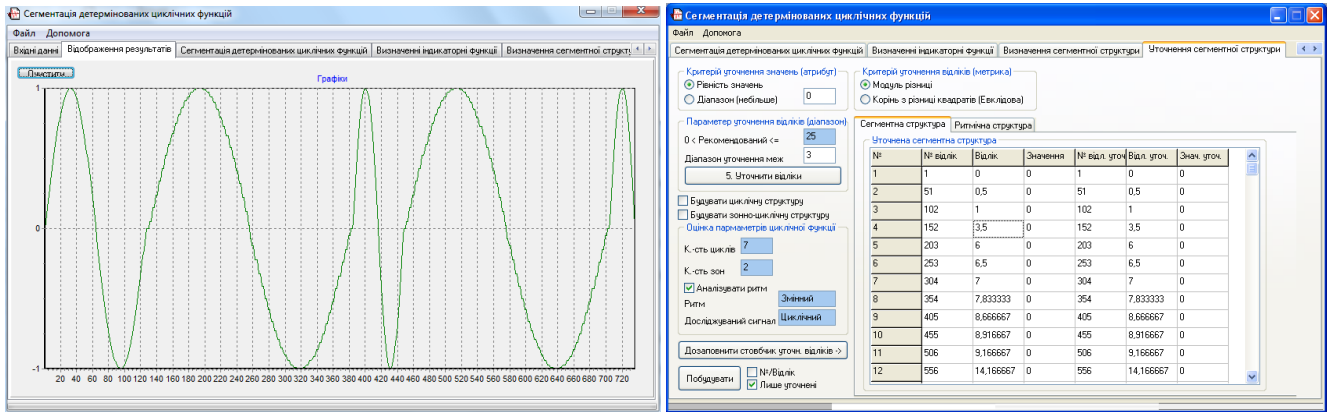


Рис. 6.19. Інтерфейс комп'ютерної програми для сегментації детермінованих циклічних сигналів

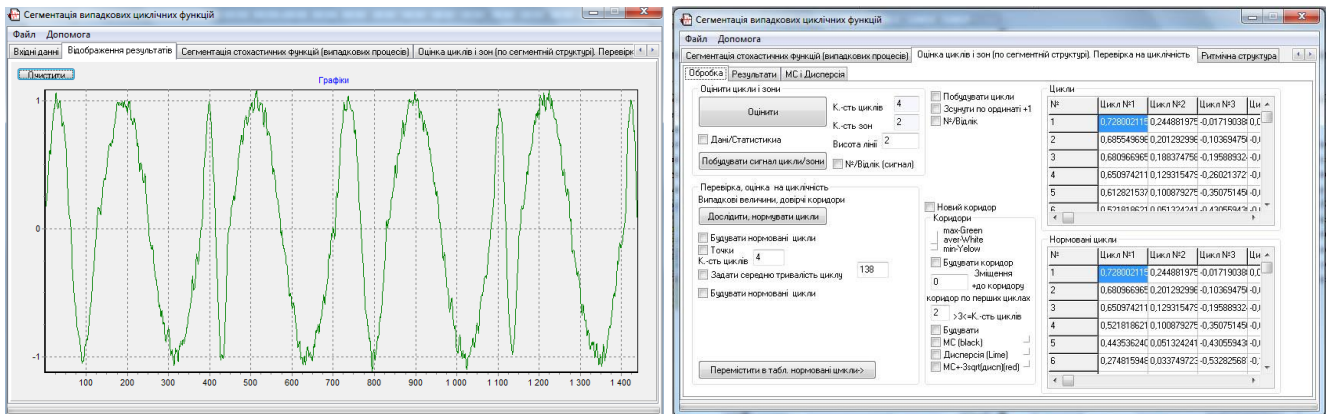


Рис. 6.20. Інтерфейс комп'ютерної програми для сегментації випадкових циклічних сигналів

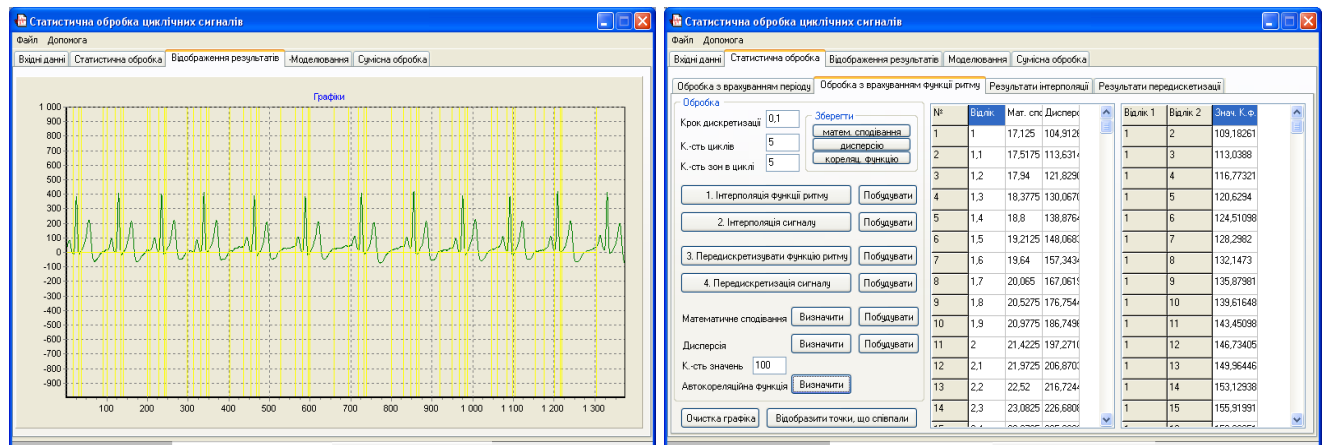


Рис. 6.21. Інтерфейс комп'ютерної програми для статистичного опрацювання кардіосигналів різної фізичної природи з урахуванням змінного ритму

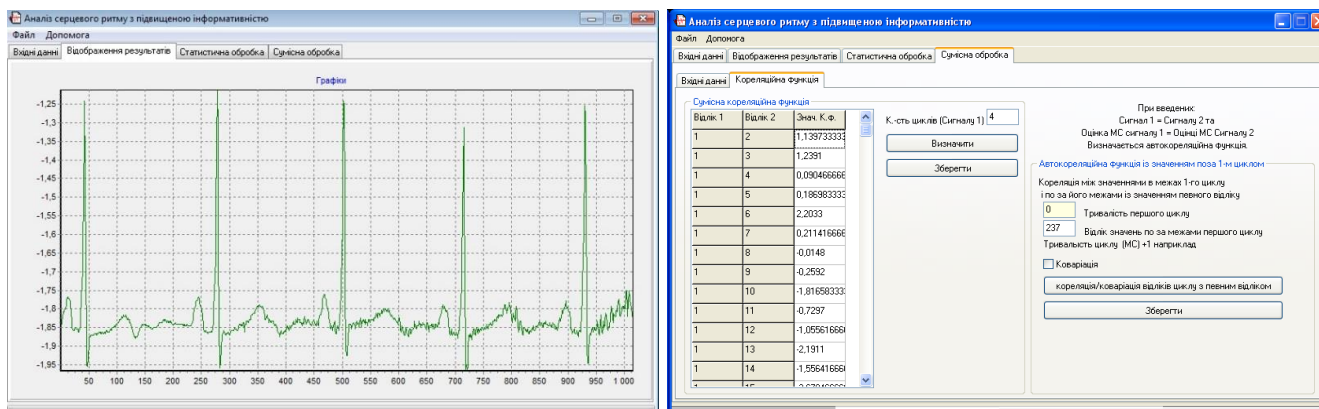


Рис. 6.22. Інтерфейс комп'ютерної програми для сумісного статистичного аналізу циклічних сигналів із урахуванням змінного ритму

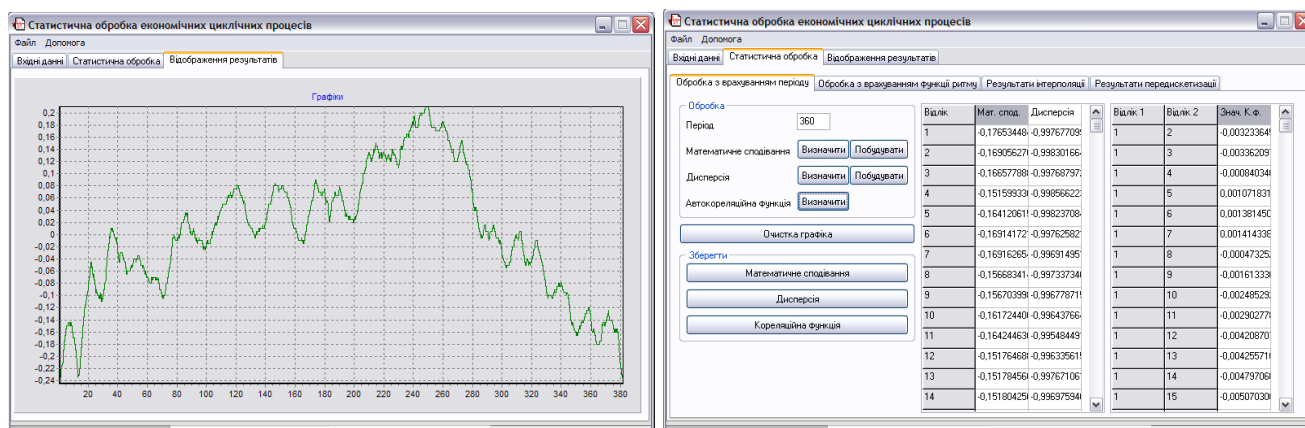


Рис. 6.23. Інтерфейс комп'ютерної програми для статистичного аналізу циклічних сигналів із урахуванням постійного ритму

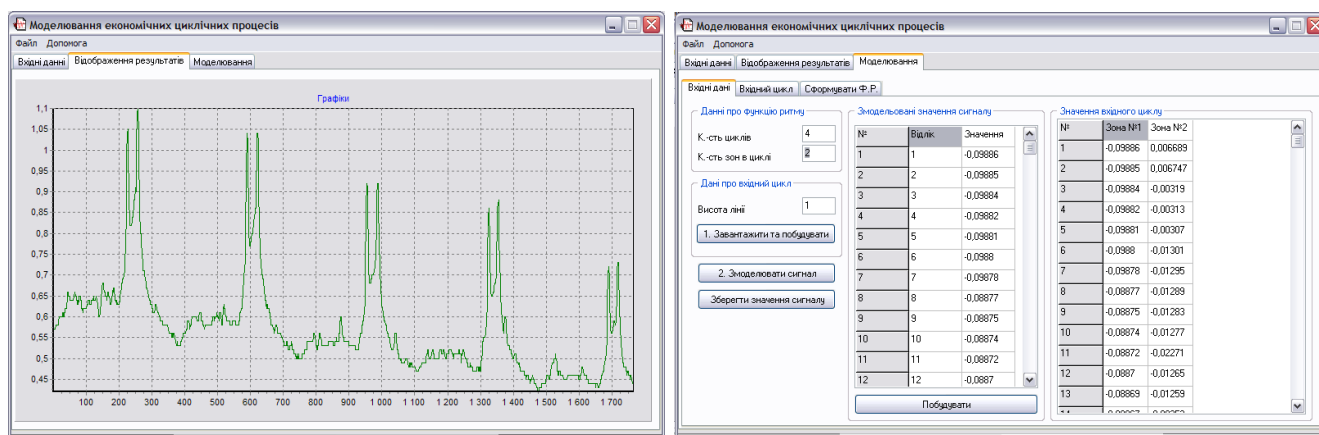


Рис. 6.24. Інтерфейс комп'ютерної програми для комп'ютерного моделювання циклічних сигналів, як приклад – моделювання циклічних економічних процесів

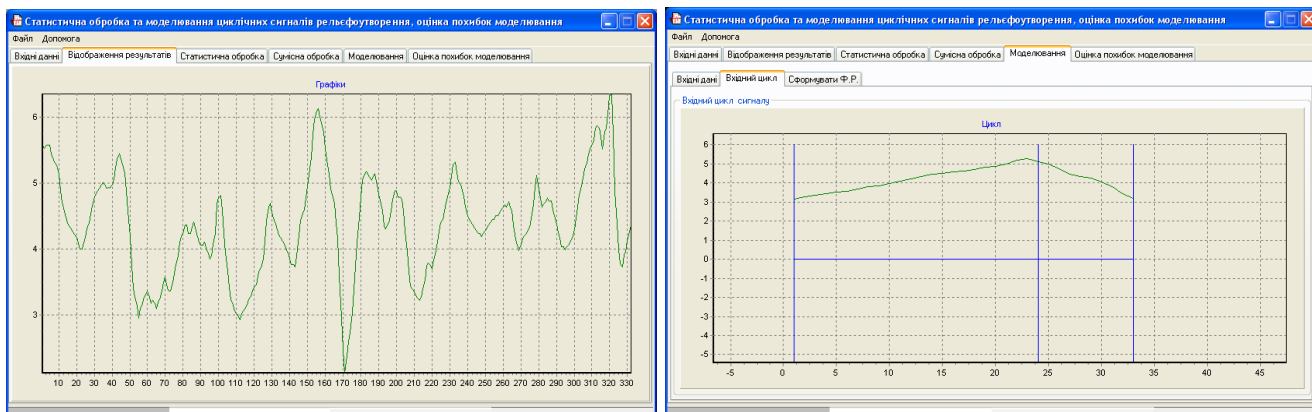


Рис. 6.25. Інтерфейс комп'ютерної програми для статистичного аналізу та комп'ютерного моделювання циклічного процесу поверхні рельєфних утворень

На розроблений комплекс комп'ютерних програм отримано сім свідоцтв про реєстрацію авторського права на комп'ютерні програми, копії яких подано в додатку Х.

Розроблений програмний комплекс для опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів був впроваджений в цілому або у вигляді окремих його складових програм для проведення сегментації (ідентифікації сегментних структур), оцінювання ритмічної структури, статистичного опрацювання, формування інформативних ознак та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів серця у діагностичних комплексах серії «CARDIO» спільного українсько-німецького ТОВ «МІДА» (м. Київ), медичному центру ТОВ «МЕВІЗ» (м. Тернопіль). Також результати впроваджені у вигляді комплексу комп'ютерних програм на кафедрах медичної інформатики та медичної фізики діагностичного та лікувального обладнання при вивченні дисциплін: «Медична інформатика», «Медична фізика діагностичного та лікувального обладнання», «Медична та біологічна фізика», «Фізичні основи електрографії. Електрокардіографія», «Функціонування електромагнітного обладнання», Тернопільського державного медичного університету імені І.Я. Горбачевського. Окремі комп'ютерні програми для аналізу та моделювання циклічних сигналів впроваджено у навчальний процес під час вивчення дисциплін «Обробка сигналів та зображень», «Моделювання систем» на кафедрі комп'ютерних наук; «Автоматизовані системи

технічного зору» на кафедрі автоматизації технологічних процесів і виробництв; «Корпоративне управління» на кафедрі менеджменту у виробничій сфері Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Копії отриманих актів впроваджень подано у додатку Ц.

Таким чином, ефективність розроблених у роботі методів опрацювання циклічних сигналів підтверджена впровадженнями на практиці.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалися електронні бази даних кардіосигналів медичного центру ТОВ «МЕВІЗ», окремі дані використовувалися з відкритої електронної бази даних електрокардіосигналів Physionet (<http://www.physionet.org/>), окремі експериментальні дані для дослідження процесів рельєфних утворень отримані на базі лабораторії кафедри будівельної механіки Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя, окремі експериментальні дані для дослідження циклічних економічних процесів взяті з відкритих інтернет ресурсів, зокрема (<https://trends.google.com/trends>).

6.3. Висновки до шостого розділу

1. Обґрунтовано діагностичні ознаки для задачі кардіодіагностики у вигляді перших двох коефіцієнтів розкладу одновимірних статистичних оцінок математичного сподівання у ряд Чебишева. На основі критерію мінімуму кількості діагностичних ознак при однаковій інформаційній цінності (використовуючи енергетичний критерій), серед множини ортогональних розкладів: ряд тригонометричних функцій; ряди поліномів дискретного аргументу Лагера, Кравчука та Чебишева; статистичних оцінок імовірнісних характеристик, вибрано перші два коефіцієнти ортогональних поліномів Чебишева. Оскільки мінімальна кількість членів ряду, які вносять вклад в енергію статистичної оцінки імовірнісної характеристики математичного сподівання, становить не менше 95%. Встановлено, що запропоновані статистичні оцінки є чутливими до зміни стану серцево-судинної системи людини і не чутливі до дії завад, що вказує на

інформативність таких діагностичних ознак у задачах кардіодіагностики в системах цифрової обробки електрокардіосигналів.

2. Запропоновано новий клас діагностичних ознак у вигляді коефіцієнтів розкладу реалізацій одновимірних статистичних оцінок математичного сподівання та дисперсії для діагностики стану поверхні металу за зареєстрованими процесами рельєфних утворень на поверхні металів, що виникають під механічним чи лазерним ударно-хвильовим впливами на них. На основі критерію мінімуму кількості діагностичних ознак при однаковій інформаційній цінності (використовуючи енергетичний критерій), серед множини ортогональних розкладів (ряд тригонометричних функцій, ряди поліномів дискретного аргументу Лагера, Кравчука та Чебишева) оцінок імовірнісних характеристик, вибрано коефіцієнти ряду тригонометричних функцій. Оскільки мінімальна кількість членів ряду, які вносять вклад в енергію оцінки становить не менше 95%, вносять її перші 2 коефіцієнти ряду тригонометричних функцій, побудова діагностичних просторів та навчаючих сукупностей для діагностики стану поверхні металів буде проведено в подальших наукових дослідженнях.

3. Виявлено факт зменшення відносної похибки прогнозування циклічних економічних процесів на основі відомої математичної моделі у вигляді адитивної суміші циклічної компоненти як циклічного випадкового процесу та трендової функції. За рахунок урахування інформації в методах прогнозування отриманої на основі нового методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури в порівнянні з відомим методом оцінювання ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції та в порівнянні з відомим методом прогнозування на основі циклічної компоненти, як моделі стохастично-періодичного процесу.

4. Створено комплекс комп'ютерних програм для опрацювання циклічних сигналів та проведення комп'ютерних моделюючих експериментів, який може використовуватись у цілому чи у вигляді окремих програм, у складі спеціалізованого програмного забезпечення для проведення автоматизованого цифрового опрацювання циклічних сигналів в електрокардіодіагностичних системах, системах діагностики стану поверхні металів і системах аналізу й

прогнозу циклічних економічних процесів. Даний комплекс комп'ютерних програм або його складові впроваджені у діагностичних комплексах серії «CARDIO» спільного українсько-німецького ТОВ «МІДА» (м. Київ), медичному центрі ТОВ «МЕВІЗ» (м. Тернопіль), а також у навчальний процес в Тернопільській державній медичній академії імені І.Я. Горбачевського та Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему, що полягає у *розвитку теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів у напрямку створення нових методів ідентифікації їх сегментних та ритмічних структур, що підвищують точність їх опрацювання та комп'ютерного моделювання в автоматизованих системах цифрової обробки даних.*

Отримано такі наукові та прикладні результати:

1. Розроблено методологію сегментації циклічних сигналів (ідентифікація сегментних структур) у рамках стохастичного та детермінованого підходів щодо їх математичних моделей на основі теорії циклічних функцій. Це дозволило з позиції єдиного теоретико-методологічного підходу будувати ефективні методи сегментації (ідентифікації сегментних структур) циклічних сигналів, моделями яких є: у рамках стохастичного підходу – циклічні випадкові процеси, циклічний кусково-стаціонарний випадковий процес, випадковий процес із незалежними циклічними приростами, циклічний білий шум, циклічний марківський процес, циклічна інтервальна функція, а також у рамках детермінованого підходу – детермінована циклічна числова функція.

2. На основі побудованої методології розроблено систему нових узгоджених методів сегментації циклічних сигналів у рамках детермінованого й стохастичного підходів завдяки врахуванню в методах однофазних значень, що відповідають відлікам сегментів-циклів чи сегментів-зон. Це дозволило проводити сегментування циклічних сигналів та ідентифікацію їх сегментних структур (сегментної циклічної чи сегментної зонної структури) й підвищити точність сегментації циклічних сигналів розробленими методами у порівнянні з відомими (на основі різницевих функцій першого та другого порядків) на 7%.

3. Удосконалено метод ідентифікації ритмічної структури циклічних сигналів, який дозволяє враховувати нелінійні закономірності їх ритму завдяки розробленим методам його змішаної інтерполяції квадратичним чи кубічними

сплайнами на відповідних сегментах-циклах чи сегментах-зонах ідентифікованої сегментної структури. Удосконалений метод уможливило підвищення точності відомих методів дискретизації, статистичного опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів у порівнянні із застосуванням відомого методу ідентифікації ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції.

4. Розроблено новий метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічних сигналів, до складу якого ввійшли метод оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів (відліків) та метод підбору оптимального типу інтерполяційного полінома на сегменті. Врахування більшої кількості елементів ритмічної структури дозволило вибрати вид оптимального поліному серед лінійного, квадратичного й кубічного та вибрати метод оцінювання ритмічної структури на відповідному сегменті серед відомого (на основі кусково-лінійної інтерполяції) та розроблених у роботі (на основі квадратичного чи кубічного сплайнів), що дало змогу адаптивно її оцінювати та підвищити точність ідентифікації ритмічної структури циклічних сигналів на 3%.

5. На основі врахування розроблених у роботі методів сегментації та оцінювання ритмічних структур створено метод верифікації моделі досліджуваного сигналу, в основу якого покладено перевірку гіпотези про належність досліджуваного сигналу до класу циклічних. Це дозволило адекватно та коректно застосовувати розроблені у дисертаційній роботі методи до опрацювання циклічних сигналів.

6. Обґрунтовано математичну модель і статистичні методи опрацювання процесу рельєфних утворень у вигляді циклічного випадкового процесу, що дозволило використовувати нові діагностичні ознаки у вигляді коефіцієнтів розкладу нормованих статистичних оцінок у задачах технічного діагностування стану поверхні металів та в цілому розширити апарат опрацювання й комп'ютерного моделювання процесів рельєфних утворень на основі стохастичного підходу.

7. Створено комплекс комп'ютерних програм для опрацювання зареєстрованих циклічних кардіосигналів (електричної, магнітної, акустичної та

іншої природи), циклічних процесів поверхні рельєфних утворень та циклічних економічних процесів. Створені програми дозволяють проводити сегментацію (ідентифікацію сегментних структур), оцінювати ритмічні структури, проводити статистичне опрацювання та комп'ютерне моделювання і можуть бути використані як складові спеціалізованого програмного забезпечення автоматизованих систем цифрової обробки даних у відповідних діагностичних чи прогностичних системах.

8. За допомогою створеного комплексу комп'ютерних програм проведено серію експериментів з опрацювання реальних та змодельованих циклічних сигналів: кардіосигналів у нормі та з різними видами патологій, реалізацій процесів поверхні рельєфних утворень, реалізацій циклічних економічних процесів. Отримано результати порівняльного аналізу похибок сегментації, оцінювання ритмічних структур та комп'ютерного моделювання з використанням нових методів. Вони підтвердили збільшення точності методів опрацювання, зокрема сегментації в порівнянні з відомими методами, а урахування методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури дозволило підвищити точність опрацювання методів дискретизації, статистичного опрацювання та комп'ютерного моделювання в порівнянні з відомим методом оцінювання ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції, що підтверджують апробації у вигляді актів впроваджень та свідоцтва реєстрації авторського права на комп'ютерні програми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абакумов В.Г., Геранін В.О., Рибін О.І., Сватош Й., Синєкоп Ю.С. Біомедичні сигнали та їх обробка. К.: ТОО "ВЕК+", 1997. 349 с.
2. Автоматизация диагностики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний: под ред. Э. Ш. Халфена. Саратов, 1980. 122 с.
3. Азаров Ю.К., Баум О.В., Дубровин Э.Д. Прибор для автоматической диагностики кислородного голодания сердечной мышцы человека. Радиоэлектронные приборы для биологических и медицинских исследований. М.: Наука, 1966. С. 8-17.
4. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 450 с.
5. Актершев С.П. Задачи на максимум и минимум. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 192 с.
6. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. М.: Мир, 1987. 105 с.
7. Амиров Р.З. Электрокардиотопография. М.: Медицина, 1965. 143 с.
8. Асеева Л.Г., Баринаова Н.Е., Кечкер М.И., Пинскер И.Ш., Трунов В.Г. Автоматическая диагностика инфаркта миокарда по ЭКГ. *Математическая обработка медико-биологической информации*. М.: Наука, 1976. С. 39-41.
9. Ахмед Н., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов : Пер. с англ. М. : Связь, 1980. 248 с.
10. Ахутин В.М., Богдановский Э.М., Шкапин Б.Ф. Сравнение методов статистического анализа электрокардиосигналов. *Биофизика*. 1968. Т. 13, № 4. С. 706-711.
11. Бабравичюс В.В., Пинскер И.Ш., Трунов В.Г., Цукерман Б.М., Шакин В.В. Автоматическая диагностика гипертрофии миокарда по сильно зашумленным ЭКГ. *Математическая обработка медико-биологической информации*. М.: Наука, 1976. С. 29-39.
12. Бабский Е.Б., Карпман В.Л. Динамокардиография. М.: Медгиз, 1963.

167 с.

13. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М. : Наука, 1984. 225 с.

14. Баевский Р.М., Иванов Г.Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения. М.: Наука, 1996.

15. Барановский А.Л., Калиниченко А.Н., Манило Л. А. и др. Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ: учеб. пособие для вузов.: под ред. А. Л. Барановского и А.П. Немирко. М.: Радио и связь, 1993. 248 с.

16. Баум О.В., Дубровин Д.Э. Физико-математическая модель генеза электрокардиограмм. *Биофизика*. 1971. Т. 16, № 5. С. 898-903.

17. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. К.: Вища школа, 1983. 512 с.

18. Бархударян И.Г., Дагестанян М. Г. К вопросу построения математических моделей перспективного прогнозирования режимов газопотребления. ВНИИ Эгазпром. 1978. С. 2-9.

19. Баум О.В., Дубровин Д. Э. Исследование вопросов генезиса ЭКГ при помощи модели электрической активности сердца. *Моделирование и автоматический анализ электрокардиограмм*. М.: Наука, 1973. С. 78-97.

20. Белоусов В.Е. Математическая электрокардиография. Минск: Беларусь, 1969. 144 с.

21. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. М. : Мир, 1989. 540 с.

22. Бендерская Е.Н., Колесников Д.Н., Пахомова В.И. Функциональная диагностика систем управления: учебное пособие. СПбГТУ. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. 143 с.

23. Бериков В.С., Лбов Г.С. Современные тенденции в кластерном анализе. Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные

системы», 2008. 26 с.

24. Беркутов А.М., Гуржин С.Г., Дунаев А.А., Прошин Е.М. Повышение эффективности регистрации формы электрокардосигнала корреляционной обработкой в цифровой осцилографии. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2002. № 7. С. 7-13.

25. Билык М.Г. Некоторые свойства периодически нестационарных процессов и периодически неоднородных полей. *Отбор и передача информации*. 1973. Вып. 48. С. 27-33.

26. Билык М.Г. О периодически нестационарных процессах. *Отбор и передача информации*. 1977. Вып. 50. С. 28-34.

27. Бобров В.А., Гапелюк А.В., Козловський В.И., Сутковой П.И., Примин М.А., Минов Ю.Д. Магнитокардиография: *Инструментальные средства и первое клиническое применение*. *Украинский кардиологический журнал*. 1995. №2. С. 5-14.

28. Боднарчук І., Приймак М. Задачі та методи аналізу умовно періодичних випадкових процесів із змінним періодом : *Матеріали дев'ятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя*, м. Тернопіль, 12-13 травня 2005 р. Тернопіль, 2005. С. 55.

29. Бородкин Л.И., Моттль В.В. Алгоритм обнаружения моментов изменения параметров уравнения случайного процесса. *Автоматика и телемеханика*. 1976. №6. С. 23-32.

30. Бочарников В.П. Fuzzy-технология : Математические основы. Практика моделирования в экономике. Санкт-Петербург : Наука РАН, 2001. 328 с.

31. Бродский Б.Е., Дарховский Б.С. О задаче скорейшего обнаружения момента изменения вероятностных характеристик случайной последовательности. *Автоматика и телемеханика*. 1983. №10. С. 125-131.

32. Бродский Б.Е., Дарховский Б.С. Проблемы и методы вероятностной диагностики. *Автоматика и телемеханика*. 1999. №8. С. 3-50.

33. Бродский Б.Е., Дарховский Б.С. Сравнительный анализ некоторых непараметрических методов скорейшего обнаружения момента “разладки”

случайной последовательности. *Теория вероятностей и ее применения*. 1990. Т.35, №4. С. 655-668.

34. Бродский Б.Е., Дарховский Б.С. Асимптотический анализ некоторых оценок в апостериорной задаче о разладке. *Теория вероятностей и ее применения*. 1990. Т.35, №3. С. 551-557.

35. Бродский Б.Е., Дарховский Б.С. Непараметрический метод обнаружения моментов переключения двух случайных последовательностей. *Автоматика и телемеханика*. 1989. №10. С. 66-74.

36. Бродский Б.Е., Дарховский Б.С. Алгоритм апостериорного обнаружения многократных разладок случайной последовательности. *Автоматика и телемеханика*. 1993. №1. С. 62-67.

37. Бродский Б.Е., Дарховский Б.С. Проблемы и методы вероятностной диагностики. *Автоматика и телемеханика*. 1999. №8. С. 3-50.

38. Бродский Б.Е. Асимптотически оптимальные методы в задаче скорейшего обнаружения разладки. I. Характеристики методов скорейшего обнаружения разладки. *Автоматика и телемеханика*. 1995. №9. С. 60-72.

39. Бродский Б.Е. Асимптотически оптимальные методы в задаче скорейшего обнаружения разладки. II. Исследование методов скорейшего обнаружения. *Автоматика и телемеханика*. 1995. №10. С. 50-59.

40. Бродский Б. Непараметрический алгоритм последовательного обнаружения „разладки” случайной последовательности с улучшенными вычислительными свойствами. *Автоматика и телемеханика*. 1984. № 65. С. 32-41.

41. Булыгин В.П., Васанов Т.Б., Лобанов Д.А., Пирвердиев Ч.А., Смирнов В.Ю., Федоров С.И., Харатьян Е.И., Чепайкин А.Г. Вопросы создания интерпретирующего электрокардиографа. Тезисы докладов международного симпозиума "Компьютерная электрокардиография на рубеже столетий XX-XXI". М.: Крук, 1999. С. 288-290.

42. Бывайков М.Е., Ромащев А.А. О робастности в задаче обнаружения изменения параметра сдвига случайного процесса. *Автоматика и телемеханика*.

1989. №7. С. 138-143.

43. Вакман В.Е., Вайнштейн Л. А. Амплитуда, фаза, частота – основные понятия теории колебаний. *Успехи физических наук*. 1977. Т. 123, № 4. С. 657-682.

44. Валтерис А.Д. Сфигмография как метод оценки изменения гемодинамики под влиянием физической загрузки. Рига: Зинатне, 1988. 131 с.

45. Валужис А.К., Лосинксне Л.В. и др. Структурный анализ электрокардосигналов. *Математическая обработка медико-биологической информации*. М.: Наука, 1976. С. 182-192.

46. Валужис А.К., Рашимас А.П. Статистический алгоритм структурного анализа ЭКС. *Кибернетика*. 1979. № 3. С. 91-95.

47. Василик Є., Литвиненко Я. Математична модель циклів сонячної активності. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування* : тези доповідей II всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 9-10 червня 2015 р. Тернопіль, 2015. С. 5-7.

48. Василик Є., Литвиненко Я. Математична модель циклів сонячної активності для задачі їх статистичної обробки. Матеріали XIX наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 18-19 травня 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 4.

49. Васильков Ю.В., Василькова Н.Н. Компьютерные технологии вычислений в математическом моделировании. *Финансы и статистика*. Москва 2002. 249 с.

50. Васин Ю.Г., Громов В.П., Неймарк Ю.И., Кириллюк В.Д. Автоматизированная система кардиологических обследований (АСКО-1). *Проблемы современной электрокардиологии*. Ереван, 1976. С. 32-33.

51. Великий тлумачний словник сучасної української мови. Уклад. і голов. ред. В.Т. Бусел. Ірпінь : ВТФ "Перун", 2001. 1440 с.

52. Виницкий А. С. Модулированные фильтры и следящий прием ЧМ сигналов. М. : Изд-во "Советское радио", 1969. 548 с.

53. Водолазский Л. А. Основы техники клинической электрографии. М.: Медицина. 1966. 270 с.

54. Войчишин К.С., Драган Я.П., Куксенко В.И., Михайловский В.Н. О выявлении периодичностей в структуре естественных стохастических процессов. *Отбор и передача информации*. Киев : Наукова думка. 1971. Вып. 30. С. 3-16.

55. Войчишин К.С., Драган Я.П. О простой стохастической модели естественных ритмических процессов. *Отбор и передача информации*. 1971. Вып. 29. С. 7-15.

56. Войчишин К.С., Драган Я.П. О характеристике изменения ритмики в естественных явлениях. *Отбор и передача информации*. 1973. Вып. 36. С. 6-9.

57. Войчишин К.С., Драган Я.П. Об исключении ритмики из периодически коррелированных случайных процессов. *Отбор и передача информации*. 1972. Вып. 33. С. 12-23.

58. Войчишин К.С., Драган Я.П. Пример образования периодически коррелированных случайных процессов. *Радиотехника и электроника*. 1973. Вып. 18, № 9. С. 1957-1960.

59. Воробейчиков С.Э. Об обнаружении изменения среднего в последовательности случайных величин. *Автоматика и телемеханика*. 1998. №3. С. 50-56.

60. Воробьёв С.А. Моделирование и структурный анализ сигналов с повторяющимися признаками формы в медико-биологическом эксперименте: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.13.09. Тула, 2000. 32 с.

61. Воробьёв С.А. Оптимальные алгоритмы выделения непрерывных линий на полутоновых изображениях. *Автоматические системы оптимального управления технологическими процессами*. ТПИ. Тула, 1982. С. 83-90.

62. Воробьёв С.А. Методы структурного анализа экспериментальных кривых с участками повторяющейся формы. *Автоматизация и современные технологии*. 1997. № 7. С. 22-25.

63. Воробьёв С.А. Методы структурного анализа экспериментальных кривых с участками повторяющейся формы при неизвестных параметрах модели. *Автоматизация и современные технологии*. 1997. № 9. С. 26-29.

64. Воробьёв С.А. Структурный анализ экспериментальных кривых при

параллельном оценивании неизвестных параметров модели. *Автоматизация и современные технологии*. 1997. № 11. С. 13-16.

65. Воробьёв С.А. Оптимальные алгоритмы выделения непрерывных линий на полутоновых изображениях. *Автоматические системы оптимального управления технологическими процессами*. ТПИ. Тула. 1982. С. 83-90.

66. Воробьёв С.А. Алгоритмы выделения и классификации фрагментов повторяющейся формы на экспериментальных кривых. *Автоматика и телемеханика*. 1985. № 8. С. 89-93.

67. Воробьёв С.А. Алгоритмы динамического программирования в задаче распознавания потока событий в реальном масштабе времени. *Системы автоматического управления и их элементы*. ТулГТУ. Тула, 1994. С. 128-135.

68. Воробьёв С.А. Алгоритмы сегментации структурных экспериментальных кривых с многоэталонным заданием классов. *Известия Тульского государственного университета. Сер. Математика. Механика. Информатика*. Тула: ТулГУ. 1996. Т. 2. Вып. 3. С. 45-49.

69. Воскресенский А.Д., Вентцель М.Д. Статистический анализ сердечного ритма и показатели гемодинамики в физиологических исследованиях. *Проблемы космической биологии*. М. 1974. 42 с.

70. Вычислительные системы и автоматическая диагностика заболеваний сердца: Пер. с англ. под ред. И. Ш. Пинскера. М.: Мир. 1973. 144 с.

71. Вычислительные системы и автоматическая диагностика заболеваний сердца: под ред. Ц. Касереса и Л. Дрейфуса. М.: Мир, 1974. 504 с.

72. Вятчин Д.А. Нечёткие методы автоматической классификации. Минск: Технопринт, 2004. 219 с.

73. Габинский Я.Л. Кардиоинтервалография и автокорреляционный анализ сердечного ритма в динамических исследованиях у больных острым инфарктом миокарда. *Вопросы неотложной помощи*. Свердловск, 1977. С. 15-17.

74. Габ'ян Л., Петришин Ю., Литвиненко Я. Сучасні технології в телемедицині. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей V науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 1-2 лютого 2018 р. Тернопіль, 2018.

С. 45.

75. Габ'ян Л., Петришин Ю., Литвиненко Я. Використання методів попередньої обробки біомедичних даних в задачах телемедицини. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей V науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 1-2 лютого 2018 р. Тернопіль, 2018. С. 25.

76. Гаджаева Ф.У., Григорьянц Р.А., Масенко В.П., Хадарцев А.А. Электрокардиографические системы отведений. Тула: НИИ новых медицинских технологий, ТПП, ТППО. 1996. 115 с.

77. Гаджиев Ч.М. Проверка обобщенной дисперсии, обновляющей последовательности фильтра Калмана в задачах динамического диагностирования. *Автоматика и телемеханика*. 1994. №8. С. 98-104.

78. Гаджиев Ч.М. Новый метод проверки статистических характеристик обновляющей последовательности фильтра Калмана. *Электронное моделирование*. 1996. Т.18, №1. С. 49-54.

79. Гаджиев Ч.М. Прогнозирование технического состояния динамических систем по обновляющей последовательности фильтра Калмана. *Автоматика и телемеханика*. 1993. №5. С. 163-167.

80. Гац Ю., Литвиненко Я. Використання математичної моделі циклічного випадкового процесу в задачах аналізу поверхневих шарів сучасних матеріалів. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування* : тези доповідей II всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 9-10 червня 2015 р. Тернопіль. 2015. С. 7-8.

81. Гац Ю., Литвиненко Я. Обґрунтування вибору діагностичних ознак рельєфних утворень на поверхні нанотитану, сформованих внаслідок лазерної ударно-хвильової обробки. Матеріали XIX наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 18-19 травня 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 5-6.

82. Гладышев Е.Г. О периодически коррелированных случайных последовательностях. Доклад АН СССР. 1961. 137, № 5. С. 2236-2239.

83. Гладышев Е.Г. Периодически и почти периодически коррелированные

случайные процессы с непрерывным временем. *Теория вероятностей и её применения*. 1963. Т.8, Вып. 2. С. 184-189.

84. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М. : Изд-во “Советское радио”, 1963.

85. Гоноровский И.С. Радиосигналы и переходные явления в радиоцепях. М. : Связьиздат, 1954.

86. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва: Техносфера, 2005. 1072 с.

87. Гончаров К. Занимательная биометрия. PC+Mobile. 2006. № 1. С. 38-51.

88. Гордиенко В.И., Замора Т.Е., Лукьянец Г.В. Применение цифровых методов обработки сигналов в морской электроразведке. *Отбор и обработка информации*. 1988. Вып. 1. С. 86-89.

89. Горкуненко А.Б. Моделювання та методи аналізу і прогнозування циклічних економічних процесів в інформаційних системах підтримки прийняття рішень: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. Тернопіль, 2013. 20 с.

90. Горкуненко А.Б. Моделювання та методи аналізу і прогнозування циклічних економічних процесів в інформаційних системах підтримки прийняття рішень: дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. Тернопіль, 2013. 175 с.

91. Горкуненко А., Литвиненко Я., Козак Р., Лупенко С., Нікольський Ю. Інформаційна технологія прогнозування циклічних економічних процесів. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. Тернопіль, 2012. №1 (65). С. 143-153.

92. Горкуненко А.Б., Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Дем'янчук Н. Р. Імітаційне моделювання взаємопов'язаних економічних процесів на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. *Електроніка та системи управління. Національний авіаційний університет*. Київ, 2011. № 2 (28). С. 133–141.

93. ГОСТ 19687-94. Приборы для измерения биоэлектрических потенциалов сердца. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов. 1994. 19 с.

94. Гудзенко Л.И. О периодически нестационарных процессах. *Радиотехника и электроника*. 1959. Т.4. Вып. 6. С. 1026-1064.
95. Гуревич М.Б., Злочевский М.С. Выбор представительного кардиоцикла при контурном анализе ЭКГ на микроЭВМ. Применение мат. методов обработки медико-биологических данных и ЭВМ в мед. технике. М. : ВНИИМП, 1984. С. 75-77.
96. Дарховский Б.С., Бродский Б.Е. Непараметрический метод скорейшего обнаружения изменения среднего случайной последовательности. *Теория вероятностей и ее применения*. 1987. Т.32, №4. С. 899-905.
97. Дарховский Б.С. Общий метод оценивания момента изменения вероятностных характеристик случайной последовательности. *Статистические проблемы управления*. 1984. Вып. 65. С. 76-82.
98. Дарховский Б.С. Непараметрический метод для апостериорного обнаружения момента “разладки” последовательности независимых случайных величин. *Теория вероятностей и ее применения*. 1976. Т.21, №1. С. 180-184.
99. Дарховский Б.С., Каплан А.Я., Шишкин С.Л. О подходе к оценке сложности кривых (на примере электроэнцефалограммы человека). *Автоматика и телемеханика*. 2002. №3. С. 134-140.
100. Дзюбін С.В., Мацюк О.В. Аналіз існуючих математичних моделей газоспоживання. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2006. № 1. С. 29-32.
101. Десова А.А., Легович Ю.С., Разин О.С. Компьютерная система диагностики на базе анализа ритмической структуры пульсового сигнала лучевой артерии. *Медицинская техника*. 1999. № 2. С. 3-5.
102. Дехтярь Г.Я. Электрокардиографическая диагностика. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Медицина, 1972. 416 с.
103. Дивак М.П., Стахів П.Г. Ідентифікація моделей об’єктів в умовах інтервальної невизначеності на основі методів аналізу інтервальних даних : Праці міжнародної конференції з управління “АВТОМАТИКА-2000”. Львів : Державний НДІ інформаційної інфраструктури, 2000. Т. 2. С. 90-97.

104. Довгий Б.П., Ловейкін А.В., Вакал Є.С., Вакал Ю.Є. Сплайн-функції та їх застосування: навчальний посібник. К.:Київський університет, 2016. 117 с.

105. Долобчян З.Л. Основы клинической электрофизиологии и биофизики сердца. Введение к клинической электромеханокардиологии. М.: Медицина, 1968. 475 с.

106. Дороговцев А.Я., Ле Винь Тхуан. О корреляционных функциях гауссовских марковских стационарных и периодических процессов в гильбертовом пространстве. *Избранные задачи современной теории случайных процессов*. Ин-т математики АН УССР. Киев. 1988. С. 61-65.

107. Дороговцев А.Я. Периодические и стационарные режимы бесконечномерных детерминированных и стохастических динамических систем. К. : Высшая школа, 1992. 319 с.

108. Дорофеюк А.А. Десова А.А., Гучук В.В., Дорофеюк Ю.А. Измерение, преобразование и обработка пульсового сигнала лучевой артерии в медицинской диагностике. *Мир измерений*. 2009. № 1. С. 11-19.

109. Драган Я.П. Енергетична теорія лінійних моделей стохастичних сигналів. Львів : Центр стратегічних досліджень еко-біотехнічних систем, 1997. 361 с.

110. Драган Я.П., Осухивская Г.М. Описание тональных кардиосигналов с помощью модели периодически коррелированных процессов. *Проблемы управления и информатики*. 1999. № 1. С. 78-83.

111. Драган Я., Євтух П., Сікора Л., Яворський Б. Періодично корельовані випадкові процеси як адекватні моделі сигналів кратної ритміки природних явищ і технологічних процесів. *Комп'ютерні технології друкарства*. 2000. № 4. С. 269-290.

112. Драган Я.П., Приймак Н.В. Линейные периодически коррелированные случайные процессы. Львов : АН УССР. Физ.-мех. ин-т им. Г.В. Карпенко, 1986. 30 с. (Препринт АН УССР, № 120, 1986).

113. Драган Я.П., Рожков В.А., Яворский И.Н. Методы вероятностного анализа ритмики океанологических явлений. Л. : Гидрометио-издат, 1987. 319 с.

114. Драган Я.П. О периодически коррелированных случайных процессах и системах с периодически изменяющимися параметрами. *Отбор и передача информации*. Киев : Наукова думка, 1969. Вып. 22. С. 27-33.

115. Драган Я.П. О представлении периодически коррелированного случайного процесса через стационарные компоненты. *Отбор и передача информации*. Киев : Наукова думка, 1975. Выпуск 5. С. 7-20.

116. Драган Я.П. О спектральных свойствах периодически коррелированных случайных процессов. *Отбор и передача информации*. Киев : Наукова думка, 1971. Вып. 30. С. 16-24.

117. Драган Я.П. Періодично корельовані та споріднені з ними випадкові процеси - моделі сигналів у коливних системах. *Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів*. Харків : ін-т радіоелектр., 1992. Ч.1. С. 26-41.

118. Драган Я.П., Яворский И.Н. Ритмика морского волнения и подводные акустические сигналы. К. : Наукова думка, 1982. 248 с.

119. Драган Я., Сікора Л., Яворський Б. Основи сучасної теорії стохастичних сигналів і енергетична концепція: математичний апарат, фізичне тлумачення. Львів : Центр стратегічних досліджень ЕБТЕС, 1999. 133 с.

120. Драган Я.П. Свойства реализаций случайных процессов и их статистическая репрезентативность. *Отбор и передача информации*. Киев : Наукова думка, 1987. Вып. 76. С. 12-21.

121. Дубровин В.И., Твердохлеб Ю.В. Усовершенствование методов анализа ЭКГ-сигналов на основе вейвлетпреобразования в системе электрокардиографии высокого разрешения. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. № 1. 2011. С. 91.

122. Дубровин В.И., Каморкин П.А., Твердохлеб Ю.В. Метод выделения профилей волнистости и шероховатости профилограмм металлических поверхностей с помощью вейвлет-анализа. *Адаптивные системы автоматического управления*. Межведомственный научно-технический сборник. 2015. №1 (26). С. 26-31.

123. Дубровин В.И., Колпакова Т.А. Использование нейронной сети для

классификации участников тендера. *Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова»*: под. ред. Е.И. Евтушенко. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. №3. С. 178-181.

124. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 559 с.

125. Ермаков С.И., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. М.: Наука, 1982. 298 с.

126. Загородна Н.В., Литвиненко Я.В., Фриз М.Є. Розробка методу короткотермінового прогнозу добового газоспоживання в опалювальний період на основі регресійного аналізу. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. Тернопіль, 2010. №4 (15). С. 130-140.

127. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: изд. института математики, 1999. 270 с.

128. Заездный А.М. Основы расчетов по статистической радиотехнике. М.: Связь, 1969. 447 с.

129. Захаров А.В., Шокин Ю.И. Синтез систем управления при интервальной неопределенности параметров их математических моделей. Доклады АН СССР. 1988. Т. 299, № 2. С. 292-295.

130. Зенков Л.Р., Ронкин М.А. Функциональная диагностика нервных болезней: руководство для врачей. М. : Медицина, 1982. 432 с.

131. Зиновьева О.С., Романова В.А. Численное исследование влияния размера зерна и условий нагружения на деформационные характеристики поликристаллического алюминиевого сплава. *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 6. С. 126-134.

132. Зиновьева О.С., Романова В.А., Балохонов Р.Р., Ястребов В.А., Зиновьев А.В. Влияние размера зерна на эволюцию шероховатости поверхности образцов высокопрочной стали. *Численное моделирование. Известия высших учебных заведений. Физика*. 2013. Т. 56, № 7/3. С. 161-163.

133. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Карташова Н.В. Пространственно-временная самоорганизация пластической деформации ГЦК монокристаллов. Письма в

- журнал экспериментальной и теоретической физики. 1994. Т. 60, № 7. С. 583-540.
134. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М. : Радио и связь, 1987. 120 с.
135. Исаков И.И., Кушаковский М.С., Журавлева Н.Б. Клиническая электрокардиография (нарушения сердечного ритма и проводимости): Руководство для врачей. – 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Медицина, 1984. 272 с.
136. Использование некоторых систем отведений ЭКГ и ВКГ в кардиологической дифференциальной диагностике. Методические рекомендации. М.: Министерство здравоохранения СССР. 1984. 28 с.
137. Ишлинський А. Ю. Політехнічний словник. Москва, 1980.
138. Калишев О.Н. Метод диагностирования измерительных каналов с учетом предыстории. *Автоматика и телемеханика*. 1988. №6. С. 135-143.
139. Кайсерес К., Дрейфус Дж. Вычислительные системы и автоматическая диагностика заболеваний сердца. М. : Мир, 1974. 478 с.
140. Кветний Р.Н., Бойко О.Р. Інтервальні моделі перетворень сигналів в інформаційно-вимірювальних системах: монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. 100 с.
141. Кельман И.М. Электрокардиография и фонокардиография. М.: Медицина, 1974. 152 с.
142. Кемени Дж., Снелл Дж. Конечные цепи Маркова. М.: Наука, 1970. 271 с.
143. Клепиков Н.П., Соколов С.Н. Анализ и планирование экспериментов методом максимума подобия. М.: Наука, 1964.
144. Клинов В.Г. Научно-технический прогресс и большие циклы конъюнктуры мирового хозяйства. *Проблемы прогнозирования*. 2003. № 1.
145. Клочков В.А. Автоматический анализ интегральной реограммы. *Автоматизация диагностики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний*. Под ред. Халфена Э.Ш. Саратов. 1980. С. 35-40.
146. Клочков В.А., Мареева Т.Н. Новая модификация метода интегральной реографии. *Автоматизация диагностики и лечения сердечно-сосудистых*

заболеваний: под ред. Э. Ш. Халфена. Саратов. 1980. С. 41-46.

147. Коваль В., Литвиненко Я., Яскілка В. Застосування методів статистичної обробки циклічних випадкових процесів в задачах аналізу циклів сонячної активності. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей першої наук.-техн. конф., м. Тернопіль, 20 травня 2011 р. Тернопіль. 2011. С. 17.

148. Кокс Ж. Р., Нолл Ф. Н., Артур Р. М. Анализ энцефалограмм, кривых кровяного давления и электрокардиограмм на вычислительной машине. *Распознавание образов при помощи цифровых вычислительных машин*. М.: Мир, 1974. С. 38-75.

149. Кокс Ж.Р., Нолл Ф.Н., Артур Р.М. Анализ электроэнцефалограмм, кривых кровяного давления и электрокардиограмм на цифровой вычислительной машине. ТИИЭР, №. 4, 1972. С. 36-73.

150. Колмогоров А.Н. Статистическая теория колебаний с непрерывным спектром. Юбилейный сборник АН СССР. М. : изд-во АН СССР. 1947. Ч.1. С. 241-249.

151. Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения. М.: Экономика, 2002.

152. Коринківська О., Приймак М., Савчук М. Розвиток моделі стохастично періодичних сигналів і завад. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. Тернопіль, 2006. Т. 11, № 1. С. 119-133.

153. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике : для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1973. 832 с.

154. Коронкевич О.І. Лінійні динамічні системи під дією випадкових сил. *Наукові записки Львівського університету*. 1957. Т. 44, № 8. С. 175-183.

155. Красильников О.І., Марченко Б.Г., Приймак М.В. Процеси з незалежними періодичними приростами і періодичні білі шуми. *Відбір і обробка інформації*. 1996. Вип. 10. С. 22-27.

156. Красовицкая К.А., Черкашин Е.А. Разработка экспертной системы анализа структуры электрокардиосигнала. *Образовательные ресурсы и технологи*. 2016. №2, Т. 14 С. 180-186.

157. Круковец А.С., Горелкин Г.А. Разработка метода интерполяции значений номограммы. Современные научные исследования и инновации. 2015. № 5. Ч. 2 [электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/05/53846> (дата звернення: 23.09.2018).
158. Куц Ю. В., Щербак Л.М. Статистична фазометрія : Наукова монографія. Тернопіль : Вид-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 383 с.
159. Лебедев А.Н. Моделирование в научно-технических исследованиях. М.: Радио и связь, 1989. 224 с.
160. Лебедев В.В., Лебедева С.В., Калантар В.А., Аракчеев А.Г., Корато И.В., Ащекин М.И. Алгоритмы измерения длительности комплексов ЭКГ. *Медицинская техника*. 1998. №5. С. 6-14.
161. Левашкина А.О., Поршнева С.В. Сравнительный анализ супервизорных критериев оценки качества сегментации изображений. *Информационные технологии*. 2009. № 5. С. 52-57.
162. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники: Т. 1. М. : Сов. радио, 1974. 552 с.
163. Литвиненко Я., Лупенко С., Студена Ю. Методи статистичної обробки сигналів серця на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу із зонною часовою структурою. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. Тернопіль, 2006. № 4 (11). С. 189-200.
164. Литвиненко Я.В. Метод інтерполяції кубічним сплайном дискретної функції ритму циклічного сигналу із визначеною сегментною структурою. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький, 2017. № 3. С. 105-112.
165. Литвиненко Я.В., Загородна Н.В., Окіпний І.Б., Осухівська Г.М. Метод верифікації циклічності (Оцінювання досліджуваного сигналу на приналежність до циклічних сигналів). *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницький. 2018, № 4 (263). С. 214-221.
166. Литвиненко Я. Основи методології сегментації циклічних сигналів. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій* : матеріали

міжнародної науково-технічної конференції до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя. м. Тернопіль, 23-24 травня 2018 р. Тернопіль, 2018. С. 211-212.

167. Литвиненко Я., Лупенко С., Студена Ю. Статистичні методи обробки кардіосигналів на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу. Матеріали десятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 17-18 травня 2006 р. Тернопіль, 2006. С. 76.

168. Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Сверстюк А. С. Програмний комплекс для обробки та моделювання синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням моделей та методів теорії циклічних функціональних відношень. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* Хмельницький, 2009. № 5. С. 80-87.

169. Литвиненко Я., Лупенко С., Сверстюк А., Студена Ю. Підходи до моделювання сигналів серця на ЕОМ з використанням циклічних випадкових процесів. Матеріали одинадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 16-17 травня 2007 р. Тернопіль, 2007. С. 86.

170. Литвиненко Я., Лупенко С. Підходи до сегментації циклічного випадкового процесу із зонною часовою структурою. Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 13-14 травня 2009 р. Тернопіль, 2009. С. 123.

171. Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Сверстюк А. С. Діагностичні ознаки в системах автоматизованої діагностики функціонального стану серцево-судинної системи за сукупністю синхронно зареєстрованих кардіосигналів. *“Kluczowe aspekty naukowej dzialalnosci – 2010”* : матеріали V міжнародної науково-практичної конференції, м. Перемишль, 7-15 січня 2010 р. Перемишль, 2010. №16. С. 11–15.

172. Литвиненко Я.В. Сегментація циклічного випадкового процесу із зонною часовою структурою та оцінка його функції ритму. *Фундаментальні та*

прикладні проблеми сучасних технологій : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. ТНТУ, м. Тернопіль, 19-21 травня 2010 р. Тернопіль, 2010. С. 274.

173. Литвиненко Я.В. Огляд методів пошуку «розладки» випадкових процесів. Матеріали чотирнадцятої наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 27-28 жовтня 2010 р. Тернопіль, 2010. С. 21.

174. Литвиненко Я., Марущак П. Аналіз деформування розломно-блокових систем з використанням стохастичних методів обробки циклічних випадкових процесів. Збірник тез доповідей XV наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 14-15 грудня 2011 р. Тернопіль, 2011. С. 128.

175. Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Дем'янчук Н.Р., Сверстюк А.С. Імітаційне моделювання синхронно зареєстрованих сигналів серця на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів у задачах кардіодіагностики. *Електроніка та системи управління. Національний авіаційний університет*. Київ, 2009. № 4 (22). С. 141–148.

176. Литвиненко Я., Яскілка В. Програмне забезпечення для сегментації детермінованих циклічних функцій в задачах цифрової обробки даних. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей III науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 24 квітня 2013 р. Тернопіль, 2013. С. 28.

177. Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Сверстюк А. С. Діагностичні ознаки в комп'ютерних системах діагностики функціонального стану серцево-судинної системи людини. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2010. № 1. С. 182-188.

178. Литвиненко Я., Литвиненко Т. Метод вилучення тренду з електрокардіосигналу в системах автоматизованої кардіодіагностики. *Актуальні задачі сучасних технологій* : матеріали V міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 17-18 листопада 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 64.

179. Литвиненко Я., Марущак П., Лавренюк Т. Сегментація циклічних сигналів в задачах цифрової обробки даних: детермінований підхід. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування* : тези доповідей III всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 8-9 червня 2017 р. Тернопіль, 2017. С. 155-157.

180. Литвиненко Я.В., Марущак П.О., Побережний Л.Я., Баран Д.Я. Аналіз кінетики динамічного поширення тріщини в трубі магістрального газопроводу як циклічного випадкового процесу. *Нафтогазова енергетика 2017* : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 380-382.

181. Литвиненко Я.В., Марущак П. О. Застосування адитивної математичної моделі циклічного випадкового процесу і поліноміальної функції для виявлення закономірностей динамічного руйнування магістрального газопроводу. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)* : матеріали IV міжнародної наукової конференції, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, 31 жовтня 2 листопада 2017 р. Вінниця, 2017. С. 167-169.

182. Литвиненко Я.В., Марущак П.О. Застосування адитивної математичної моделі циклічного випадкового процесу і детермінованої функції тренду для аналізу руйнування газопроводу. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018, № 1 (54). С. 95-104.

183. Литвиненко Я., Лупенко С., Маєвський О. Комп'ютерний експериментальний комплекс для моделювання та обробки кардіосигналів. Матеріали шостої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету "Прогресивні матеріали та обладнання в машино і приладобудуванні", м. Тернопіль, 24-26 квітня 2002 р. Тернопіль, 2002. С. 61.

184. Литвиненко Я.В. Моделювання та методи визначення зонної часової структури електрокардіосигналу в автоматизованих діагностичних системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. Тернопільський державний технічний

університет імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2006. 20 с.

185. Литвиненко Я.В. Моделювання та методи визначення зонної часової структури електрокардіосигналу в автоматизованих діагностичних системах: дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2006. 210 с.

186. Литвиненко Я.В., Лозінська Є. В., Лупенко С.А., Щербак Л.М. Імітаційне моделювання кардіоінтервалограми на ЕОМ при фізичних навантаженнях. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький: Навчальна книга. 2002. №2. С.120-124.

187. Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Щербак Л.М. Моделювання та обробка циклічних сигналів серця на ЕОМ. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький: Навчальна книга. 2000. №3. С. 160-167.

188. Литвиненко Я.В., Лупенко С., Чупрін Л., Щербак Л. Алгоритм моделювання дискретних стаціонарних лінійних випадкових процесів. *Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій*. Т. 4. Дніпропетровськ: Дніпропетровський університет. 2001. С. 52-59.

189. Литвиненко Я.В. Математична модель електрокардіосигналу для задач визначення його діагностично важливих зон. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький: Навчальна книга. 2004. №2. С. 86-93.

190. Литвиненко Я., Лупенко С., Щербак Л. Статистичний метод визначення зонної структури електрокардіосигналу в автоматизованих діагностичних системах. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. Тернопіль, 2005. Т. 10, № 3. С. 165-175.

191. Литвиненко Я., Щербак Л. Система комп'ютерних програм для автоматизованої обробки та моделювання кардіосигналів. Тези доповідей п'ятої наук. конф. ТДТУ. Тернопіль. 2001. С. 16.

192. Лупенко С. А., Литвиненко Я. В., Сверстюк А. С. Статистичний сумісний аналіз кардіосигналів на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. *Електроніка та системи управління*. Національний

авіаційний університет. Київ, 2008. № 4 (18). С. 22-29.

193. Лупенко С., Литвиненко Я., Сверстюк А. Сумісна статистична обробка синхронно зареєстрованих кардіосигналів на базі їх моделі у вигляді циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. Матеріали дванадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 14-15 травня 2008 р. Тернопіль, 2008. С. 111.

194. Лупенко С. А. Детерминированные и случайные циклические функции как модели колебательных явлений и сигналов: определение и классификация. *Электронное моделирование*. Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. Киев, 2006. Т. 28, № 4. С. 29-45.

195. Лупенко С., Дем'янчук Н. Структура та статистичне оцінювання ймовірнісних характеристик циклічного випадкового процесу із стохастично незалежними циклами *Вісник Тернопільського державного технічного університету імені І.Пулюя*. 2009. Т. 14. №1. С. 145-153.

196. Лупенко С.А. Завдання інтерполяції функції ритму циклічної функції з відомою зонною структурою. *Електроніка та системи управління*. Національний авіаційний університет. Київ, 2007. № 2 (12). С. 27-35.

197. Лупенко С. А. Моделювання та методи обробки циклічних сигналів серця на базі лінійних випадкових функцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2001. 20 с.

198. Лупенко С. А. Моделювання та методи обробки циклічних сигналів серця на базі лінійних випадкових функцій: дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2001. 253 с.

199. Лупенко С.А., Поліщук Г.В., Луцик Н.С., Сверстюк А.С. Напрями розвитку математичного та програмного забезпечення інформаційних систем діагностики та прогнозування за циклічними біометричними сигналами. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2012. № 2. С. 17-27.

200. Лупенко С. А. Розвиток теорії моделювання та обробки циклічних сигналів в інформаційних системах: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 01.05.02. Національний університет "Львівська політехніка". Львів, 2010. 40 с.

201. Лупенко С. А. Розвиток теорії моделювання та обробки циклічних сигналів в інформаційних системах: дис. ... докт. техн. наук: 01.05.02. Національний університет "Львівська політехніка". Львів, 2010. 479 с.

202. Лупенко С. Циклічні функції та їх класифікація в задачах моделювання циклічних сигналів та коливних систем. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький, 2005. № 1. С. 177-185.

203. Лупенко С., Литвиненко Я., Сверстюк А. Статистичне оцінювання взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів у системах автоматизованої кардіодіагностики. Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 13-14 травня 2009 р. Тернопіль, 2009. С. 98.

204. Лупенко С.А., Сверстюк А.С., Стадник Н.Б., Зозуля А.М. Математичне моделювання та методи опрацювання сигналів серця на базі циклічних випадкових процесів та векторів *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI(20), Issue: 172, 2018 С. 47-54, <https://doi.org/10.31174/send-nt2018-172vi20-12>

205. Лупенко С.А. Теоретичні основи моделювання та опрацювання циклічних сигналів в інформаційних системах: монографія. Львів : Магнолія, 2006, 2016. 343 с.

206. Лупенко С. Циклічне функціональне відношення як основа математичного формалізму теорії моделювання та аналізу циклічних сигналів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. Тернопіль, 2007. Т. 12, № 3. С. 183-195.

207. Лупенко С.А., Дем'янчук Н.Р., Сверстюк А.С. Концептуально-методологічні основи імітаційного моделювання циклічних сигналів на ЕОМ із використанням їх моделі у вигляді циклічного функціонального відношення. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*.

Хмельницький, 2008. № 2. С. 101-111.

208. Лупенко С.А., Щербак Л.М. Конструктивна математична модель сигналів серця в технічних системах кардіометрії. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький: Навчальна книга, 2000. № 2. С. 133-136.

209. Лупенко С.А., Щербак Л.М. Конструктивна математична модель сигналів серця на основі лінійних періодичних випадкових процесів та полів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2000. Т. 5, № 4. С. 101-110.

210. Лупенко С. А. Математичне моделювання та методи обробки циклічних сигналів серця в діагностичних системах кардіометрії. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. Тернопіль, 2001. Т. 6, № 3. С.103-111.

211. Лупенко С.А. Математичне та комп'ютерне моделювання сигналів серця в задачах кардіометрії. Матеріали п'ятої наук.-техн. конф. ТДТУ "Прогресивні матеріали та обладнання в машино- і приладобудуванні". м. Тернопіль, 2001. С. 17.

212. Лупенко С. Особливості дискретизації циклічних функцій. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький, 2006. № 1. С. 64-70.

213. Луцик Н.С., Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Зозуля А.М. Програмний комплекс для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю. *Журнал Вінницького національного технічного університету «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія»*. Вінниця, 2016. №1 (35). С. 13-22.

214. Луцик Н., Литвиненко Я. Програмний комплекс для аналізу серцевого ритму на базі математичної моделі у вигляді умовного циклічного випадкового процесу. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування* : тези доповідей II всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 9-10 червня 2015 р. Тернопіль, 2015. С. 12-14.

215. Лоев М. Теория вероятностей : пер. с франц. М. : изд-во иностранной литературы, 1962. 719 с.

216. Лозінська Є., Лупенко С., Осухівська Г. Обґрунтування математичної моделі кардіоінтервалограми при фізичних навантаженнях. Матеріали дев'ятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 12-13 травня 2005 р. Тернопіль, 2005. С. 63.

217. Лозінська Є.В., Лупенко С.А. Математичне моделювання та методи обробки кардіоінтервалограм людини в сучасних комп'ютерних діагностичних системах. Матеріали восьмої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 11-12 травня 2004 р. Тернопіль, 2004. С. 63.

218. Лозінська Є., Лупенко С., Щербак Л. Математична модель та методи обробки кардіоінтервалограми при фізичних навантаженнях в задачах діагностики адаптивних можливостей організму людини. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. Тернопіль, 2003. Т. 8, № 4. С. 97-105.

219. Лозінська Є., Лупенко С., Щербак Л. Математична модель тривалості серцевих скорочень при фізичних навантаженнях для діагностики адаптивних можливостей організму людини по зареєстрованій електрокардіограмі. Матеріали шостої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 24-26 квітня 2002 р. Тернопіль, 2002. С. 63.

220. Ляуконис А.Ю. Оптимизация городского газоснабжения. Л. : Недра, Ленинградское отделение, 1989. 301 с.

221. Ляшенков А.С. Синтезированный квазипериодический двухуровневый сигнал как идеальный меандр с переменным периодом. Сборник *“Проблемы радиосвязи”* ГУП “Полет”. Н. Новгород, 2002.

222. Макфи, Бол. Исследования в области электрокардиографии и магнитокардиографии. ТИИЭР. 1972. Т.60, №3. С. 53-98.

223. Малиновский Л.Г., Пинснер И.Ш., Цукерман Б.М. Математические методы описания ЭКГ. Медицинская техника. 1968, № 5. С. 3-7.

224. Мамедов Н. Я-Оглы. Влияние климатических факторов на процесс газопотребления (на примере Азербайджанской ССР) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Баку, 1985.

225. Марценко С. В. Математичне моделювання та статистичні методи обробки даних вимірювань в задачах моніторингу електронавантаження: дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2011. 149 с.

226. Марценюк В.П., Сверстюк А.С., Вар'ян Н.В. Напрями розвитку математичного та програмного забезпечення інформаційних систем діагностики та прогнозування за циклічними біометричними сигналами. *Медична інформатика та інженерія* 2011. № 1. С. 68-74.

227. Марченко Б.Г., Омельченко В.А. Вероятностные модели случайных случайных сигналов и полей в прикладной статистической радиофизике. К. : УМК ВО, 1988. 176 с.

228. Марченко Б.Г. Лінійні періодичні процеси. пр. ін.-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка. 1999. С. 165-182.

229. Марченко Б.Г. Метод стохастических интегральных представлений и его приложения в радиотехнике. К. : Наукова думка, 1973. 192 с.

230. Марченко Б.Г., Мыслович М.В. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин. К.: Наукова думка, 1992. 196 с.

231. Марченко В.Б. Ортогональные функции дискретного аргумента и их приложение в геофизике. К.: Наукова думка, 1992. 211 с.

232. Математичний енциклопедичний словник. С. И. Адян, Н. С. Хвальків, В. И. Битюцков, А. П. Єршов, Л. Д. Кудрявцев, А. Л. Онищик, А. П. Юшкевич. М. : Сов. энциклопедия, 1988.

233. Математическое моделирование. Ред. Дж. Эндрюс, Р. Мак–Лаун. М.: Мир, 1979. 248 с.

234. Мацюк О.В., Приймак М.В. Вкладені стаціонарні послідовності періодичних випадкових процесів та їх використання в задачах обробки газонавантажень. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. Івано-

Франківськ : ІФНТУНГ. 2003. № 4 (7). С. 64-69.

235. Мацюк О.В., Приймак М.В. Моделі газонавантажень з врахуванням стохастичної періодичності та можливості їх статистичного аналізу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. 2003. № 2 (7). С. 64-69.

236. Мацюк О., Приймак М.В. Періодичний білий шум із змінним періодом. Матеріали дванадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 14-15 травня 2008 р. Тернопіль, 2008. С. 123.

237. Методы компьютерной обработки изображений: под ред. В.А. Сойфера. М. Физматлит, 2003. 784 с.

238. Минкин Р.Б., Павлов Ю.Д. Электрокардиография и фонокардиография. – 2-е изд., перераб. и дополн. Л.: Медицина, 1988. 256 с.

239. Миронов Е. А., Платонов С. А. Решение задачи идентификации математической модели объекта прогнозирования в условиях неопределенности. *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 4. <https://www.scienceeducation.ru/ru/article/view?id=14029>

240. Миронова Т.Ф., Миронов В.А. Клинический анализ волновой структуры синусового ритма сердца. Челябинск: Дом печати, 1998. 162с.

241. Михайлович Т.В., Фриз М.Є. Алгоритм та практична реалізація методу прогнозування водоспоживання із використанням моделі періодичної авторегресії. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2011. № 2. С. 204-208.

242. Михайлович Т., Фриз М.Є. Метод інтервального прогнозування водоспоживання із використанням моделі періодичної авторегресії. *Вісник ТНТУ*. 2012. Том 66, № 2. С.249-257.

243. Млинко Б.Б. Математична модель ритмічного біосигналу в задачах фотоплетизмодіагностики: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. Тернопіль, 2003. 19 с.

244. Мулик Н. В. Математична модель та метод прогнозу газоспоживання з

урахуванням циклічності: дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. Тернопіль, 2006. 136 с.

245. Мыслович М.В., Приймак Н.В., Щербак Л.Н. Периодически коррелированные случайные процессы в задачах обработки акустической информации. К. : Знание, 1980. 23 с.

246. Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. Академия наук СССР. Институт проблем управления. М.: Наука, 1983. 200 с.

247. Никифоров И.В. Применение кумулятивных сумм для обнаружения изменения характеристик случайного процесса. *Автоматика и телемеханика*. 1979. №2. С. 48-58.

248. Нікітчук Т.М. Порівняльний аналіз методів реєстрації пульсової хвилі. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2013, №1 С. 183-186.

249. Нікіфоров Ю.М., Ковалюк Б.П. Лазерна ударно-хвильова дія на матеріали: Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2015. 272 с.

250. Новый тлумачний словник української мови у 4-х томах. Т. 1. "а-є" Укл. В.В. Яременко, О.М. Сліпушко. К. : Асконіт, 1998. Т. 1. 912 с.

251. Новый тлумачний словник української мови у 4-х томах. Т. 2. "ж-о" Укл. В.В. Яременко, О.М. Сліпушко. К. : Асконіт, 1998. Т. 2. 910 с.

252. Новый тлумачний словник української мови у 4-х томах. Т. 3. "о-р" Укл. В.В. Яременко, О.М. Сліпушко. К. : Асконіт, 1998. Т. 3. 928 с.

253. Новый тлумачний словник української мови у 4-х томах. Т. 4. "р-я" Укл. В.В. Яременко, О.М. Сліпушко. К. : Асконіт, 1998. Т. 4. 942 с.

254. Обработка изображений методами математической морфологии в ассоциативной осцилляторной среде. И.В. Огнев, Н.А. Сидорова. 2007. <https://cyberleninka.ru/article/n/obrabotka-izobrazheniy-metodami-matematicheskoy-morfologii-v-assotsiativnoy-ostillyatornoy-srede>

255. Орел В.Р., Сурду А. Г. Влияние артериальных сосудистых сопротивлений на мощность работы левого желудочка сердца у спортсменов. Юбилейный сборник трудов ученых РГАФК, посвященный 80-летию академии.

М. : 1998. Т. 3. С. 197-199.

256. Основные инструментальные методы исследования сердца. Милославский Я.М., Ходжаева Д.К., Нефедова А.И., Ослопов В.Н. Казань: Издательство Казанского университета, 1983. 142 с.

257. Осухівська Г. М. Математична модель тонового сигналу для діагностики стану клапанів серця людини: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя. Тернопіль, 1999. 20 с.

258. Осухівська Г.М. Обґрунтування вибору фільтру для статистичного аналізу тональних сигналів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 1997. Т. 2, № 2. С. 57-62.

259. Панин В.Е. Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации. *Физическая мезомеханика*. 2001. Т. 4. №3. С. 5-22.

260. Панин А.В. Особенности пластической деформации и разрушения технического титана и малоуглеродистой стали, подвергнутых ультразвуковой обработке. *Физика металлов и металловедение*. 2004. Т. 98, Вып. 1. С. 109-118.

261. Панин А.В., Панин В.Е., Почивалов Ю.И. и др. Особенности локализации деформации и механическое поведение титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях. *Физическая мезомеханика*. 2002. Т. 5, №4. С. 73-84.

262. Панин А.В. Масштабные уровни деформации в поверхностных слоях нагруженных твердых тел и тонких пленках. автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск: ИФПМ СО РАН, 2006. 37 с.

263. Перельмутова М.В. Вычисление ударного и минутного объемов крови с помощью ЭВМ по данным интегральной реографии тела. Автоматизация диагностики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний: под ред. Э.Ш. Халфена. Саратов, 1980. С. 46-51.

264. Пипбергер Х. Анализ электрокардиограмм на вычислительной машине. *Вычислит. устройства в биологии и медицине*. М.: Мир, 1967. С. 15-19.

265. Пешель М. Моделирование сигналов и систем. М. : Мир, 1981. 300 с.

266. Попадько В.Е. Некоторые вопросы оперативного прогнозирования газопотребления методами теории случайных процессов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1972.

267. Потапов А.А., Пахомов А.А., Никитин С.А., Гуляев Ю.В. Новейшие методы обработки изображений. М.: Физматлит, 2008. 496 с.

268. Практическое руководство по клинической электрокардиографии. Чернов А.З., Кечкер М.И, Александрова Е.А. и др. М.: Медицина, 1971. 207 с.

269. Прессман Л.П. Клиническая сфигмография. М.: Медицина, 1974. 127 с.

270. Приймак М.В. Основи теорії моделювання, аналізу і прогнозу в автоматизованих системах управління ритмічними процесами: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Київ. 2001. 34 с.

271. Приймак М., Лупенко С., Щербак Л. Імітаційне моделювання періодичних ланцюгів Маркова. *Вимірювальна техніка та метрологія* : міжвідомчий наук.-техн. збірник. Львів : Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2002. № 60. С. 7-10.

272. Приймак М.В. Дослідження взаємозв'язку лінійних і періодичних випадкових процесів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький : Навчальна книга, 1999. №2. С. 167-169.

273. Приймак М.В. Лінійні випадкові поля з періодичним породжуючим полем. *Технічна електродинаміка*. 1998. № 3. С. 24-26.

274. Приймак М.В. Лінійні періодичні випадкові процеси і їх моделювання на ЕОМ. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. Тернопіль, 1998. № 3. С. 111-114.

275. Приймак М., Боднарчук І., Лупенко С. Умовно періодичні випадкові процеси із змінним періодом. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. Тернопіль, 2005. Т. 10, № 2. С. 143-152.

276. Приймак Н.В. Гузий В.И. Исследование возможности измерения периода корреляции периодически коррелированного случайного процесса по одной наблюдаемой реализации *Вестник Киевского политехнического института* „Электроакустика и звукотехника” Киев.: Высшая школа. 1984. Вып. 8. С. 31-33.

277. Приймак М., Карнаухов О. Ряди Фур'є та можливості їх використання для функцій із змінним періодом. Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 13-14 травня 2009 р. Тернопіль, 2009. С. 91.

278. Приймак М., Прошин С. Елементи однорідності для періодичних ланцюгів Маркова. *Вісник ТДТУ*. 2009. Том 14, № 2. С. 114-123.

279. Приймак М., Віцентій О., Прошин С. Похибка оцінок матриць переходів періодичного ланцюга Маркова. *Вісник ТНТУ*. 2010. Том 15, № 3. С. 150-159.

280. Приймак М.В., Прошин С.В. Елементи однорідності для періодичних ланцюгів Маркова. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2009. Т.8, № 2. С. 17-21.

281. Приймак М.В. Марківські періодичні процеси. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2003. Т.8, № 3. С. 17-21.

282. Приймак М.В. Періодичні ланцюги Маркова в задачах статистичного аналізу і прогнозу енергонавантажень. *Технічна електродинаміка*. 2004. №2. С. 3-7.

283. Приймак М.В., Прошин С.Ю. Оцінювання матриць переходів періодичних ланцюгів Маркова. *Електроніка та системи управління*. 2009. №3(21). С. 26-33.

284. Прошин С.Ю. Оцінка матриць переходів енергонавантажень на базі періодичного ланцюга Маркова. *Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка : збірник наукових праць*. 2013. Вип. 58. С. 109-114.

285. Рагозин А.Н., Кононов Д.Ю., Карманов Ю.Т. Классический спектральный анализ, авторегрессионные модели, анализ на плоскости комплексных частот в оценке структуры колебаний сердечного ритма. *Цифровые радиоэлектронные системы*. 2000. Вып. 4.

286. Рагозин А.Н. Методы спектрального анализа variability ритма сердца. Сб. научных трудов симпозиума “Колебательные процессы гемодинамики. Пульсация и флуктуация сердечно-сосудистой системы”. Миасс,

2000.

287. Рангайян Р.М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход. М.: Физмалит. 2010. 440 с.

288. Романова В.А. Исследование деформационных процессов на поверхности и в объеме материалов с внутренними границами раздела методами численного моделирования. *Физическая мезомеханика*. 2005. Т. 8, № 3. С. 63-78.

289. Романова В.А., Зиновьева О.С., Балохонов, Р.Р. Зиновьев А.В., Батухтина Е.Е. Влияние модифицированного поверхностного слоя на эволюцию деформационного рельефа в поликристаллических стальных образцах. *Численное моделирование. Физическая мезомеханика*. 2013. Т. 16, № 6. С. 59-69.

290. Рудаков П.И., Сафонов В.И. Обработка сигналов и изображений. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. 416 с.

291. Сантопетро Р.Ф. Происхождение и характеристики основного сигнала, шума и наводки в высокочастотной электрокардиограмме. ТИИЭР. 1977. Т. 65, № 5. С. 137-145.

292. Сверстюк А. С. Математичне моделювання та методи обробки синхронно зареєстрованих сигналів серця з використанням циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів: дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Київ, 2010. 196 с.

293. Свідоцтво № 31682 Україна. Комп'ютерна програма “Статистична обробка циклічних сигналів серця” (СОЦСС) / А. С. Сверстюк, С. А. Лупенко, Я. В. Литвиненко; заявл. 05.11.09 ; опубл. 20.01.10.

294. Свідоцтво № 38822 Україна. Комп'ютерна програма “Моделювання циклічних економічних процесів” (МЦЕП) / А. Б. Горкуненко, С. А. Лупенко, Я. В. Литвиненко; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11.

295. Свідоцтво № 38823 Україна. Комп'ютерна програма “Статистична обробка циклічних економічних процесів” (СОЦЕП) / А. Б. Горкуненко, С. А. Лупенко, Я. В. Литвиненко; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11.

296. Свідоцтво № 59323 Україна. Комп'ютерна програма “Аналіз серцевого ритму з підвищеною інформативністю” / Я.В. Литвиненко, С.А. Лупенко, Н.С.

Луцик; заявл. 19.02.2015; опубл. 16.04.2015.

297. Свідоцтво № 65753 Україна. Комп'ютерна програма “Статистична обробка та моделювання циклічних сигналів рельєфоутворення, оцінка похибок моделювання” / Я.В. Литвиненко, П.О. Марушак, Є.В. Тиш; заявл. 28.03.2016; опубл. 31.05.2016.

298. Свідоцтво № 68541 Україна. Комп'ютерна програма “Сегментація детермінованих циклічних функцій” / Я.В. Литвиненко; заявл. 8.09.2016; опубл. 8.11.2016.

299. Свідоцтво № 79103 Україна. Комп'ютерна програма “Сегментація випадкових циклічних функцій” / Я. В. Литвиненко; заявл. 8.05.2018; опубл. 16.05.2018.

300. Семчишин О.В., Лещишин Ю.З., Забитівський В.П. Алгоритм виділення RR-інтервалів кардіосигналу для задачі аналізу варіабельності серцевого ритму в системі реального часу. *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницький, 2007. Т.1. № 6. С. 130-136.

301. Семчишин О.В., Лещишин Ю.З. Оцінка ефективності методу виділення RR-інтервалів електрокардіосигналів плоду. *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницький, 2010. Т.1. № 5. С. 187-193.

302. Семенов С.И. Теория неадаптивных масок для обработки изображений. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2002. № 12. С. 33-40.

303. Сжатие данных для хранения и передачи электрокардиограмм и векторкардиограмм. Уомбл М.Э, Холлидей Дж.С., Миттер С.К., Ланкастер М.С., Трибвассер Дж. Х. ТИИЭР. 1977. Т.65, №5. С. 131-136.

304. Сидоренко Г.И., Афанасьев Г.К., Никитин Я.Г. Статистический анализ сердечного ритма с применением моментов высших порядков. *Кардиология*. 1975. Т. 15, № 12. С. 96.

305. Слуцкий Е.Е. Избранные труды (Теория вероятностей и математическая статистика). М. : Изд. АН СССР, 1966. 292 с.

306. Слуцкий Е.Е. Сложение случайных причин как источник циклических процессов. *Вопр. конъюнктуры*. 1997. Т. 3, вып. 1. С. 34-64.

307. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2008. 448 с.
308. Советский энциклопедический словарь. А. В. Прохоров. 4-е издание. Москва, 1988. 1600 с.
309. Сойфер В.А. Компьютерная обработка изображений. Часть 1. Математические модели. Соросовский образовательный журнал, 1996. №2. С.5-28.
310. Стахов О.П. За принципом золотої пропорції: перспективний шлях розвитку обчислювальної техніки. *Журнал "Вісник Академії наук Української РСР"*, №1-2, 1990.
311. Сторнгин Р.Г. Численные методы в многоэкстремальных задачах (Информационно-статистические алгоритмы). М.: Наука, 1978. 240 с.
312. Терехова Л.Г. Практические вопросы сфигмографии. Л.: Медицина, 1968. 118 с.
313. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М. : Радио и связь, 1982. 624 с.
314. Томас Л.Дж., Кларк К.У., Мед Ч.Н., Рипли К.Л., Спеннер Б.Ф., Оливер Г.Ч. Автоматизированный анализ сердечных дизритмий. ТИИЭР. 1979. Т.67, №9, С. 173-192.
315. Туган-Барановський М.І. Основи політичної економії. Львів : Вид. центр Львів. нац. ун-ту ім. Івана Франка, 2003. 628 с.
316. Турчак Л.И. Основы численных методов: учеб. пособие. М.:Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 320 с.
317. Файнзильберг Л.С. Восстановление эталона циклических сигналов на основе использования хаусдорфовой метрики в фазовом пространстве координат. *Кибернетика и системный анализ*. 2003. № 3. С. 20-28.
318. Файнзильберг Л.С. Новая информационная технология обработки ЭКГ для выявления ишемической болезни сердца при массовых обследованиях населения. *Управляющие системы и машины*. 2005. № 3. С. 63-71.
319. Файнзильберг Л.С. Методи та інструментальні засоби оцінювання стану

об'єктів за сигналами з локально зосередженими ознаками: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.13.06. НАН України. Міжнар. наук.-навч. центр інформ. технологій та систем. Київ. 2004. 35 с.

320. Федорів Р.Ф. Статистична радіометрія. К. : Наукова думка, 1979. 264 с.

321. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971.

322. Фу К. Структурные методы в распознавании образов. М.: Мир, 1977, С. 25-115.

323. Фитилев Л.М. Клиническая фонокардиография. М.: Медицина, 1968. 404 с.

324. Фодчук І.М., Баловсяк С.В. Діагностика поверхні твердого тіла. Загальний стан проблеми та X-променеві методи: навчальний посібник. Чернівці: Рута, 2007. 288 с.

325. Форсайт Д.А., Понс Дж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.

326. Фофанов П.Н. Учебное пособие по механокардиографии. Л.: ВМедА им. С.М. Кирова, 1977. 111 с.

327. Фролов Д.Н. Разработка структурных методов и системы автоматизированного анализа реограмм: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск. 1980.

328. Чапоров В.Н., Маркова К.Б. Фазовый анализ сердечной деятельности у человека в условиях ступенчатого повышения внутрилегочного давления. Вестник ТвГУ. Серия «Биология и экология». 2006. Вып. 2. С. 27-30.

329. Чирейкин Л.В., Шурыгин Д.Я., Лабутин В.К. Автоматический анализ электрокардиограмм. Л.: Медицина, 1977. 248 с.

330. Шакин В.В. Выбор адекватной математической модели для решения обратной задачи электрокардиографии. Новые направления в электрокардиографии: Труды 2-го Межд. симп. по электрокардиологии. Ереван, 1973. С. 46-47.

331. Шакин В.В. Вычислительная электрокардиография. М.: Наука, 1981. 166 с.

332. Шакин В.В. Кибернетические методы изучения электрокардиограмм. Радиоэлектроника в медицине: Научный обзор ВНИИ медицинской и медико-технической информации. М. 1966. Вып. 1. С. 3-35.
333. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. Пер. с англ. М.: БИНОМ, 2006. 752 с.
334. Шидловський А.А., Ковалко М.П., Вишневський І.М. та інші. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття: за ред. Шидловського А.А., Ковалко М.П. К.: УЕЗ, 2001. 400 с.
335. Шидловский А.К., Вагин Г.Я., Куренный Э.Г. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1992. 224 с.
336. Ширяев А. Н. Вероятность. М. : Наука, 1980. 576 с.
337. Шишкин С.Л. Исследование синхронности моментов резких изменений альфа-активности ЭЭГ человека: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.13. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Москва, 1997. 10 с.
338. Шумпетер Й. Теория экономического развития (Исследование предпринимательской прибыли, капитала, кредита, процента и цикла конъюнктуры). М. : Прогресс, 1982.
339. Яворский Б.И. Стохастическая модель ошибки обработки периодических сигналов в рекурсивных цифровых цепях. *Отбор и обработка информации*. 1989. Вып. 3 (79). С. 99-101.
340. Яворский И.Н. Статистический анализ векторных периодически коррелированных случайных процессов. *Отбор и передача информации*. Київ: Наукова думка, 1987. Вып. 76. С. 3-12.
341. Яворский И.Н. Статистический анализ поли- и почти периодически коррелированных случайных процессов. *Отбор и обработка информации*. Киев, 1989. Вып. 3 (79). С. 1-10.
342. Яворська Є.Б. Верифікація результатів спектрального аналізу ритмокардіограми. Міжнародний науково-технічний журнал "Оптико-електронні

інформаційно-енергетичні технології”. Вінниця, 2009. №1 (17). С. 119-121.

343. Яворська Є.Б. Математичні моделі та методи опрацювання ритмокардіосигналів для визначення характеристик серцевої ритміки з прогнозованою вірогідністю : автореферат дис... канд. наук: 01.05.02. Тернопіль, 2009. 18 с.

344. Яглом А. М. Корреляционная теория стационарных случайных функций. Л. : Гидрометеиздат, 1981. 280 с.

345. Яглом И.М. Математические структуры и математическое моделирование. М. : Сов. радио, 1980. 144 с.

346. Ahlstrom M.L., Tomhins W.J. Digital filters for real-time ECG signal processing using microprocessors. IEEE Trans. Biomed. Eng. 1985. V. 32. P. 708-713.

347. Akima H. A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures. ESSA Research Laboratories, Institute for Telecommunication Sciences, Boulder Journal of the ACM (JACM), 1970. Vol. 17 №4. P. 589-602.

348. Analysis of Multiple Cracking of Nanocoating as a Cyclic Random Process / I.V. Lytvynenko, S.A. Lupenko, and P.O. Marushchak. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2013, Vol. 49, No. 2, pp. 164-170.

349. Analysis of the State of the Modified Nanotitanium Surface with the Use of the Mathematical Model of a Cyclic Random Process / I.V. Lytvynenko, P.O. Marushchak. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, Vol. 51, No. 3, pp. 254-263.

350. Balda R.A., Diller G., et al. The HP ECG Analysis Program. Trends in Computer Processing Electocardiograms. North-Holland, Amsterdam, 1977, pp. 197-204.

351. Bemmell J.H. Van Past and future research goals for computerized ECG processing. "Comput. ECG Anal.: Towards Stand. Proc. IFIP - IMIA Work Cont., 2-5 June 1985". Amsterdam e.a., 1986. P. 367-381.

352. Bezdek J. C. Pattern Recognition With Fuzzy Objective Function Algorithms. NY: Plenum Press, 1981.

353. Bittanti S. Markovian representations of cyclostationary processes, in: L.

Gerencser, P.E. Caines (Eds.). S. Bittanti, F. Lorito, S. Strada. Topics in Stochastic Systems : Modelling, Estimation and Adaptive Control. Springer, Berlin, Germany. 1991. Vol. 161. P. 31-46.

354. Bohme O. Periodic Markow transition function I, II. Math. Nachr. 1982. 108. P. 231-239; 109. P. 47-56.

355. Burger H., Milaan J. Van. Measurements of the specific resistance of the human body to direct curent. Acta Med. Scan. 1943. Vol. 114. 584 p.

356. Caselles V., Kimmel R., Sapiro G. (1997). Geodesic active contours. International Journal of Computer Vision 22 (1): 1997. P. 61-79.

357. Chen S.-W., Chen H.-C., Chan H.-L. A real-time QRS detection method based on moving-averaging incorporating with wavelet denoising. Computer Methods and Programs in Biomedicine. Elsevier Inc., 2006. Vol. 82, pp. 187-195.

358. Chouhan V.S., Mehta S.S., Lingayat N.S. Delineation of QRS-complex, P and T-wave in 12-lead ECG. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. 2008. Vol. 8. P. 185-190.

359. Christov I.I. Real time electrocardiogram QRS detection using combined adaptive threshold [электронный ресурс]. BioMed. Eng. Online. 2004. Vol. 3. No. 28. 9 p. Режим доступа до журн. URL: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/3/1/28> (дата звернення: 24.09.2018)

360. De Chazazl P., Celler B. Automatic measurement of the QRS onset and offset in individual ECG leads. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 1996. Vol. 4. P. 1399-1403.

361. Dreifus L., Agarwal J., Botvinick E. Heart rate variability for risk stratification of life-threatening arrhythmias. J. Am. Coil. Cardiol. 1993. P. 948-950.

362. Duda R.O. Hart P.E. and Stork D.G. Pattern Classification. - 2nd ed. New York. NY:Wiley. 2001.

363. Dzung L. Pham, Chenyang Xu, and Jerry L. Prince (2000): «Current Methods in Medical Image Segmentation», Annual Review of Biomedical Engineering, Vol. 2, pp 315-337.

364. Ebadollah Kheirati Roonizi, Reza Sameni. Morphological modeling of

cardiac signals based on signal decomposition, *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 43, Issue 10, 2013. P. 1453-1461, <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2013.06.017>.

365. Fojt O., Holcik J. Applying nonlinear dynamics to ECG signal processing. Two approaches to describing ECG and HRV signals. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* 1998. vol. 17(2). P. 96-101.

366. Forcade Nicolas; Le Guyader Carole, Gout Christian (July 2008). Generalized fast marching method: applications to image segmentation. *Numerical Algorithms* 48 (1-3): P. 189-211. doi:10.1007/s11075-008-9183-x.

367. Gardner W.A., Archer T.L. Exploitation of cyclostationarity for identifying the Volterra kernels of non-linear systems. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1993. № 39 (2). P. 535-542.

368. Gardner W.A., Brown W.A. Fraction-of-time probability for time-series that exhibit cyclostationarity. *Signal Processing*. 1991. №23. P. 273-292.

369. Gardner W.A., Napolitano A., Paura L. Cyclostationarity: Half a century of research. *Signal Processing*. 2005. № 86 (2006). P. 639-697.

370. Gardner W.A. *Statistical Spectral Analysis : A Nonprobabilistic Theory*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.

371. Gardner W.A. Spectral correlation of modulated signals : Part I-Analog modulation. *IEEE Transactions on Communications*. 1987. №35 (6). P. 584-594.

372. Gardner W.A., Spooner C.M. Higher-order cyclostationarity. *International Symposium on Information Theory and Applications, ISITA '90, Honolulu, HI*. 1990. P. 355-358.

373. Gardner W.A., Spooner C.M. The cumulant theory of cyclostationary time-series. II. Development and applications. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 1994. № 42 (12). P. 3409-3429.

374. Gardner W.A., Brown W.A., Chen C.-K. Spectral correlation of modulated signals: Part II-Digital Modulation. *IEEE Transactions on Communications*. 1987. № 35 (6). P. 595-601.

375. Ghysels E. A time series model with Periodic Stochastic Regime Switching. Institute for Empirical Macroeconomics Federal Reserve Bank of Minneapolis Research Department. 1993. No. 84.
376. Ghysels E., McCulloch R.E., Tsay R.S. Bayesian Inference for a General Class of Periodic Markov Switching Models. 1993.
377. Ghysels E. On the Periodic Structure of the Business Cycle. Cowles Foundation, Yale University. 1992. No. 1028.
378. Goldberg D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1989.
379. Gonzalez R. Woods Digital Image Processing. Second Edition. Prentice Hall, 2002. 793 p.
380. Gowda, K. C., Krishna, G. Agglomerative clustering using the concept of mutual nearest neighborhood. *Pattern Recognition*, 1977. V. 10. P. 105-112.
381. Gritzali F., Frangakis G., Papakonstantinou G. Detection of the P and T waves in an ECG. *Comput. Biomed. Res.* 1976. V. 9. P. 125-132.
382. Hamilton P.S., Tompkins W.J. Quantitative investigation of QRS detection rules using the MIT/BIH Arrhythmia database. *IEEE Transactions on Biomed. Eng.*, 1986. Vol. 33. pp. 1157-1165.
383. Hansen L.P., Sargent T.J. Seasonality and Approximation Errors in Rational Expectations Models. *Journal of Econometrics*. 1993. P. 21-56.
384. Harmuth H. Transmission of Information by Orthogonal Functions. New York, Heidelberg, Berlin : Springer, 1972. Edition 2.
385. Harris F. On the use of windows for harmonic analysis with the Discrete Fourier Transform. *IEEE Proc.* 1978. P. 51-83.
386. Hengeveld S.J. and van Bommel J.H. Computer detection of P waves. *Comput. Biomed. Res.* 1976. V.9. P. 125-132.
387. Horkunenko A., Lytvynenko I., Sverstyuk A., Lupenko S. Software complex for modeling and processing of synchronously registered cardiosignals. Projekt interdyscyplinary projektem XXI wieku, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biala, 2017. T. 2. P. 126-130.

388. Hossein M., Shankar R., Allen Y, Shankar S.; Yi Ma (2011-04-08). Segmentation of Natural Images by Texture and Boundary Compression. *International Journal of Computer Vision* (en) 95 (1). P. 86-98. doi:10.1007/s11263-011-0444-0.
389. Hurd H.L. An investigation of periodically correlated stochastic processes: dissert. Ph. D. Duke University, Durham, NC, 1969.
390. Hurd H.L., Miamee A. G. Periodically Correlated Random Sequences: Spectral Theory and Practice. Wiley, New York, 2006.
391. Ignatovich S.R. Statistical nature of plastic deformation. *Strength of Materials*, 1996, Vol. 28, N 4, P. 317-323.
392. Ignatovich S.R., Menou A., Karuskevich M.V., Maruschak P.O. Fatigue damage and sensor development for aircraft structural health monitoring. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2013. Vol. 65. P. 23-27.
393. Israa Shaker Tawfic, Sema Koc Kayhan. Improving recovery of ECG signal with deterministic guarantees using split signal for multiple supports of matching pursuit (SS-MSMP) algorithm, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 139, 2017. P. 39-50, <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.10.014>.
394. Jain A. K., Mao Artificial neural networks: A tutorial. *IEEE Computer*, 1996. V. 29. P. 31-44.
395. Jianbo Shi and Jitendra Malik (2000): «Normalized Cuts and Image Segmentation», *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2000. Vol. 22, No. 8. pp. 888-905.
396. John Semmlow. Chapter 10 - Stochastic, Nonstationary, and Nonlinear Systems and Signals, Editor(s): John Semmlow, *In Biomedical Engineering, Circuits, Signals and Systems for Bioengineers (Third Edition)*, Academic Press, 2018. P. 449-489, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809395-5.00010-2>.
397. Juglar C. Des Crises commerciales et leur retour periodique en France. en Angleterre, et aux Etats–Unis. Paris, 1862. P. 276.
398. Kaoumi D., Adamson J. Self-ordered defect structures in two model F/M steels under in situ ion irradiation. *Journal of Nuclear Materials*. 2014. Vol. 448. P. 233-

238.

399. Kaplan D. The analysis of variability. *Cardiovasc J. Electro-physiol.* 1994. P. 16-19.

400. Kaufman W., Johnston. The electrical conductivity of the tissues near the heart and its bearing on the distribution of cardiac action currents. *Amer. Heart J.* 1955. Vol. 26. 243 p.

401. Kayatskas A. A. Periodically correlated random processes. *Telecommun. Radio Eng.* 1968. No. 23 (Part 2). P. 136-141.

402. Kerr T.H. Real-Time Failure Detection: A Nonlinear Optimization Problem That Yields a Two-Ellipsoid Overlap Test. *Journal Of Optimization Theory And Applications.* 1977. Vol. 22, №4. P. 509-536.

403. Khaled Daqrouq QRS Complex Detection Based on Symmlets Wavelet Function / Khaled Daqrouq, Ibrahim N. AbuIsbeih, Abdel-Rahman Al-Qawasmi. 5th International MultiConference on Systems, Signals and Devices. 2008.

404. Kochel P. Periodically stationary Markovian decision models. *Elektron. Informationsverarb. Kybernet.* 1980. No. 16. P. 553-567 (in German).

405. Kohonen T. *Self-Organization and Associative Memory* - 3rd ed. Springer information sciences series. Springer-Verlag, New York, NY. 1989.

406. Kuropiatnyk D. I. Actuality of the problem of parametric identification of a mathematical model *Computer Science & Software Engineering : Proceedings of the 1st Student Workshop (CS&SE@SW 2018)*, Kryvyi Rih, Ukraine, November 30, 2018. pp. 70-75.

407. Kuznets S. *Secular Movements in Production and Prices. Their Nature and their Bearing upon Cyclical Fluctuations.* Boston : Houghton Mifflin, 1930.

408. Laguna P., Jane R., Caminal P. Automatic detection of wave boundaries in multilead ECG signals. *Computers and Biomedical Research.* 1994. Vol. 27. P. 45-60.

409. Leo Grady (2006): «Random Walks for Image Segmentation», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006. Vol. 28, No. 11. pp. 1768-1783.

410. Leo Grady and Eric L. Schwartz (2006): «Isoperimetric Graph Partitioning

for Image Segmentation», IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006. Vol. 28. No. 3. pp. 469-475.

411. Li C., Zheng C., Tai C. Detection of ECG characteristic points using the wavelet transform. IEEE Trans. Biomed. Eng., 1995. Vol. 42. pp. 21-28.

412. Linda G. Shapiro and George C. Stockman (2001): «Computer Vision», New Jersey, Prentice-Hall. 2001. pp 279-325.

413. Lynvynenko I., Maruschak P. Use of stochastic methods for treatment of cyclic random processes of multiple cracking. *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science*, (TCSET-2012) : XI International Conference, Lviv–Slavske, February 21-24, 2012. Lviv–Slavske, Ukraine 2012. P. 59.

414. Lytvynenko I., Maruschak P., Lupenko S., Panin S. Segmentation and Statistical Processing of Geometric and Spatial Data on Self-Organized Surface Relief of Statically Deformed Aluminum Alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 770. pp. 288-293.

415. Lytvynenko I.V. Method of segmentation of determined cyclic signals for the problems related to their processing and modeling. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. 2017. Vol. 88, No. 4. pp. 153-169.

416. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Lupenko S.A., Popovych P.V. Modeling of the Ordered Surface Topography of Statically Deformed Aluminum Alloy *Materials Science*, 2016, Vol. 52. No. 1. pp. 113-122.

417. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Lupenko S.A., Hats Yu. I, Menou A., Panin S.V. Software for segmentation, statistical analysis and modeling of surface ordered structures. *Proceedings of the 10th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures*. AIP Publishing, 2016, Vol. 1785. No.1. pp. 030012-1-030012-7.

418. Lytvynenko I.V. The problem of segmentation of the cyclic random process with a segmental structure and the approaches to its solving. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing*. 2016, Vol. 3, No. 1, pp. 30-37.

419. Lytvynenko I.V. Method of the quadratic interpolation of the discrete

rhythm function of the cyclical signal with a defined segment structure. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. 2016, Vol. 84, No. 4, pp. 131-138.

420. Lytvynenko I.V. Method of evaluating the rhythm structure of a cyclic signal through defining the additional countdowns of the discrete function of rhythm. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing*. 2018, Vol. 5, No. 1, pp. 32-38.

421. Lynvynenko I. Approaches to the evaluation of the rhythm function of cyclic signals and processes. *Problems of decision making under uncertainties*, (PDMU-2012) : XIX International Conference, Mukachevo, April 23-27, 2012. Mukachevo, Ukraine 2012. P. 146.

422. Lytvynenko I., Maruschak P. Simulation of the process of self-organization of modified nanotitan surface using a mathematical apparatus for processing cyclic functions. *Problems of decision making under uncertainties*, (PDMU-2013) : XXI International Conference, Skhidnytsia, May 13-17, 2013. Skhidnytsia, Ukraine 2013. P. 160-161.

423. Lytvynenko I.V., Marushak P.O., Lupenko S.A., Hats Yu.I., Menou A. Software tools for the analysis of the self-organizing material surface after deformation for the problems of its sementation and statistical processing. Proc. of International Symposium Aircraft materials, (ACMA-2016). May 11-13. 2016. Agadir, Morocco 2016. P. 138-139.

424. Lytvynenko I., Maruschak P., Prentkovskis O., Soroachak A. Modelling Kinetics of Dynamic Crack Propagation in a Gas Mains Pipe as Cyclic Random Process. *International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication*, 2017, Springer, pp. 262-269.

425. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Panin S.V., Soroachak A.P. Analysis of Fracture Characteristic of a Gas Main Pipe on the Basis of the Additive Mathematical Model of the Cyclic Random Process and Polynomial Function. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, Vol. 115, No. 1, pp. 012047.

426. Lytvynenko I.V. The method of segmentation of stochastic cyclic signals for the problems of their processing and modeling. *Journal of Hydrocarbon Power*

Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing. 2017, Vol. 4, No. 2, pp. 93-103.

427. Lytvynenko I.V., Lupenko S.A., Maruschak P.O., Panin S.V., Hats Yu.I. Diagnostic features of relief formations on the nanostructured titanium VT1-0 surface after laser shock-wave treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, pp. 1-6.

428. Lytvynenko I., Maruschak P., Menou A. Using mathematical model of cyclic random process for diagnostics of nanotitanium surface condition after high-energy treatment. Proc. of International Symposium on Operational Research and Applications, (ISORAP-2013), May 8-10. 2013. Marrakech, Morocco 2013. P. 678-684.

429. Manisha Bhagwat, R. K. Krishna & Vivek Pise: «GSimplified Watershed Transformation», *International Journal of Computer Science & Communication*, Vol. 1, No. 1, January-June 2010, pp. 175-177.

430. Maruschak P., Okipnyi I., Poberezhny L., Lytvynenko I. Assessment of damageability of a surface with multiple defects. *Materials and Metallurgy*, (SHMD-2012) : 10-th International Symposium of Croatian Metallurgical Society, Shibenk, June 17-21, 2012. Shibenk, Croatia 2012. P. 401.

431. Maruschak P.O., Panin S.V., Ignatovich S.R., Zakiev I.M., Konovalenko I.V., Lytvynenko I.V., Sergeev V.P. Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2012. Vol. 57. P. 43-48.

432. Maass W., Sontag E.D. Neural Systems as Nonlinear Filters. *Neural Computation*. 2000. No 12. P. 1743-1772.

433. Mahoudeaux P.M. et al. Simple microprocessor-based system for on-line ECG analysis. *Med. Bio. Eng. Comput.*, 1981. Vol. 19, pp.497-500.

434. Malik M., Xia R., Odemuyiwa O. Influence of the recognition artefact in the automatic analysis of long-term electrocardiograms on time-domain measurement of heart rate variability. *Med. Biol. Eng. Comput.* 1993. P. 539-544.

435. Martinez J.P., Almeida R., Laguna P. A wavelet-based ECG delineator: evaluation on standard databases. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2004. Vol. 51. P. 570-581.

436. Marian Gidea, Claudia Gidea, William Byrd. Deterministic models for simulating electrocardiographic signals, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 16, Issue 10, 2011. P. 3871-3880, <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2011.01.022>.
437. Micheli-Tzanarou E. *Supervised and Unsupervised Pattern Recognition*. Boca Raton. FL.: CRC Press, 2000.
438. McKusick V.A., Talbot S.A., Webb G.N. Spectral phonocardiography: problems and prospects in application of bell sound spectrograph to phonocardiography. *Johns Hork. Hops*. 1954. P. 187-198.
439. Menrad A. et al. Dual microprocessorsystem for cardiovascular data acquisition, processing and recording. *Proc. 1981 IEEE int. conf. Elect. Contr. Instrument*, pp. 64-69.
440. Murthy I.S., Rangaraj M.R. New concepts for PVC detection. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1979. V. 26, No. 7. P. 409-416.
441. Nematollahi A.R., Soltani A.R. Discrete time periodically correlated Markov processes. *Probability and Mathematical Statistics*. 2000. No. 20 (1). P. 127-140.
442. Nadler J., Robbins N.B. Some characteristics of page's two-sided procedure for detecting a change in a location parameter. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1971. Vol. 42, №2. P. 231-238.
443. Ogura H. Spectral representation of a periodic nonstationary random process. *IEEE Trans. on Inf. Th.* 1971. IT-17, 2. P. 143-149.
444. Osher S. and Paragios N. *Geometric Level Set Methods in Imaging Vision and Graphics*, Springer Verlag. 2003.
445. Pan J., Tomhins W.J. A real-time QRS detection algorithm. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1985. V. 32. P. 230-236.
446. Processing and modeling of ordered relief at the surface of heat-resistant steels after laser irradiation as a cyclic random process / I.V. Lytvynenko, P.O. Maruschak, S.A. Lupenko. *Automatic Control and Computer Science*, 2014, Vol. 48, No. 1, pp. 1-9.
447. Rajeswari J., Jagannath M. Advances in biomedical signal and image

processing – A systematic review, *Informatics in Medicine Unlocked*, Vol. 8, 2017. P. 13-19, <https://doi.org/10.1016/j.imu.2017.04.002>.

448. Riccardo Barbieri, Emery N. Brown. Application of dynamic point process models to cardiovascular control, *Biosystems*, Vol. 93, Issues 1–2, 2008, P. 120-125, <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2008.03.011>.

449. Ron Ohlander, Keith Price, and D. Raj Reddy (1978): «Picture Segmentation Using a Recursive Region Splitting Method», *Computer Graphics and Image Processing*, 1978. Vol. 8, pp 313-333.

450. Sahambi J.S., Tandon S.B. Using wavelet transform for ECG characterization. *IEEE Engineering in Medicine and Biology*. 2000. Vol. 9. P. 1532-1546.

451. Sandeep Raj, Kailash Chandra Ray. Sparse representation of ECG signals for automated recognition of cardiac arrhythmias, *Expert Systems with Applications*, Vol. 105, 2018. P. 49-64, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.03.038>.

452. Santanu Sahoo, Prativa Biswal, Tejaswini Das, Sukanta Sabut. De-noising of ECG Signal and QRS Detection Using Hilbert Transform and Adaptive Thresholding, *Procedia Technology*, Vol. 25, 2016. P. 68-75, <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.082>.

453. Segen J., Sanderson A.C. Detecting Change In a Time-Series. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1980. Vol. IT-26, №2. P. 249-255.

454. Shankar R., Hossein M., Allen Y., Shankar S. and Yi Ma Natural Image Segmentation with Adaptive Texture and Boundary Encoding, *Proceedings of the Asian Conference on Computer Vision (ACCV) 2009*, H. Zha, R.-i. Taniguchi, and S. Maybank (Eds.), Part I, LNCS 5994, Springer, pp. 135-146.

455. Schurmann J. *Pattern Classification – A unified view of statistical and neural approaches*. New York. NY:Wiley. 1996.

456. Sonka M., Hlavak V., Boyle R. *Image processing, analysis, and machine vision*. California (USA): Cole Publishing Company, 1999. 770 p.

457. Talmon J.L., Van Bemmelen J.H. Template wave-form recognition revisited. Results of CSE database. *Proc. of Comput. Cardiol. 10-th Annu. meet. Aachen., Okt.*,

1983. Los Angeles. Calif., 1983. P. 246-252.

458. Todd R. M. Periodic linear-quadratic models of seasonality. *J. Econom. Dyn. Control* 14. 1990. Vol. 14, № 3-4. P. 763-796.

459. Vitec M.A. Hrubes J., Kozumplik J. wavelet-based ECG delineation in Multilead ECG signals: Evaluation on the CSE Database. *IFMBE Proceedings*. 2009. Vol.25. P. 177-180.

460. Vorob'ev S.A. Algorithms for Identification and Classification of Repeating Fragments on Experimental Curves. *Automation and Remote Control*. New York, USA, 1986. V. 46. №. 8. Part 2. P. 1003-1006.

461. Wang J., Guo C. Ultrafast dynamics of femtosecond laser-induced periodic surface pattern formation on metals. *Appl. Phys. Lett.* 2015. 87, 251914 (2005). <https://doi.org/10.1063/1.2146067>.

462. Wartak J., Milliken J.A., Karchmar J. Computer program for pattern recognition of electrocardiograms. *Comput. Biomed. Res.* 1970. Vol.3, № 4. P. 344-374.

463. Willsky A.S., Jones H.L. A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear systems. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1976. Vol. 21, № 1. P. 108-112.

464. Witkin A.P. Scale-space filtering, *Proc. 8th Int. Joint Conf. Art. Intell.*, Karlsruhe, Germany, 1983. pp. 1019-1022.

465. Witkin A. Scale-space filtering: A new approach to multi-scale description, in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing (ICASSP)*, Vol. 9, San Diego, CA, Mar. 1984, pp. 150-153.

466. Wortzman D. et al. A hybrid system for measurement and interpretation of electrocardiograms. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1968. Vol. 128. P. 875.

467. Wu Z. and Leahy R. (1993): «An optimal graph theoretic approach to data clustering: Theory and its application to image segmentation», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1993. Vol. 15, No. 11. pp. 1101-1113.

468. Xue Q., Hu Y.H., Tompkins W.J. Neural-network-based adaptive matched filtering for QRS detection. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1992. Vol. 39(4). pp. 317-329.

469. Xunde Dong, Cong Wang, Wenjie Si. ECG beat classification via deterministic learning, *Neurocomputing*, Vol. 240, 2017. P. 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.02.056>.

470. Yakovlev V.G., Vorob'yov S.A. Estimation of model parameters of random processes with instantly changing properties. Preprints of the Second IFAC Symposium on Stochastic control. Vilnius, USSR, 1986. Part 2. P. 224-228.

471. Zahn C.T. Graph-theoretical methods for detecting and describing gestalt clusters. *IEEE Trans. Comput.* 1971. Vol. 20. P. 68-86.

472. Zakyntinaki M.S., Stirling J.R., Stochastic optimization for modeling physiological time series: application to the heart rate response to exercise, *Computer Physics Communications*, Vol. 176, Issue 2, 2007. P. 98-108, <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2006.08.005>.

Додаток А

Системи відбору (системи відведень) та діагностичні зони електрокардіосигналу. Фрагменти електрокардіосигналів, які відповідають певним патологіям. Відомості про циклічні кардіосигнали, зокрема, магнітокардіосигнал, реокардіосигнал, фонокардіосигнал, синхронно зареєстровані кардіосигнали (полікардіосигнали) в автоматизованих комп'ютерних магнітокардіодіагностичних системах, існуючі методи їх дослідження та діагностичні ознаки

А.1. Системи відбору (системи відведень) електрокардіосигналу.

Для реєстрації ЕКС найчастіше використовується неінвазивний відбір [1, 185]. При цьому електроди (давачі, які дозволяють відбирати електричні сигнали, що генеруються серцем людини) певним чином накладаються на відповідні ділянки тіла. Залежно від способу розміщення електродів на поверхні тіла, розрізняють такі типи основних електрокардіографічних відведень [1, 76, 136, 197, 329]: кінцеві-біполярні (I, II, III) за Ейтховеном; уніполярні кінцеві (VR, VL, VF) за Вільсоном; уніполярні відведення (aVR, aVL, aVF), підсилені за Гольдбергом; уніполярні грудні відведення (V₁, V₂, V₃, V₄, V₅, V₆).

Найпоширенішою системою відведень вважається стандартна система з 12 відведень (три кінцеві-біполярні (I, II, III), шість уніполярних грудних відведень (V₁, V₂, V₃, V₄, V₅, V₆) та уніполярні кінцеві відведення (aVR, aVL, aVF), підсилені за Гольдбергом. У кардіохірургічній практиці використовуються інтракардіальні відведення, що дозволяють точніше оцінити електричну активність передсердь та шлуночків. Як доповнюючий метод до електрокардіографії, значного поширення набула векторкардіографія [222, 256, 303]. До так званих ортогональних векторкардіографічних систем належать 7-електродна система Франка, 14-електродна система SVEC III, 7-електродна система Хелма і 11-електродна аксіальна система [222]. Крім вищеперерахованих систем відведень, розрізняють ще додаткові: система Неба та система Мак Фи-Пурангао. Система відведень Неба містить електроди трьох стандартних відведень. Комбінуючи позиції двох з

них, отримують відведення: А, D, І. Зафіксований ЕКС у таких відведеннях розглядають як топографічне зображення потенціалів від трьох поверхонь серця: передньої А, задньої D, нижньої І. В системі Мак Фи-Пурангао використовуються дев'ять електродів, що формують три відведення, які дозволяють зареєструвати ЕКС по трьох просторових взаємоперпендикулярних осях, точка перетину яких розташована над областю анатомічного центра ваги шлуночків серця [76, 136]. Останні перелічені системи відведень використовуються для отримання додаткової та уточнюючої діагностичної інформації під час діагностики стану серцево-судинної системи людини.

А.2. Діагностичні зони електрокардіосигналу

До типових загальноприйнятих діагностичних зон ЕКС [185] відносять зону Р відповідає електричним потенціалам, які викликані при збудженні (деполяризації) передсердь. Комплекс діагностичних зон QRST, свідчить про збудження шлуночків. Комплекс QRS характеризує початок збудження шлуночків, а діагностична зона Т – його закінчення. Діагностична зона між зонами Р і Q відображає час, необхідний для проведення збудження від передсердь до шлуночків. Ця діагностична зона в більшості випадків характеризується електричним спокоєм серця так само, як і діагностична зона між зонами Т і Р (наступного циклу) [185]. Зона Q відображає деполяризацію перетинки між шлуночками (у деяких пацієнтів ця хвиля відсутня), вона залежить від геометричного положення серця. Зона R – відображає деполяризацію передньої, задньої та бокових стінок шлуночків. При певній патології QRS комплекс може бути поліфазний [185], тобто на реалізації ЕКС спостерігаються дві, три R та S зони. В такому випадку, в лікарській практиці, їх позначають «R'», «R''», «S'», «S''» [185]. Діагностичні зони R малої амплітуди (ознака патології) позначають малою літерою «г». Цей вид патології може бути пов'язаний з несерцевими хворобами, наприклад, хворобами легень. Існують патологічні ознаки, коли зона R зникає, тоді такий комплекс позначають QS. Тривалість діагностичних зон PR показує час проходження сигналу Гісовим пучком. Тривалість зон ST відповідає

часу закінчення деполяризації шлуночків та початку їх повільної реполяризації. За відсутності патології діагностична зона S всюди ізоелектрична, тобто знаходиться нижче ізопотенціальної лінії. За наявності патології зона S може не спостерігатися на реалізації сигналу. Діагностична зона T відповідає швидкій реполяризації шлуночків. Амплітуда цієї зони значно пов'язана з амплітудою зони R. За наявності патології діагностична зона T може бути як нижче, так і вище ізопотенціальної лінії (монофазна чи двофазна), зазначено у роботі [185]. Діагностична зона U не часто спостерігається на ЕКС. Ряд фахівців відзначають утворення зубця U під впливом патології. Але на даний час чіткого підтвердження цих спостережень не зафіксовано, тому генезис цієї зони залишається невідомим [268]. Діагностична зона між T і P (наступного циклу) відповідає електричній діастолі серця, тобто інтервалу часу електричного спокою серця [185].

А.3. Фрагменти електрокардіосигналів, форма сегментів (діагностичних зон) яких відповідає певним патологіям

Форми сегментів, діагностичних зон серцевих циклів ЕКС містять діагностичні ознаки (морфологічні характеристики), які відповідають певному функціональному стану серця пацієнта [185].

1. Пошкодження серця. Пошкодження ділянок серця внаслідок ішемії, зумовленої звуженням або оклюзією коронарних артерій, що постачають серце кров'ю, призводять до зміни кліткових потенціалів дії й поширення імпульсів [1, 268].

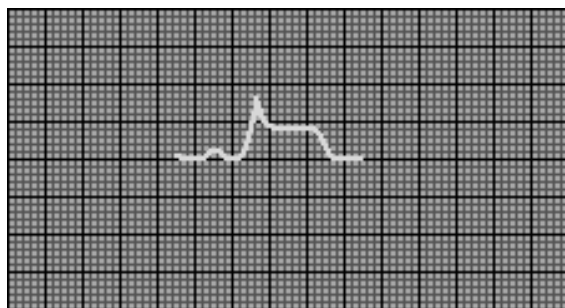


Рис. А.1. Фрагмент реалізації ЕКС, що відповідає пошкодженню серця (зміщення сегмента ST (вверх) – субепікардіальне ураження)

Пошкодження можуть бути короткочасними і зворотними (наприклад, при

фізичних навантаженнях або на ранніх стадіях інфаркту міокарда) або можуть через кілька годин набути стійкого характеру. Прикладом змін в ЕКС є зсув відносно ізопотенціальної лінії сегмента ST, ділянки ЕКС з кінця комплексу QRS до початку зони Т. Приклади таких ЕКС зображені на рисунках А.1, А.2.

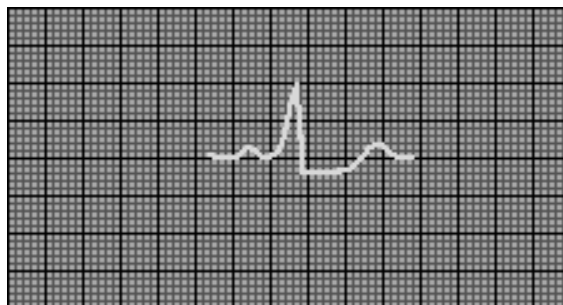


Рис. А.2. Фрагмент реалізації ЕКС, що відповідає пошкодженню серця (зміщення сегмента ST (вниз) – субендокардіальне ураження)

2. Збільшення розмірів серця. Зміна форми або положення серця може призводити до значних змін у формі ЕКС. Особливе значення має розширення або гіпертрофія однієї або кількох камер серця. В цьому випадку збільшуються розміри порожнин передсердь або шлуночків, потовщуються стінки серця. Такі зміни відображаються на реалізації ЕКС, приклади зображені на рисунках А.3, А.4.

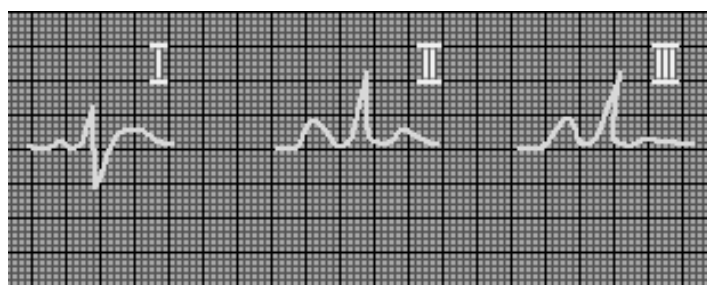


Рис. А.3. Фрагменти реалізацій ЕКС в I, II, III – відведеннях, що відповідають збільшенню розмірів серця (гіпертрофія правого передсердя)

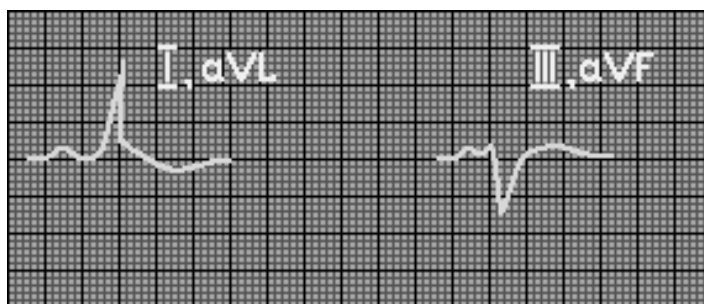


Рис. А.4. Фрагменти реалізацій ЕКС в I, II, aVL, aVF – відведеннях, що відповідають збільшенню розмірів серця (гіпертрофія лівого шлуночка)

3. Порушення провідності серця. Пошкодження будь-яких структур, що входять у провідникову систему серця, або виникнення патологічних додаткових шляхів поширення імпульсу призводять до зміни поширення збудження і часових характеристик реполяризації. В такому випадку спостерігається зниження швидкості провідності або блокади імпульсів – рисунки А.5, А.6.

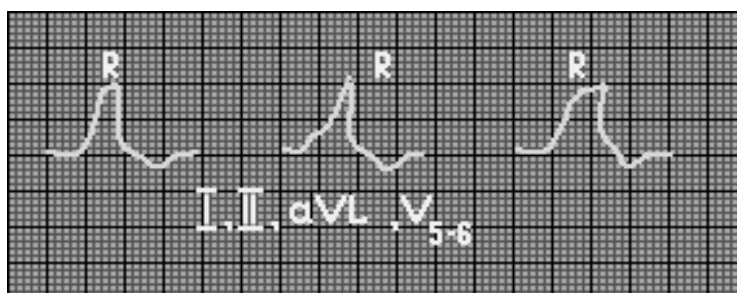


Рис. А.5. Фрагменти реалізацій ЕКС в I, II, aVL – відведеннях, що відповідають порушенню провідності серця (блокада лівої ніжки пучка Гіса)

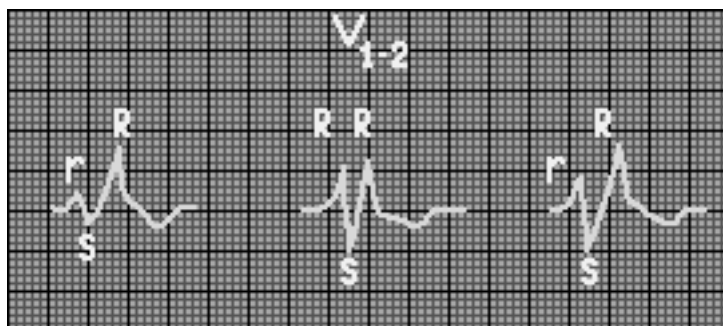


Рис. А.6. Фрагменти реалізацій ЕКС, що відповідають порушенню провідності серця (блокада правої ніжки пучка Гіса)

4. Іонні ефекти. Потенціали дії клітин серця залежать від позаклітинних

концентрацій таких іонів, як калій та кальцій, а також від присутності деяких кардіотропних препаратів, наприклад, дигіталіса. Ненормальні рівні цих речовин можуть впливати на електричну активність серця і проявлятися у вигляді зміни форм ЕКС. На рисунку А.7 наведено приклад фрагмента такої реалізації ЕКС.

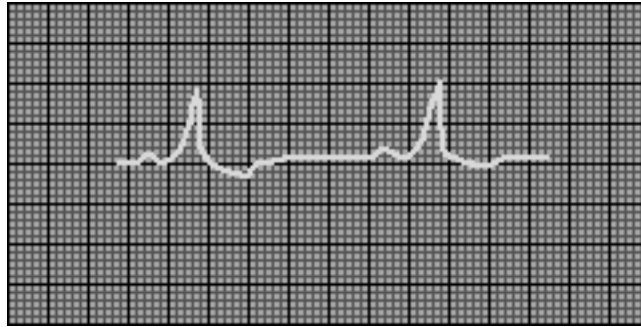


Рис. А.7. Фрагмент реалізації ЕКС, що відповідає іонним ефектам серця (синдром дигіталізації)

5. Ритм. Інформація про частоту серцевих скорочень (тривалості діагностичних сегментів) є дуже важливою діагностичною інформацією. Першочерговим інтересом є відомості про зниження (брадикардія) або підвищення (тахікардія) частоти, співпадіння або неспівпадіння частоти роботи шлуночків і передсердь, регулярність ритму, виникнення його порушень у передсердях чи шлуночках. Класифікація таких патологій серцевих аритмій налічує понад 40 показників.

А.4. Магнітокардіосигнал. Автоматизовані комп'ютерні магнітокардіодіагностичні системи, існуючі методи дослідження магнітокардіосигналів та діагностичні ознаки

Магнітокардіосигнал – це циклічний сигнал, який відображає зміну модуля магнітної індукції, магнітного поля серця у часі. На рисунку А.8 наведено типовий зареєстрований магнітокардіосигнал (МКС) з позначеннями меж циклів пунктирними лініями.

Серед багатьох систем, які дозволяють фіксувати й аналізувати МКС, слід назвати сучасний магнітокардіограф «MFI Apollo CXS» фірми «BMD Systems

GmbH».

Суть магнітокардіографічного методу полягає у вимірюванні магнітного поля серця людини і дає додаткові діагностичні відомості щодо його стану [1, 27, 222]. У таких системах використовуються дві або чотири котушки. Використання систем з чотирма котушками суттєво знижує рівень магнітних шумів. Сучасні давачі таких систем, виготовлені на основі магнітометрів, які мають низький рівень власних шумів, для реєстрації магнітного поля серця дозволили отримати МКС з такою ж роздільною здатністю, як і ЕКС.

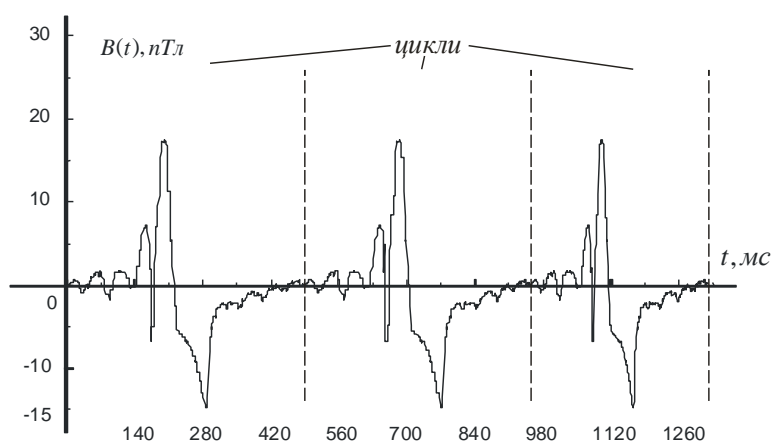


Рис. А.8. Реалізація циклічного сигналу (магнітокардіосигнал)

При проведенні діагностики за зареєстрованим МКС, як правило, використовують аналогічні методи опрацювання такі ж, як і для ЕКС [1]. У кожному циклі МКС виділяють характерні ділянки – хвилі та зубці (діагностичні сегменти, зони), які позначаються за аналогією із позначенням діагностичних зон ЕКС. При проведенні діагностики, використовуючи детермінований підхід, аналізують діагностичні ознаки: тривалості зон, їх амплітуди, площі під зубцями, характер крутизни певних ділянок МКС та інші. Для виявлення діагностичних сегментів (зон) в процедурах сегментації під час опрацювання МКС використовують значення першої та другої похідних. Приклад МКС з позначеннями діагностичних сегментів (зон P, Q, R, S, T) наведено на рисунку А.9., [1].

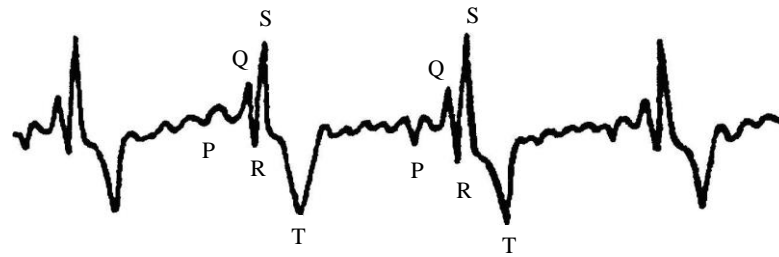


Рис. А.9. Схематичне зображення МКС та позначення діагностичних сегментів

Оскільки при опрацюванні МКС використовують подібні методи, зокрема методи сегментації, як і при опрацюванні ЕКС, тому тут так само виникають подібні труднощі їх сегментації (визначенням меж діагностичних сегментів), які внаслідок різноманітної їхньої структури ускладнюють побудову комп'ютерних алгоритмів автоматизованого опрацювання циклічних МКС.

А.5. Реокардіосигнал. Автоматизовані комп'ютерні реокардіодіагностичні системи, існуючі методи дослідження реокардіосигналів та діагностичні ознаки

До сучасних діагностичних систем, які дозволяють реєструвати та аналізувати реокардіосигнали, належать: «ВАЛЕНТА РЕО», «МИЦАР-РЕО», «РЕАН-ПОЛИ», «РГПА-6», «РЕОКОМ STANDARD», «СФЕРА-4» та багато інших. Аналіз реокардіосигналу (РКС) дозволяє досліджувати таку функцію серця, як кровопостачання органів і полягає в реєстрації коливань імпедансу, тобто повного (омічного та ємнісного) опору при змінному струмові високої частоти, пов'язаного зі змінами кровонаповнення досліджуваних ділянок тіла [44, 101, 108, 240, 248, 292, 312, 326, 327]. Метод дослідження ґрунтується на встановленій А. А. Кедровим пропорційній залежності між змінами імпедансу відносно його вихідної величини опору імпедансу і приростом об'єму крові відносно вихідного об'єму за рахунок кровонаповнення досліджуваної частини тіла.

Реєструють РКС використовуючи спеціальні прилади – реографи, виконані, як правило, у вигляді додаткових блоків до багатоканальних реєструвальних

пристроїв (поліграфів, електрокардіографів тощо). Основними елементами реографа [145, 146, 292] є генератор струму високої частоти (не менше 30 кГц), який подається через струмовий електрод до досліджуваної ділянки тіла; перетворювач “імпеданс – напруга”, що з’єднується з досліджуваною ділянкою тіла електродом; детектором; підсилювачем сигналів; датчиком-перетворювачем; пристроєм, що калібрує, зі стандартними опорами (0,05; 0,1; 0,2 Ом), що включаються дискретно в електричне коло [292].

Приклад типового реокардіосигналу наведено на рисунку А.10 з позначеннями меж циклів сигналу – пунктирна лінія.

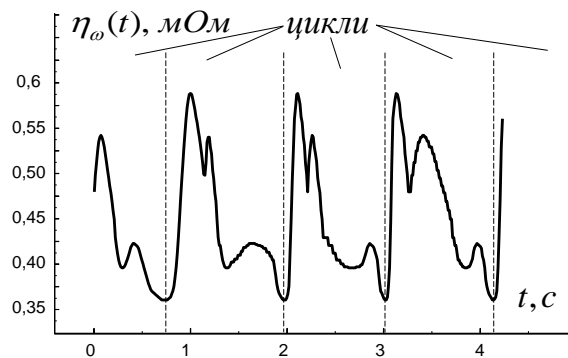


Рис. А.10. Реалізація циклічного сигналу (реокардіосигнал)

Даний метод дослідження дає можливість вивчати силу скорочення серцевого м’яза (міокарда), проводити аналіз скорочень шлуночків серця, а також характеризувати стан кровонаповнення судинної системи, практично в усіх органах (головному мозку, легенях, печінці, нирках, кінцівках тощо). Реографічне дослідження включає в себе синхронний запис основного та диференційного РКС, які схематично наведено на рисунку А.11 з позначеннями типових діагностичних сегментів (хвиль).

Відомо, що аналіз РКС включає якісне й кількісне оцінювання окремих діагностичних сегментів (хвиль), (див. рис. А.11). При якісному оцінюванні РКС враховують регулярність кривої, крутість анакроти, характер вершин, форму катакроти, кількість і чіткість додаткових хвиль. З клінічної практики відомо, що крива вважається регулярною, якщо кожна наступна хвиля схожа на попередню.

При патології – аритмії регулярність хвиль порушується: чим довша діастола, тим вища амплітуда наступної за нею хвилі РКС. При кількісній характеристиці РКС проводять вимірювання амплітуд окремих ділянок діагностичних сегментів (хвиль), (при коливаннях амплітуди розраховують її середнє значення з 5–10 хвиль) і тривалостей кількох інтервалів [146, 292].

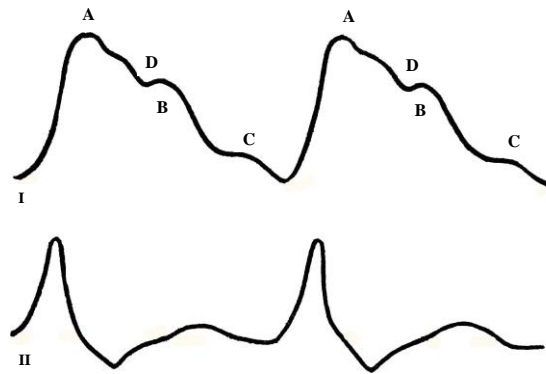


Рис. А.11. Схематичне зображення РКС, основний (I) і диференційний (II, похідна від основного) з позначеннями діагностичних хвиль (сегментів): А – систолічна хвиля, D – інцизура, В – дикротична хвиля, С – діастолічна хвиля

До основних діагностичних ознак РКС відносяться: амплітуди, тривалості та моменти початку інцизури «D», дикротичної та діастолічної хвиль «B», «C», період вигнання крові, кути нахилу характерних хвиль кривих, крутизна підйому та спаду хвиль, а також деякі комплексні показники (величина серцевого викиду крові, ударний об'єм серця), що обчислюються на основі простіших характерних ознак форми РКС [145, 146, 292].

Завдяки синхронності реєстрації основного і диференційного РКС з'являється можливість встановити такі діагностично важливі показники, як амплітуда систолічної хвилі з двома компонентами, які характеризують відповідно величини кровонаповнення судин великого і малого діаметра, а також час їх кровонаповнення, тривалість анакроти, що складається з двох інтервалів, який залежить від опору судин. За наявності синхронно зареєстрованого ЕКС інтервал від зубця «Q» ЕКС до точки «D» на РКС вказує на час поширення хвилі від серця до місця реєстрації РКС [130, 292].

Для задач аналізу та діагностування за зареєстрованими РКС також важливо точно та достовірно визначати межі діагностичних сегментів (хвиль) «А», «В», «С», «D» методами сегментації. А оскільки структура такого циклічного сигналу, в більшості випадків, нерегулярна (змінюються як амплітуди, так і тривалості хвиль), тому це також ускладнює побудову алгоритмів його автоматизованого опрацювання, зокрема алгоритмів сегментації.

А.6. Фонокардіосигнал. Автоматизовані комп'ютерні фонокардіодіагностичні системи, існуючі методи дослідження фонокардіосигналів та діагностичні ознаки

Фонокардіографічний метод дослідження фіксує серцеві звуки та шелести у діапазоні частот від 20 Гц до 2 кГц. Для реєстрації та аналізу фонокардіосигналів (ФКС) використовують такі сучасні діагностичні системи: «КАРДІОЛАБ+ФОНО», «СФЕРА-4», «ВАЛЕНТА ФКГ» та інші. Типова реалізація ФКС наведена на рисунку А.12.

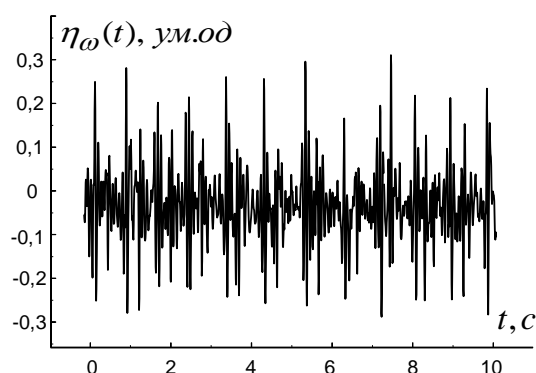


Рис.А.12. Реалізація циклічного сигналу (фонокардіосигнал)

Даний метод дослідження полягає у діагностиці порушень діяльності серця та його клапанного апарату, в його основі покладено аналізі звуків, що виникають при скороченні й розслабленні серця. Для опрацювання ФКС використовують спеціальні прилади – фонокардіографи або фонокардіографічні модулі. Основними елементами конструкції їх є: мікрофон, що перетворює звукові коливання в електричні; частотні фільтри, з'єднані з підсилювачами сигналів, що

надходять від мікрофона; пристрій, що реєструє та забезпечує запис коливань до 2000 Гц при швидкості реєстрації 50 і 100 мм/с (фонокардіографи) [292]. В таких системах використовуються лінійний та стетоскопічний мікрофони а також смугові фільтри, що дозволяє виділяти діагностично значущі звукові феномени (сегменти), реєструвати звукові коливання практично у повному спеціально обраному діапазоні частот [141, 238, 292, 323]. Дослідження ФКС об'єктивно відображає та уточнює результати амплітудного й частотного аналізу звуків, вимірювання їхньої тривалості й інтервалів між ними. На рисунку А.13 наведено ЕКС та ФКС з позначеннями діагностичних тонів [1].

До діагностичних ознак в автоматизованих системах дослідження ФКС належать тони (I, II, III, IV). Коливання клапанів при їх закриванні на початку систоли, спектр коливань концентрується навколо 25 Гц, довжина відгуку становить 47 мс; коливання стінок шлуночків, у діапазоні частот від 50 до 200 Гц; відкриття місяцеподібних клапанів (103 мс), амплітуда менша попередньої складової, але той же самий діапазон частот, також є інші параметри ФКС [1, 141].

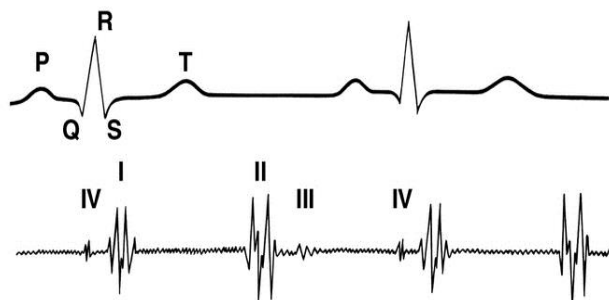


Рис. А.13. Схематичне зображення синхронно зареєстрованих ЕКС та ФКС і позначення діагностичних тонів серця (I, II, III, IV)

Інформація про діагностичні ознаки, наведена у мілісекундах, відповідає середньому часу запізнення складової відгуку відносно початку хвилі Q ЕКС [1, 287]. Тому для отримання достовірних результатів аналізу ФКС його часто проводять разом з аналізом ЕКС, тобто синхронно реєструють два типи

кардіосигналів електричної й акустичної фізичної природи та проводять їх сумісне дослідження. Хоча сумісний аналіз і дозволяє отримувати більше достовірної інформації (на етапі сегментації) про межі діагностичних зон ЕКС і тонів ФКС, проте при їх сегментації виникають подібні труднощі як і під час окремого опрацювання кардіосигналу електричної природи.

А.7. Синхронно зареєстровані кардіосигнали (полікардіосигнали). Автоматизовані комп'ютерні системи сумісної обробки синхронно зареєстрованих кардіосигналів

Поряд з опрацюванням кардіосигналів однієї фізичної природи, наприклад електричної (електрокардіосигнали), також виділяють діагностичні системи, в яких здійснюють сумісне опрацювання різних за фізичною природою синхронно зареєстрованих циклічних сигналів. Використання кількох різних сигналів, та їх аналіз дає повнішу інформаційну картину про діагностичний стан серцево-судинної системи людини. Слід також відзначити, якщо аналізуються синхронні циклічні сигнали від одного джерела (серця), то можна розглядати та досліджувати їх ритм як спільний процес, породжений одним джерелом. Це дозволяє проводити їх аналіз та моделювання за ритмом визначеного одного із синхронно зареєстрованих циклічних сигналів [168, 171, 192, 292].

Для синхронної реєстрації циклічних полікардіосигналів використовують технічні засоби, які називаються поліграфами, полікардографами, поліаналізаторами [1, 256, 292]. Для прикладу, поліграфічних систем, які проводять комплексну діагностику чи систем типу «детектора брехні», які дають відповідь на запитання: «Чи говорить досліджувана особа правду?» слід віднести: «РГПА-6/12», «ПА5-01», «РЕАН-ПОЛИ», «Рубікон», «LX4000», «РИФ», «EVERO» та багато інших.

У класичних поліграфах одночасно синхронно реєструють ЕКС, ФКС і сфігмограму, або іншими словами сфігмокардіосигнал (СКС), сигнал який знімають з сонної артерії, дослідження якого дозволяє проводити аналіз етапів (фаз) серцевого циклу [44, 146, 256, 269, 312].

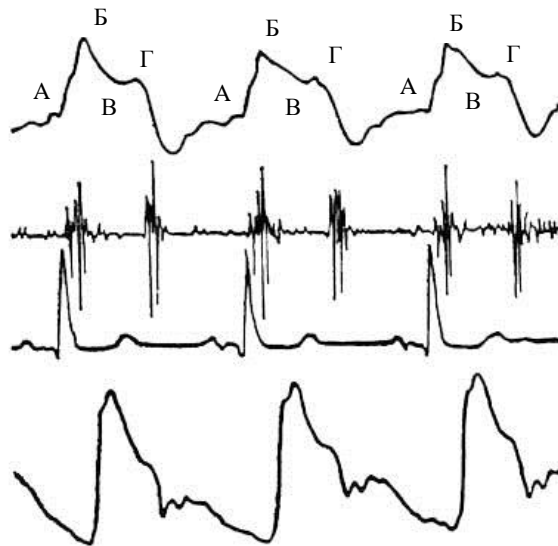


Рис. А.14. Схематичне зображення синхронно зареєстрованих полікардіосигналів: СКС, ФКС, ЕКС і РКС з позначеннями діагностичних сегментів на СКС

На рисунку А.14 наведено схематичне зображення синхронно зареєстрованих типових сигналів поліграфа. Сфігмографічний метод дослідження дозволяє діагностувати патології серцево-судинної системи, він заснований на реєстрації пульсових коливань стінки кровоносної судини [69, 269, 292]. Реєстрація пульсових коливань проводиться за допомогою спеціальних додаткових модулів, блоків до електрокардіографів або інших багатоканальних реєстраторів кардіосигналів. У таких системах механічні коливання стінки судини перетворюються в електричні сигнали, які фіксуються давачем пульсу, далі вони підсилюються та подаються на пристрій, що їх реєструє. На практиці використовують різні приймачі пульсу: контактні – накладаються на шкіру над пульсуючою артерією; безконтактні (дистанційні) – фіксують зміни електричної ємності чи оптичні властивості досліджуваної ділянки тіла [292].

Аналіз СКС передбачає виділення та дослідження таких сегментів (графоелементів), як крутий підйом кривої, (див. рис. А.14), відображає скорочення м'яза лівого шлуночка серця, який виштовхує кров в аорту. Під час систоли чи фази вигнання крові серцевого циклу кров'яний тиск досягає максимуму (ділянка А-Б), а потім спадає в міру розслаблення шлуночка до тих пір, поки тиск, який зумовлений пружними властивостями аорти і судинної

системи, не перевищить тиску шлуночка. В цей момент аортальний клапан серця закривається, що відповідає закінченню систолічної фази серцевого циклу [292]. На кривій кров'яного тиску це явище відображене у вигляді дикротичної хвилі (ділянка Б-В-Г, рис. А.14). На рисунку А.15 зображено реалізацію сфінгокардіосигналу (сонної артерії) з позначенням меж циклів – пунктирна лінія.

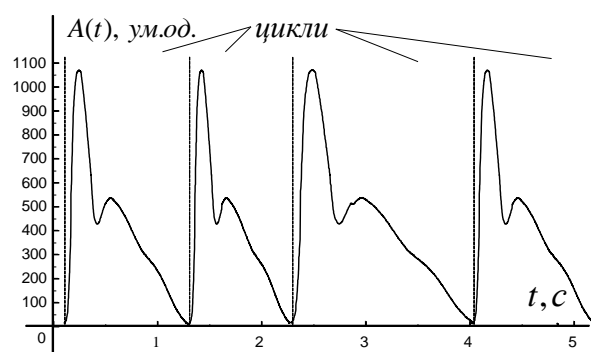


Рис. А.15. Реалізація циклічного сигналу (сфінгокардіосигнал)

На даний час, полікардіографія залишається інформативним, неінвазивним, та простим, відносно недорогим методом дослідження стану серцево-судинної системи людини [255, 292, 328]. Сумісний аналіз різних синхронно зареєстрованих КС дозволяє отримувати повнішу картину про стан досліджуваної системи. Проте при такому сумісному опрацюванні так само виникають недоліки сегментації, які характерні для випадку опрацювання одинично зареєстрованих кардіосигналів.

Поряд з розглянутими циклічними кардіосигналами існують інші типи циклічних сигналів та методи їх дослідження, які не ввійшли в огляд даного дисертаційного дослідження у зв'язку з меншим їх поширенням у медичній практиці. Наприклад, це – методи досліджень: югулярної флебографії, апекскардіографії, балістокардіографії, динамокардіографії, тахоосцилографії та інші.

Додаток Б

Технологія дослідження стану поверхні металів

Використання лазерної ударно-хвильової обробки дозволяє модифікувати властивості матеріалів унаслідок обробки внутрішніх шарів без пошкодження зовнішньої поверхні. На рисунку Б.1 наведена схема такої обробки. Лазерне імпульсне випромінювання може одночасно викликати в поверхневих і глибинних шарах матеріалу зміни за рахунок іонізаційних, термо-, ударно-хвильових та інших ефектів. Властивості поверхні сталей після опромінення лазером залежать від початкової структури матеріалу і можуть суттєво відрізнятися за умови використання певних режимів лазерної обробки.

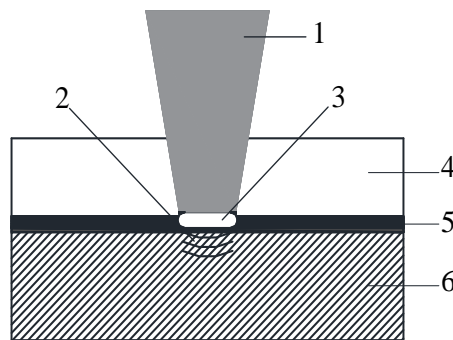


Рис. Б.1. Схема опромінення:

1 – потік випромінювання, 2 – ударна хвиля, 3 – плазма; 4 – прозоре конденсоване середовище; 5 – абсорбент; 6 – металевий зразок

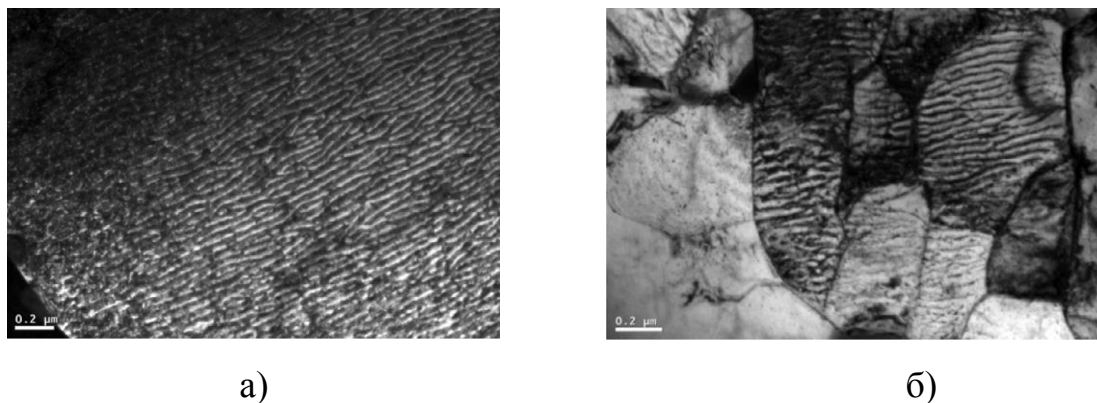
Тиск ударної хвилі на поверхню зразка [245] оцінюють за формулою (Б.1)

$$P = \left(I_0 \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\rho_1 u_1 \rho_2 u_2}{\rho_1 u_1 + \rho_2 u_2} \right)^{1/2}, \quad (\text{Б.1})$$

де I_0 – густина потужності лазерного випромінювання; γ – ефективний показник адиабати утвореної плазми; $\rho_1 u_1$ та $\rho_2 u_2$ – ударні імпеданси конденсованого та поглинаючого середовищ відповідно; ρ – густина речовини; u – швидкість

ударної хвилі.

Відомі результати самоорганізації структури металів, зокрема ферито-мартенситних сталей з умістом хрому в діапазоні 9–12 % [398]. Виявлено, що під дією радіаційного опромінення в них спостерігаються виникнення самоорганізованих дефектних кластерів як у феритній (див. рис. Б.2, а), так і у мартенситній (див. рис. Б.2, б) структурах [398].



а)

б)

Рис. Б.2. Дефектні кластери: а) у феритному; б) у мартенситному зернах ферито-мартенситної сталі, опроміненої при 20 К до 11.5 dpa ($z = [001]$)

Вивчено та систематизовано лазерний вплив на матеріали, зокрема: генерацію точкових дефектів, неоднорідне плавлення, утворення когерентних та некогерентних повторюваних поверхневих структур. Для описування процесу самоорганізації поверхні після лазерного ударно-хвильового впливу використано положення фізичної мезомеханіки, яка забезпечує багатомасштабний опис та інтерпретацію процесів деформування та руйнування матеріалів [259, 132, 131]. У роботах Паніна доведено, що пластична деформація в твердих тілах розвивається стадійно, як еволюція масштабних рівнів втрати зсувної стійкості. Деформування та зміна його механізмів на різних масштабних рівнях відбувається за принципом масштабної інваріантності.

Існує низка фізичних передумов виникнення впорядкованого рельєфу, зокрема й за принципом самовпорядкованого формування [249, 259, 398]. Одним із найвідоміших є ефект «шахової дошки» – впорядкованого розподілу напружень

і деформацій у поверхневих шарах і на інтерфейсах у твердих тілах та у зовнішніх полях (механічних, теплових, електричних). Це фізичне явище пов'язане з несумісністю деформації двох з'єднаних середовищ і виникає в будь-яких багаторівневих системах: на межах розділу «поверхневий шар – об'єм матеріалу», «покриття – основа», в багат шарових тонкоплівкових матеріалах, на межах зерен у полікристалах [260, 261].

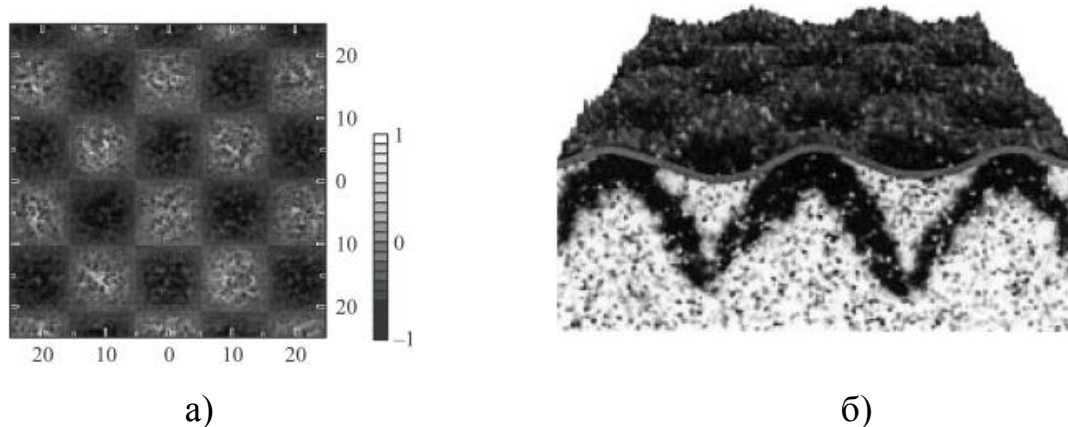


Рис. Б.3. «Шаховий розподіл» нормальних напружень в околі поверхні розділу «поверхневий шар–підшар»: а) контурна карта; б) деформаційний профіль наноструктурованого шару (тривимірне моделювання)

При лазерному ударно-хвильовому навантаженні саморганізовані структури утворюються при поверхневому розплавленні поверхні опроміненого матеріалу та його наступному застиганні. Мінімально необхідну потужність для розплавлення поверхні матеріалу можна визначити за формулою [461]

$$F_{th} = \frac{C_v(T_m - T_0)d}{A}, \quad (\text{Б.2})$$

де C_v – об'ємна провідність матеріалу; T_m та T_0 – температура плавлення й початкова температура в приміщенні відповідно; A – коефіцієнт поглинання; d – глибина оброблення матеріалу.

Відомо, що поверхневі шари в деформівному твердому тілі є найменш

стійкими до зсуву, в них відбувається швидке накопичення дефектів. З'єднання поверхневого шару та підложки зумовлює виникнення на їх межі квазіперіодичного розподілу нормальних та дотичних напружень.

Виявлення основних закономірностей пластичного деформування навантажених твердих тіл є важливим завданням для створення методів модифікування властивостей існуючих конструкційних матеріалів та розроблення нових сплавів. Відомо, що зміцнення металів та їх сплавів пов'язане зі зростанням дефектності структури, накопиченням деформацій на мікрорівні, що спричиняє зростання локалізації деформацій. Це значною мірою змінює форму й стадійність кривої деформування, загальний рівень пластичності та міцність матеріалу. Проте слід зазначити, що коректний опис ієрархії масштабних рівнів локалізації деформаційного процесу можна лише за багаторівневого підходу, пропонованого у працях В.Є. Паніна та його учнів.

У низці експериментальних та аналітико-розрахункових праць доведено, що ділянки стискаючих та розтягуючих напружень у матеріалі чергуються в «шаховому» порядку. Такі результати доводять необхідність вивчення нерівноважних процесів на поверхні матеріалів, зокрема підданих високоенергетичному імпульсному навантаженню. Моделювання таких процесів дозволить описати деформування матеріалів як багаторівневої системи.

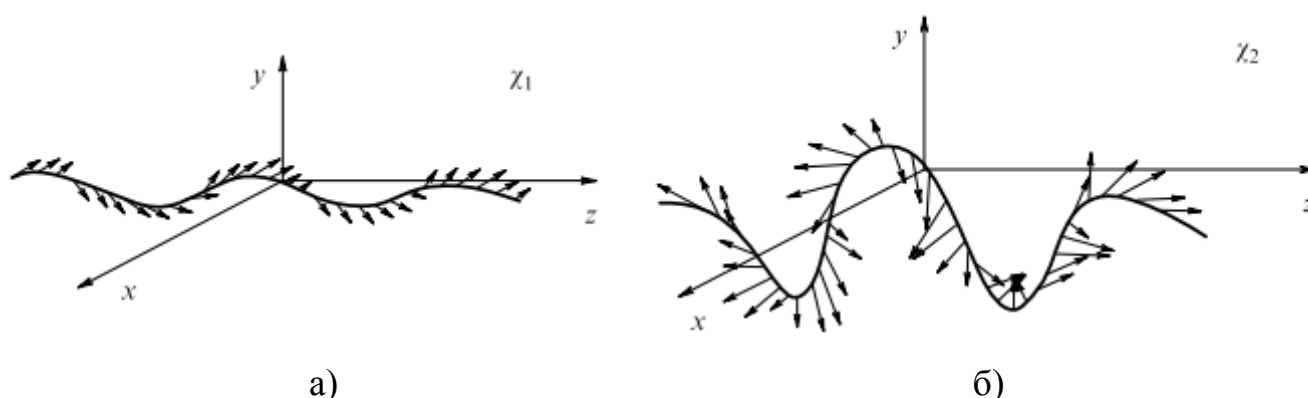


Рис. Б.4. Залежність форми та швидкості локалізованого пластичного деформування від кривизни χ деформованої області, $\chi_1 < \chi_2$.

У праці [262] деформівне тіло розглянуто як багаторівневу систему з урахуванням впливу планарних підсистем у вигляді поверхневих шарів та внутрішніх меж розділу. Така фізична модель деформівної поведінки матеріалу дозволила обґрунтувати відтворення концентраторів напружень при поширенні пластичних зсувів як локальних структурних перетворень.

Кривизна спіралі є важливим параметром каналюваного хвильового поширення локалізованого пластичного течіння. Вплив цього параметра на форму спіралі та локальну швидкість поперчного формозмінення деформованої ділянки показано на рисунку Б.4. Згідно з рисунком Б.4, а за малої кривизни χ швидкість поперчної формозміни ν невелика, а спіраль піддається крученню з великою довжиною поперчної хвилі. Таку картину спотерігали за пластичного зсуву в дуже нерівноважних умовах, наприклад, у наноструктурованих поверхневих шарах. Зростання кривизни χ спричиняє зменшення поперчної хвилі та збільшення швидкості поперчного деформування.

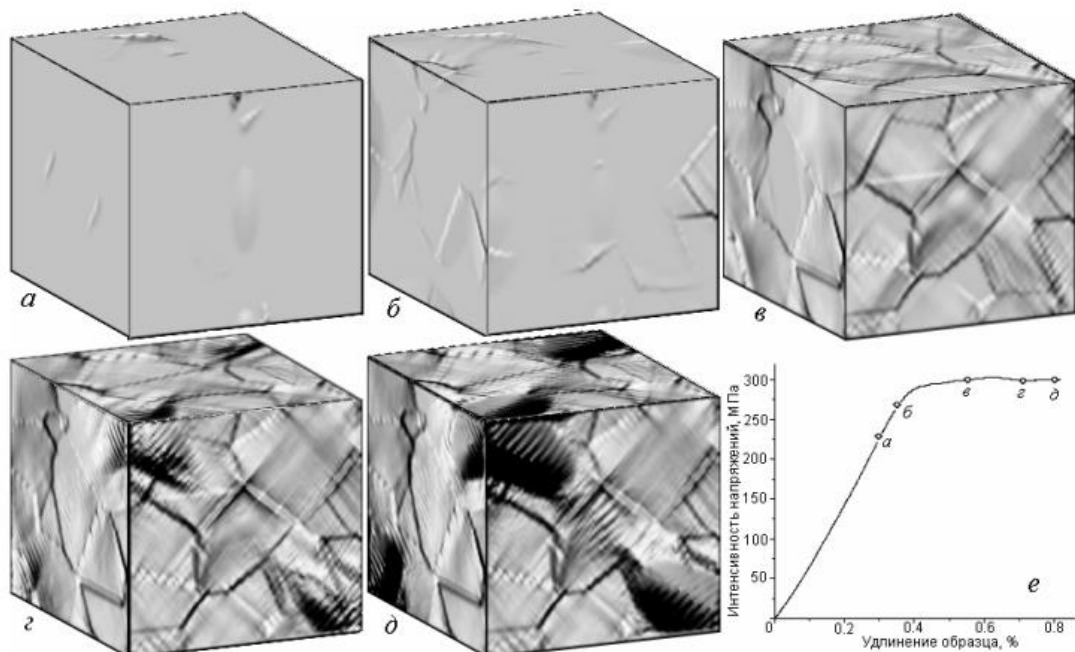


Рис. Б.5. Рельєф пластичної деформації (а-д) на поверхні полікристалу на початковій стадії пластичного течіння; е) σ - ϵ – діаграма розтягу (напруження-деформація)

Дані закономірності було підтверджено експериментально за результатами аналізу структури нелінійних хвиль зразків титану з насиченим воднем поверхневим шаром. Механізм виникнення екструзій матеріалу у вигляді нелінійних хвиль виявлено за одновісного розтягу зразків полікристалічного титану з наноструктурованою поверхнею, насиченою воднем.

Існують сучасні мезомеханічні моделі поведінки поверхневих шарів полікристалічних матеріалів, запропоновані В.А. Романовою [288] та співавторами. Зокрема на рисунку Б.5 зображено еволюції деформаційного рельєфу на поверхні полікристалу на початковій стадії розтягу. Представлення пластичних деформацій у вигляді рельєфу дозволяє виділити ієрархію локалізованих зсувів різного масштабу. Зародження пластичних зсувів відбувається поблизу зерен, які виходять на поверхню за макроскопічних деформацій, нижчих межі пружності. Після цього пластичні зсуви з'являються в об'ємі, утворюючи квазірівномірну сітку смуг. На цьому етапі відбувається вплив меж зерен на локалізацію пластичних мікродеформацій. У подальшому пластичне течіння локалізується в смугах більшого масштабу. Орієнтація та форма цих смуг залежить від умов навантажування, насамперед від схеми навантажування та геометрії зразка.

Перехід локальних об'ємів матеріалу з пружного стану в пластичний визначали за критерієм текучості Мізеса з урахуванням ізотропного зміцнення

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{S_{ij}} = \sigma_y^i(\varepsilon_{eq}^p), \quad (\text{Б.3})$$

де $\sigma_y^i(\varepsilon_{eq}^p)$ – межа текучості i -го зерна з урахуванням деформаційного зміцнення; S_{ij} – компоненти девіатора напружень, функції зміцнення для аналізованого сплаву.

Відома значна кількість методів оцінювання шорсткості поверхні. Зокрема у праці [132] рельєфні утворення кількісно порівнювали за безрозмірним параметром шорсткості R_a , який визначали як відношення площі поверхні

деформованого зразка S_t до площі її горизонтальної проекції S_f

$$R_a = \frac{S_t}{S_f} - 1. \quad (\text{Б.4})$$

Така формула має чіткий фізичний зміст – чим більше значення R_a , тим більш розвинений рельєф утворено на поверхні. Крім того, цей параметр дозволяє порівнювати рельєфоутворення різного масштабу.

Слід зазначити, що мезоскопічний рельєф при значних пластичних деформаціях формується у вигляді поздовжніх складок, орієнтованих перпендикулярно осі розтягу. Поверхня зразка з витягнутими зернами, навантаженими вздовж структури, набуває хвилеподібного профілю на макрорівні [132], див. рис. Б.6.

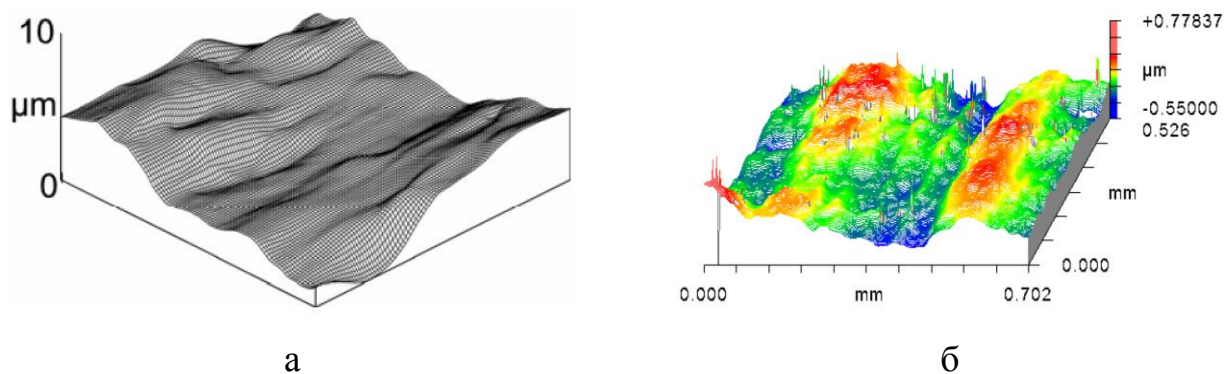


Рис. Б.6. Рельєф поверхні в полікристалі: а) за навантажування – модель;
б) профілографа – за деформування поперек текстури; $\varepsilon=10\%$

За умов короткотермінового ударного навантажування в матеріалі відбувається процес самоорганізації структури, за якого виявляються нові фундаментальні властивості речовини. Процес самоорганізації на даний час розглядають як послідовність незрівноважених фазових переходів. Переходи виникають при зміні одного або кількох керуючих (біфуркаційних) параметрів.

Додаток В

Відомі математичні моделі циклічних сигналів та явищ. Таблиця порівняння властивостей математичних моделей циклічних сигналів

У даному додатку наведено відомі математичні моделі, які використовуються для дослідження циклічних сигналів. Значна їх частина наведена у роботі [201].

В.1. Детерміновані математичні моделі циклічних сигналів

В.1.1. Гармонічні функції

Гармонічна функція може бути наведена у вигляді синусоїдальної чи косинусоїдальної функцій

$$y(t) = A \cdot \sin(2\pi\nu t + \psi_0), t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.1})$$

$$y(t) = A \cdot \cos(2\pi\nu t + \psi_0), t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.2})$$

де $A > 0$ – амплітуда; $\nu > 0$ – частота; ψ_0 – початкова фаза [43, 158] (див. рис. В.1).

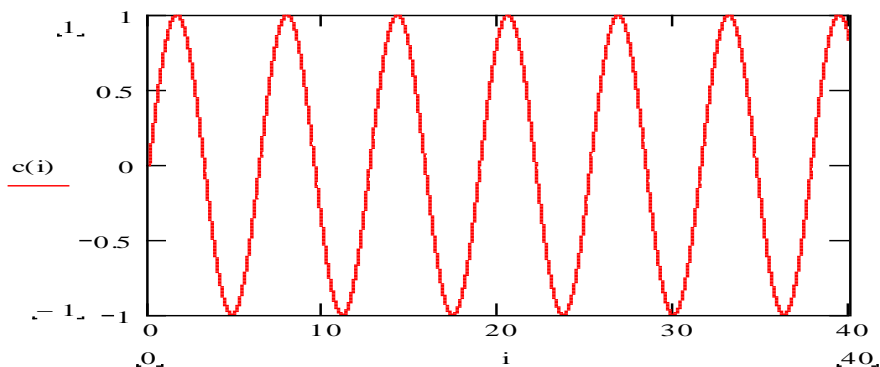


Рис. В.1. Графік гармонічної функції

Функція $\psi(t) = 2\pi\nu t + \psi_0$ описує лінійну зміну аргумента (кута) гармонічної

функції залежно від часу t . Числове значення функції $\psi(t)$, $t \in \mathbf{R}$ при фіксованому t називають фазою гармонічного коливання. Величина $T = \frac{1}{\nu}$ називається періодом гармонічного коливання.

Узагальненням моделей (В.1) та (В.2) є комплекснозначна функція $Ae^{i2\pi vt + \psi_0}$, що може бути наведена згідно з формулою Ейлера $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$, $i = \sqrt{-1}$, $x \in \mathbf{R}$ таким чином:

$$y(t) = Ae^{i2\pi vt + \psi_0} = A \cdot (\cos(2\pi vt + \psi_0) + i \sin(2\pi vt + \psi_0)), t \in \mathbf{R}. \quad (\text{В.3})$$

В.1.2. Періодичні функції та їх гармонічний аналіз

Означення періодичних функцій дамо для однієї та багатьох змінних. Означення періодичних функцій для однієї змінної.

Означення В.1. Функція $f(t)$, $t \in \mathbf{R}$ буде періодичною, якщо для будь-якого $t \in \mathbf{R}$ існує таке найменше серед можливих додатне число $T = \text{const} > 0$, що має місце рівність

$$f(t) = f(t+T), t \in \mathbf{R}. \quad (\text{В.4})$$

Число T називається періодом функції $f(t)$, $t \in \mathbf{R}$. На рис. В.2, як приклад, наведено графік періодичної функції.

Відзначимо, що вимога, аби період був найменшим числом, зумовлена тим, що числа, які є кратні числу T , а саме, числа nT , $n = \overline{2, \infty}$ теж задовольняють рівність (В.4). Тому треба брати найменше, щоб не пропустити жодного числа зі зліченої множини nT , $n \in \mathbf{Z}$, в яких періодична функція $f(t)$, $t \in \mathbf{R}$ має рівні значення. Крім того, вимога існування найменшого числа T усуває із означуваного класу періодичних функцій клас констант ($f(t) = \text{const}$, $t \in \mathbf{R}$),

оскільки для них рівність (В.4) виконується для будь-якого дійсного T . Однак найменшого додатного T не існує.

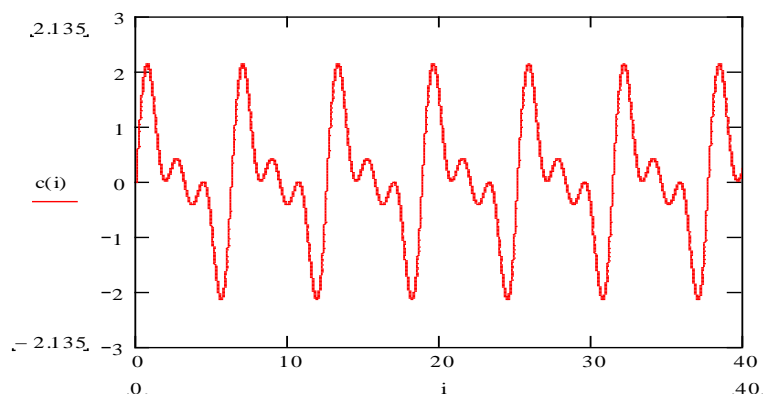


Рис. В.2. Графік періодичної функції

Означення періодичної функції багатьох змінних. У даному випадку можна казати про періодичність як за всіма, так і лише за деякими аргументами функції багатьох змінних.

Означення В.2. Функція багатьох змінних $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathbf{R}$ буде періодичною з періодами $\{T_i, i = \overline{1, k}\}$ за сукупністю k -аргументів, якщо має місце така рівність:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1 + T_1, x_2 + T_2, \dots, x_k + T_k, \dots, x_n), \quad x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathbf{R}, \quad (\text{В.5})$$

$$T_i = \text{const}_i > 0, \quad i = \overline{1, k}, \quad 1 \leq k \leq n, \quad n \in \mathbf{N}.$$

Елементи множини $\{T_i, i = \overline{1, k}\}$ називають періодами функції $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ по x_i -тих аргументах, якщо вони є найменшими серед інших додатних чисел, які задовольняють рівність (В.5). Якщо $k = n$, то функція багатьох змінних є періодичною з періодами $\{T_i, i = \overline{1, n}\}$ за всіма своїми аргументами.

У загальному в означенні В.2 періоди за різними аргументами є різними, тобто $\left\{T_i \neq T_j, \text{при } i \neq j, i, j = \overline{1, k}\right\}$. Однак в деяких випадках, зокрема в теорії випадкових процесів при означенні стохастично періодичного процесу у вузькому розумінні (періодично розподіленого випадкового процесу), використовується поняття періодичності функції $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ багатьох змінних із однаковим періодом T за сукупністю $k < n$ аргументів. Тому дамо наступне означення.

Означення В.3. Функція $f(x_1, x_2, \dots, x_n), x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathbf{R}$ багатьох змінних буде періодичною з періодом T за сукупністю k -аргументів, якщо існує таке найменше число $T > 0$, для якого має місце рівність

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n) &= f(x_1 + T, x_2 + T, \dots, x_k + T, \dots, x_n), x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathbf{R}, \\ T &= \text{const} > 0, 1 \leq k < n, n \in \mathbf{N}. \end{aligned} \quad (\text{В.6})$$

Якщо $k = n$, то функція багатьох змінних $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ є періодичною з періодом T за сукупністю всіх своїх аргументів.

У формулах (В.5) та (В.6) аргументи $\left\{x_i, i = \overline{1, n}\right\}$ можна розглядати як просторові і/або часові координати деякого фізичного просторово-часового поля.

Будь-яка T -періодична дійснозначна функція $f(t), t \in \mathbf{R}$, яка є обмеженою та кусково-неперервною зі скінченною кількістю розривів першого роду на періоді, може бути наведена у вигляді тригонометричного ряду косинусоїд

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos(2\pi\nu kt + \varphi_k), t \in \mathbf{R}, \quad (\text{В.7})$$

де $\nu = \frac{1}{T}$ – частота, T – період функції $f(t), t \in \mathbf{R}$, а множини коефіцієнтів

$\left\{A_k, k = \overline{0, \infty}\right\}$ та $\left\{\varphi_k, k = \overline{1, \infty}\right\}$ відповідно є амплітудо-частотним та фазо-

частотним спектрами функції $f(t), t \in \mathbf{R}$.

Часто використовують інші форми подавання розкладів періодичних функцій у тригонометричні ряди Фур'є, а саме

- у вигляді ряду синусоїдальних та косинусоїдальних функцій

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos(2\pi\nu kt) + b_k \cdot \sin(2\pi\nu kt), t \in \mathbf{R}; \quad (\text{B.8})$$

- у вигляді комплексного ряду Фур'є, який використовується не лише для зображення дійснозначних, але й комплекснозначних функцій

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cdot e^{j2\pi\nu kt}, t \in \mathbf{R}. \quad (\text{B.9})$$

Множини коефіцієнтів $\{a_k, k = \overline{0, \infty}\}$ та $\{b_k, k = \overline{1, \infty}\}$ у ряді (B.8) та множина комплекснозначних коефіцієнтів $\{c_k, k \in \mathbf{Z}\}$ у ряді (B.9) також називаються спектром періодичної функції $f(t), t \in \mathbf{R}$.

Спектральні коефіцієнти обчислюють так:

$$a_k = \frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \cos(2\pi\nu kt) dt, k = \overline{0, \infty}; \quad (\text{B.10})$$

$$b_k = \frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \sin(2\pi\nu kt) dt, k = \overline{1, \infty}; \quad (\text{B.11})$$

$$A_0 = \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt, A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \varphi_k = -\arctg \frac{b_k}{a_k}, k = \overline{1, \infty}; \quad (\text{B.12})$$

$$c_k = \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot e^{-j2\pi kv t} dt, \quad k \in \mathbf{Z}. \quad (\text{B.13})$$

Усі наведені вище розклади періодичної функції є частинним випадком розкладів функцій у ряди за ортогональними функціональними базисами, що носять назву узагальнених рядів Фур'є.

В.1.3. Майже періодичні та квазіперіодичні функції

Не зважаючи на існування кількох варіантів означення майже періодичної функції, її однозначно можна навести у вигляді ряду за гармонічними функціями, у загальному випадку, із некрatними частотами. Існує кілька варіантів означення майже періодичної функції, що зумовлено застосуванням в означеннях різних мір близькості (метрик). Дамо два основних означення майже періодичної функції, а саме, означення майже періодичної функції у термінах її часових та спектральних властивостей.

Означення В.4. Неперервна дійсна чи комплекснозначна функція $f(t)$, визначена для всіх дійсних значень $t \in \mathbf{R}$, називається майже періодичною, якщо для будь-якого $\varepsilon > 0$ можна вказати таке $l = l(\varepsilon)$, що в кожному інтервалі осі t довжиною l знайдеться хоча б одне число $\tau = \tau(\varepsilon)$, для якого при будь-якому t виконується нерівність $|f(t + \tau) - f(t)| < \varepsilon$.

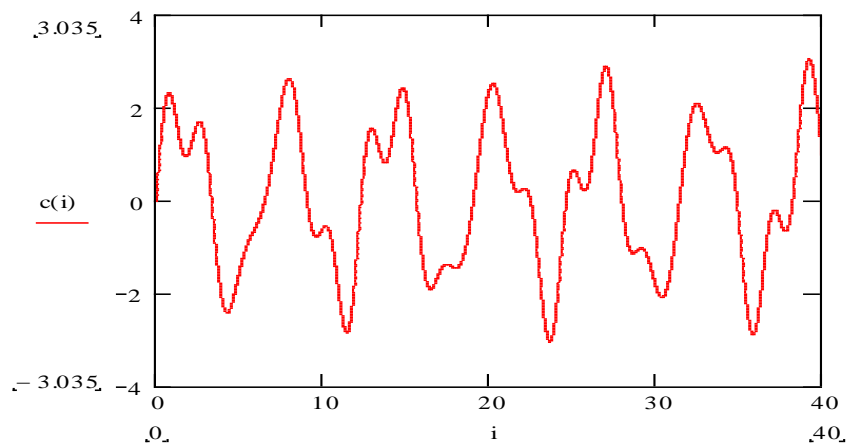


Рис.В.3. Графік майже періодичної функції $f(t) = \cos t + \cos \sqrt{2}t$

Числа $\tau = \tau(\varepsilon)$ називають майже періодами функції $f(t)$. Найпростіші приклади майже періодичної функції отримують у результаті додавання періодичних функцій з некрратними періодами, наприклад $f(t) = \cos t + \cos \sqrt{2}t$ (див. рис. В.3).

Сформулюємо означення майже періодичної функції в термінах властивостей її спектральної структури (у вигляді ряду).

Означення В.5. Неперервна дійсна чи комплекснозначна функція $f(t)$ називається майже періодичною, якщо її можна навести у вигляді ряду

$$f(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} c_k \cdot e^{i\lambda_k t}, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{В.14})$$

де $\{c_k, k \in \mathbf{Z}\}$ – зліченна множина дійсних чи комплексних чисел, що називається спектром майже періодичної функції, сума квадратів модулів спектральних коефіцієнтів є обмеженою величиною ($\sum_{k \in \mathbf{Z}} |c_k|^2 < \infty$), а частоти $\{\lambda_k, k \in \mathbf{Z}\}$, у загальному випадку, не задовольняють рівність

$$\lambda_k = k\lambda_1, k \in \mathbf{Z} \quad (\text{В.15})$$

і є довільною впорядкованою множиною $\{\lambda_k < \lambda_{k+1}, k \in \mathbf{Z}\}$ показників Фур'є. Якщо ж рівність (В.15) для ряду (В.14) виконується (частоти кратні), то ряд (В.14) є рядом Фур'є, в який розкладається періодична функція.

Незважаючи на те, що будь-яку майже періодичну функцію можна навести у вигляді ряду (В.14), тобто через зліченну множину гармонік, простір майже періодичних функцій є несепабельним, оскільки для зображення всіх можливих майже періодичних функцій, в загальному, необхідна незліченна множина гармонік. Цей факт зумовлює і метод обчислення коефіцієнтів $\{c_k, k \in \mathbf{Z}\}$ як таких

ненульових значень деякої функції $C(\lambda)$, $\lambda \in \mathbf{R}$, коли $\lambda = \lambda_k$. Функцію $C(\lambda)$ визначаємо так:

$$C(\lambda) = \mathbf{M}_t \{ f(t) e^{-i\lambda t} \} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) e^{-i\lambda t} dt, \lambda \in \mathbf{R}. \quad (\text{B.16})$$

До основних властивостей майже періодичних функцій слід віднести такі:

1. Майже періодична функція є обмеженою і рівномірно неперервною на всій дійсній осі.
2. Сума та добуток скінченної кількості майже періодичних функцій також є майже періодична функція.
3. Границя рівномірно збіжної послідовності майже періодичних функцій також є майже періодичною функцією.
4. Для кожної майже періодичної функції існує її середнє значення

$$\mathbf{M}_t \{ f(t) \} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) dt. \quad (\text{B.17})$$

5. Для кожної майже періодичної функції має місце рівність (рівність Парсеваля)

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |f(t)|^2 dt = \sum_{k \in \mathbf{Z}} |c_k|^2. \quad (\text{B.18})$$

6. Теорема апроксимації: для будь-якого $\varepsilon > 0$ можна вказати такий тригонометричний поліном:

$$P_\varepsilon(t) = \sum_{k=1}^K c_k e^{i\lambda_k t}, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.19})$$

де λ_k – дійсні числа, що для всіх значень t виконується нерівність $|f(t) - P_\varepsilon(t)| < \varepsilon$, з іншого боку, кожна функція $f(t)$ з цією властивістю є майже періодичною. Тобто клас майже періодичних функцій є точне замикання за нормою $\|f(t), t \in \mathbf{R}\| = \sup\{|f(t)| : t \in \mathbf{R}\}$ (sup-норма) множини тригонометричних поліномів (В.19).

Множина всіх майже періодичних функцій є лінійним простором відносно звичайних операцій додавання та множення на скаляри, множина майже періодичних функцій утворюють банаховий простір відносно sup-норми.

При аналізі в частотній області циклічних сигналів із використанням математичних моделей періодичних функцій та майже періодичних функцій важливими параметрами служать спектральні коефіцієнти та сукупність відліків майже періодичної функції на інтервалі. Тривалість його дорівнює одному із її майже періодів (при аналізі в часовій області), що відповідає деякому заданому $\varepsilon > 0$, [201].

Оскільки відомо [201], що для майже періодичної функції характерно те, що її значення при додаванні до її аргументу певним чином вибраних постійних чисел – майже періодів, приблизно (з точністю до $\varepsilon > 0$) повторюються, приблизно рівні. Проте вони не завжди можуть бути використані для моделювання реальних циклічних сигналів складної структури, оскільки така обмеженість використання зумовлена тим, що клас майже періодичних функцій є дуже широким із досить загальними властивостями, які повною мірою не відображають циклічну структуру реальних сигналів та явищ. Крім цього, серед майже періодичних функцій є функції, структура яких взагалі не містить специфічних особливостей повторюваного процесу. А також майже періодична функція не враховує стохастичний (випадковий) характер реальних сигналів, оскільки вона належить до детермінованих математичних об'єктів. Усі ці аргументи обмежують використання математичної моделі майже періодичної функції, оскільки складно врахувати змінність ритму циклічного явища чи процесу.

Розрізняють кілька типів просторів майже періодичних функцій, серед яких можна назвати:

- простір Степанова, де відстань (метрика) між майже періодичними функціями задається виразом

$$\rho(f(t), g(t)) = \sup_{t \in \mathbf{R}} \int_t^{t+1} |f(x) - g(x)| dx; \quad (\text{B.20})$$

- простір Безиковича, де відстань між функціями задається виразом

$$\rho(f(t), g(t)) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T |f(t) - g(t)| dt; \quad (\text{B.21})$$

- простір Вейля, де відстань між функціями задається виразом

$$\rho(f(t), g(t)) = \lim_{T \rightarrow \infty} \sup_{t \in \mathbf{R}} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |f(x) - g(x)| dx. \quad (\text{B.22})$$

Частинним випадком майже періодичної функції є квазіперіодична функція, яку ввів Боль. Якщо в структурі ряду (В.14) майже періодичної функції можна виділити такі p послідовностей кратних частот:

$$\begin{cases} \lambda_{k_1} = k_1 \lambda_1, k_1 \in \mathbf{Z}, \\ \lambda_{k_2} = k_2 \lambda_2, k_2 \in \mathbf{Z}, \\ \vdots \\ \lambda_{k_p} = k_p \lambda_p, k_p \in \mathbf{Z}, \end{cases} \quad (\text{B.23})$$

причому $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ – не кратні між собою, то ряд (В.14) називають квазіперіодичним (поліперіодичним). Його можна навести так:

$$f(t) = \sum_{k_1 \in \mathbf{Z}} \dots \sum_{k_p \in \mathbf{Z}} C_{k_1 \dots k_p} e^{i(k_1 \lambda_1 + \dots + k_p \lambda_p)t} = \sum_{k_1 \in \mathbf{Z}} \dots \sum_{k_p \in \mathbf{Z}} C_{k_1 \dots k_p} e^{i \sum_{j=1}^p k_j \lambda_j \cdot t}, t \in \mathbf{R}. \quad (\text{B.24})$$

Множина гармонік у ряді (B.24) називається базисом Боля. Функція $f(t)$, наведена у вигляді ряду (B.24), називається квазіперіодичною або поліперіодичною. Ряд (B.24) задає функції, які використовуються як математичні моделі коливань із кратною ритмікою.

У частинному випадку, коли $p = 2$, ряд (B.24) має вигляд

$$f(t) = \sum_{k_1 \in \mathbf{Z}} \sum_{k_2 \in \mathbf{Z}} C_{k_1 k_2} e^{i(k_1 \lambda_1 + k_2 \lambda_2)t}, t \in \mathbf{R}. \quad (\text{B.25})$$

і в роботах [261, 260] називається біперіодичним, а функція $f(t)$ – біперіодичною.

В.1.4. Циклічна числова функція

Такий тип детермінованих математичних моделей описаний в роботах Лупенка С.А. [200, 201].

Означення В.6. Циклічною числовою функцією називається функція $f(t) \in \mathbf{R}, t \in \mathbf{W}$, для якої існує числова функція $y(t, n)$ ($T(t, n)$), яка задовольняє умови структурної функції (функції ритму) та має місце таке співвідношення:

$$f(t) = f(y(t, n)) = f(t + T(t, n)), t \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}. \quad (\text{B.26})$$

Таким чином, циклічні числові функції $f(t), t \in \mathbf{W}$ є класом функцій, що є інваріантними до біциклічної розривної зліченної групи перетворень $\Gamma = \{T_n(t) = y(t, n), n \in \mathbf{Z}\}$, які задовольняють умовам функції ритму [205].

Прикладом циклічної числової функції з постійним ритмом є довільна періодична числова функція. Прикладом циклічної числової функції зі змінним

ритмом, тобто коли $T(t, n) \neq n \cdot T$ є частотно модульована гармонічна функція, за умови, що модуляція здійснюється без зміни порядку слідування її значень у всіх циклах модульованої функції [205].

В.1.5. Циклічна числова функція із сегментною структурою

Для даної математичної моделі основні її властивості наведені в таблиці В.1. Саму математичну модель, яка враховує сегментну циклічну чи сегментну зонну структури, наведено у додатку Ж та третьому розділі.

В.2. Стохастичні математичні моделі циклічних сигналів

В.2.1. Стаціонарний випадковий процес як математична модель циклічних сигналів

Випадковий процес, у якого багатовимірні функції розподілу не залежать від часового зсуву за сукупністю аргументів, а саме:

$$F_{k_{\xi}}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) = F_{k_{\xi}}(x_1, \dots, x_k; t_1 + T, \dots, t_k + T), x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k, T \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.26})$$

названо стаціонарним процесом у вузькому розумінні [150].

На практиці, як правило, використовують стаціонарні випадкові процеси в рамках спектрально-кореляційної теорії (стаціонарність у широкому розумінні). Гільбертовий дійсний випадковий процес $\xi(\omega, t)$ називається стаціонарним у широкому розумінні (слабо стаціонарним), якщо його перші дві моментні функції не залежать від початку відліку, а саме:

$$\mathbf{M}\{\xi(\omega, t)\} = a = \text{const}, \quad (\text{B.27})$$

$$R(t_1, t_2) = \mathbf{M}\{[\xi(\omega, t_1) - a] \cdot [\xi(\omega, t_2) - a]\} = R(t_2 - t_1) = R(\tau),$$

$$\tau = t_2 - t_1, t_1, t_2, \tau \in \mathbf{R}. \quad (\text{B.28})$$

Для стаціонарного у широкому розумінні гармонізованого випадкового процесу характерно те, що його можна навести у вигляді стохастичного інтеграла, до конструкції якого входять детерміновані гармонічні функції, тобто здійснити спектральне зображення випадкового процесу. Зокрема, можна казати про спектральне зображення як самого процесу, так і його кореляційної функції. Згідно з теоремою Хінчина кореляційна функція $R(\tau)$, $\tau \in \mathbf{R}$ неперервного в середньоквадратичному розумінні гільбертового дійсного слабостаціонарного випадкового процесу $\xi(\omega, t)$ має спектральне зображення у вигляді інтеграла Стілтєса

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi f\tau} dF(f), i = \sqrt{-1}, \tau \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.29})$$

де $F(f)$, $f \in \mathbf{R}$ – додатно означена, неспадна, неперервна зліва функція, яку називають спектральною мірою (функцією) слабостаціонарного випадкового процесу $\xi(\omega, t)$. Спектральна функція задовольняє таким умовам: $F(-\infty) = 0$, $\lim_{f \rightarrow \infty} F(f) = F(\infty) = R(0) = \mathbf{D}\{\xi(\omega, t)\}$.

Спектральне зображення кореляційної функції записують ще у такому вигляді:

$$R(\tau) = \int_0^{\infty} \cos(2\pi f\tau) dG(f), \tau \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.30})$$

де $G(f) = 2F(f) - R(0)$, $f \in [0, \infty)$, $G(0) = 0$, $\lim_{f \rightarrow \infty} G(f) = R(0) = \mathbf{D}\{\xi(\omega, t)\}$. Функція

$G(f)$ при кожному фіксованому f має зміст середньої потужності флуктуацій процесу $\xi(\omega, t)$, що припадає на частотний діапазон $[0, f)$. Змінна f має фізичний зміст частоти коливань гармонічних складових кореляційної функції.

Окрім зображення кореляційної функції слабостаціонарного випадкового процесу згідно із роботами Колмогорова та Крамера, можна дати спектральне

зображення і самого випадкового процесу $\xi(\omega, t)$. Згідно з теоремою Колмогорова будь-який дійсний слабостаціонарний випадковий процес $\xi(\omega, t)$ можна зобразити у вигляді суми інтегралів за стохастичною мірою Стілтєса

$$\xi(\omega, t) = \int_0^{\infty} \cos(2\pi ft) d\eta_1(\omega, f) + \int_0^{\infty} \sin(2\pi ft) d\eta_2(\omega, f), \quad \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.31})$$

де $\eta_1(\omega, f)$ та $\eta_2(\omega, f), f \geq 0$ – дійсні випадкові функції з ортогональними приростами.

Для випадкового процесу $\xi(\omega, t)$ спектральна функція $G(f)$ в усіх точках неперервності пов'язана з випадковими функціями $\eta_1(\omega, f)$ та $\eta_2(\omega, f)$ так:

$$G(f + \Delta f) - G(f) = \mathbf{M} \left\{ [\eta_i(\omega, f + \Delta f) - \eta_i(\omega, f)]^2 \right\}, \quad i = \overline{1, 2}. \quad (\text{B.32})$$

Згідно з теоремою Крамера комплекснозначний гільбертовий слабостаціонарний випадковий процес $\xi(\omega, t) = \xi_1(\omega, t) + i \cdot \xi_2(\omega, t)$ можна навести так:

$$\xi(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi ft} d\eta(\omega, f), \quad \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.33})$$

де $\eta(\omega, f), f \in \mathbf{R}$ – комплекснозначна випадкова функція із ортогональними приростами, для якої $\mathbf{M} \{ d\eta(\omega, f)^2 \} = dF(f)$.

Слабостаціонарні випадкові процеси з дискретним спектром можна навести і у вигляді ряду. Згідно з теоремою Слуцького будь-який дійсний слабостаціонарний випадковий процес $\xi(\omega, t)$ із дискретним спектром можна зобразити у вигляді такого ряду:

$$\xi(\omega, t) = m + \sum_{k=1}^{\infty} \sigma_k (\xi_k(\omega) \cos(2\pi f_k t) + \eta_k(\omega) \sin(2\pi f_k t)), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.34})$$

де $m, \sigma_k > 0, f_k \geq 0, k \in \mathbf{N}$ – дійсні числа, а випадкові величини $\xi_k(\omega)$ та $\eta_k(\omega), k \in \mathbf{N}$ є ортогональними випадковими величинами із нульовим математичним сподіванням та одиничною дисперсією.

В.2.2. Стохастично періодичні випадкові процеси

В.2.2.1. Адитивні, мультиплікативні та адитивно-мультиплікативні моделі циклічних сигналів

Адитивні, мультиплікативні та адитивно-мультиплікативні моделі формуються зі стаціонарного випадкового процесу $\{\xi_1(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}\}$ та детермінованих періодичних функцій $f(t), g(t)$ таким чином:

1) адитивна модель

$$\xi(\omega, t) = f(t) + \xi_1(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}; \quad (\text{B.35})$$

2) мультиплікативна модель

$$\xi(\omega, t) = g(t) \cdot \xi_1(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}; \quad (\text{B.36})$$

3) адитивно-мультиплікативна модель

$$\xi(\omega, t) = f(t) + g(t) \cdot \xi_1(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}. \quad (\text{B.37})$$

У сучасних дослідженнях при розробленні математичних моделей циклічних сигналів часто використовують суміші стаціонарного випадкового процесу та детермінованої періодичної функції.

В.2.2.2. Періодично корельовані випадкові процеси (ПКВП) та їх гармонічний аналіз

Під ПКВП розуміють випадковий процес $\xi(\omega, t)$, математичне сподівання $m_\xi(t)$ якого є періодичною функцією з деяким періодом T ($T > 0$), а кореляційна функція $R_\xi(t_1, t_2)$ – періодична з цим же періодом T за сукупністю своїх аргументів, а саме [109, 112–115]:

$$m_\xi(t) = m_\xi(t + T), t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.38})$$

$$R_\xi(t_1, t_2) = R_\xi(t_1 + T, t_2 + T), t_1, t_2 \in \mathbf{R}. \quad (\text{B.39})$$

Число T називають періодом корельованості. ПКВП містить у собі моделі (В.35)–(В.37) як частинні випадки, а, отже, є більш загальною ймовірнісною математичною моделлю, що повніше враховує стохастичну періодичність. Крім того, така модель включає і деякі види імпульсних імовірнісних моделей [109]. До суттєвих переваг ПКВП можна віднести його відносну простоту, необхідність для його використання незначної апріорної інформації про досліджуваний циклічний сигнал чи явище.

У роботі [115] показано можливість зображення періодично корельованого випадкового процесу через стаціонарні та стаціонарно пов'язані випадкові компоненти у вигляді такого ряду:

$$\xi(\omega, t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \xi_k(\omega, t) \cdot e^{ik\lambda_1 t} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \xi_k(\omega, t) \cdot e^{i\frac{2\pi}{T}kt}, \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.40})$$

де $\{\xi_k(\omega, t), k \in \mathbf{Z}\}$ – зліченновимірний вектор стаціонарних та стаціонарно пов'язаних у широкому розумінні випадкових процесів; $\{e^{ik\lambda_1 t}, k \in \mathbf{Z}\}$, $\lambda_1 = \frac{2\pi}{T}$ – базис детермінованих комплексних експонент.

Із зображення (В.40) впливають такі подання математичного сподівання $m_\xi(t)$ та кореляційної функції $R_\xi(t_1, t_2)$ ПКВП:

$$m_\xi(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} m_{\xi_k} \cdot e^{ik\lambda_1 t} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} m_{\xi_k} \cdot e^{i\frac{2\pi}{T}kt}, \quad t \in \mathbf{R}, \quad (\text{В.41})$$

$$R_\xi(t_1, t_2) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \sum_{j \in \mathbf{Z}} D_{kj}(t_1 - t_2) \cdot e^{i\frac{2\pi}{T}(kt_1 - jt_2)}, \quad t_1, t_2 \in \mathbf{R}, \quad (\text{В.42})$$

де $\{m_{\xi_k}, k \in \mathbf{Z}\}$ – множина математичних сподівань, а $[D_{kj}(\tau)]_{k, j \in \mathbf{Z}}$ – кореляційна матриця вектора $\{\xi_k(\omega, t), k \in \mathbf{Z}\}$ стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових процесів у широкому розумінні.

Періодично корельований випадковий процес можна навести у вигляді інтеграла за стохастичною мірою

$$\xi(\omega, t) = \int_{\lambda} e^{i\lambda t} d\mathbf{Z}(\omega, \lambda), \quad \omega \in \mathbf{\Omega}, \quad t \in \mathbf{R}, \quad (\text{В.43})$$

де $\{e^{i\lambda t}, \lambda \in \mathbf{R}\}$ – незліченний базис у несепабельному функціональному лінійному просторі; $\mathbf{Z}(\omega, \lambda)$ – стохастична міра, яка задана на підмножинах простору \mathbf{R}^2 частот комплексних експонент $\{e^{i\lambda t}, \lambda \in \mathbf{R}\}$.

Якщо ПКВП має зображення (В.43), то його кореляційна функція буде мати зображення у вигляді інтеграла Стілтєса

$$R_\xi(t_1, t_2) = \iint_{\mathbf{R}^2} e^{i(\lambda_1 t_1 - \lambda_2 t_2)} \mathbf{F}(d\lambda_1, d\lambda_2), \quad t_1, t_2 \in \mathbf{R}, \quad (\text{В.44})$$

де $\mathbf{F}(d\lambda_1, d\lambda_2), \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbf{R}$ – кореляційна біміра, для якої має місце умова

$\int_{\lambda} \mathbf{F}(d\lambda, d\lambda) < \infty$ і яка визначається так:

$$\mathbf{F}(d\lambda_1, d\lambda_2) = \mathbf{M}\{\mathbf{Z}(\omega, d\lambda_1)\mathbf{Z}(\omega, d\lambda_2)\}, \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbf{R}. \quad (\text{B.45})$$

Для ПКВП біміра $\mathbf{F}(d\lambda_1, d\lambda_2)$ має характерну структуру, а саме:

$$\mathbf{F}(\Delta_1, \Delta_2) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_{\Delta_2} I_{\Delta_1} \left(\lambda_1 + k \frac{2\pi}{T} \right) F_k(d\lambda_1), \Delta_1, \Delta_2 \subset \mathbf{R}, \quad (\text{B.46})$$

де $I_{\Delta_1}(\lambda_1)$ є індикаторною функцією множини Δ_1 , $F_k(d\lambda_1)$ – спектральна міра.

У такому разі, очевидно, для ПКВП корельованими є лише гармоніки, частоти яких задовольняють таку рівність:

$$\lambda_1 = \lambda_2 - k \frac{2\pi}{T}, k \in \mathbf{Z}, \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbf{R}. \quad (\text{B.47})$$

В.2.2.3. Періодичні випадкові процеси у вузькому розумінні

Дамо означення періодичного випадкового процесу у вузькому розумінні [228].

Означення В.6. Сепарабельний випадковий процес $\{\xi(\omega, t), t \in \mathbf{R}, \omega \in \Omega\}$ називається стохастично періодичним у вузькому розумінні, якщо існує таке число $T > 0$, що скінченновимірні вектори $(\xi(\omega, t_1), \xi(\omega, t_2), \dots, \xi(\omega, t_k))$ і $(\xi(\omega, t_1 + T), \xi(\omega, t_2 + T), \dots, \xi(\omega, t_k + T))$, де $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ – множина сепарабельності процесу $\xi(\omega, t)$, при всіх цілих $k \geq 1$ є стохастично еквівалентними у широкому розумінні.

Відзначимо, що стохастично еквівалентними у широкому розумінні будуть випадкові k -вимірні вектори, якщо вони мають однакові k -вимірні функції розподілу.

Для T -періодичного випадкового процесу його k -вимірні інтегральні функції розподілу є періодичною з періодом $T = \text{const} > 0$ (T – найменше) за сукупністю часових аргументів, а саме:

$$F_k(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) = F_k(x_1, \dots, x_k; t_1 + T, \dots, t_k + T), \quad x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k \in \mathbf{R}, \quad k \in \mathbf{N}. \quad (\text{B.48})$$

Розглянуті вище математичні моделі періодично розподілених та періодично корельованих випадкових процесів є досить загальними. У теоретичних та прикладних дослідженнях використовуються деякі їх підкласи, зокрема періодичні білі шуми у вузькому та широкому розуміннях, марковські періодичні ланцюги та процеси, лінійні періодичні та періодично корельовані випадкові процеси. Розглянемо ці випадкові процеси. Але спочатку розглянемо процеси із незалежними (некорельованими) періодичними приростами, що враховують стохастичну періодичність не у значеннях сигналу, а у його приростах (диференціалах).

Для оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних сигналів на базі моделі стохастично періодичних процесів використовують метод φ -серій. А при статистичному оцінюванні характеристик ПКВП використовують синфазний метод, що за своєю суттю еквівалентний методу φ -серій.

В.2.2.4. Процес із незалежними (некорельованими) періодичними приростами

Як відомо, випадковий процес $\{\eta(\omega, t), \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}\}$ називається процесом із незалежними (некорельованими) приростами, якщо при деякому фіксованому t_0 для всіх $t_{-m} < t_{-m+1} < \dots < t_{-1} < t_0 < t_1 < \dots < t_{n-1} < t_n$ ($m, n \in \mathbf{Z}$) із \mathbf{R} випадкові величини

$$\begin{aligned} &\eta(\omega, t_{-m}) - \eta(\omega, t_{-m+1}), \dots, \eta(\omega, t_0) - \eta(\omega, t_{-1}), \quad \eta(\omega, t_0), \\ &\eta(\omega, t_1) - \eta(\omega, t_0), \dots, \eta(\omega, t_n) - \eta(\omega, t_{n-1}) \end{aligned} \quad (\text{B.49})$$

незалежні (некорельовані).

Згідно з роботою [155] дамо означення випадкового процесу з незалежними періодичними приростами.

Означення В.7. Випадковий процес $\eta(\omega, t)$ із незалежними приростами будемо називати процесом із незалежними періодичними приростами, якщо при фіксованому $h > 0$ розподіли приростів (диференціалів) $\Delta_h \eta(\omega, t) (d\eta(\omega, t))$ та $\Delta_h \eta(\omega, t + T) (d\eta(\omega, t + T))$ однакові для будь-якого $t \in \mathbf{R}$.

В.2.2.5. Періодичний білий шум

Наведемо означення періодичного білого шуму. Оскільки білим шумом $\zeta(\omega, t)$ у строгому (широкому) розумінні називають узагальнену похідну [155]

$$\zeta(\omega, t) = \eta'(\omega, t) = \frac{d\eta(\omega, t)}{dt}, \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R} \quad (\text{B.50})$$

від процесу з незалежними (некорельованими) приростами $\{\eta(\omega, t), \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}\}$, то періодичний білий шум означають як узагальнену похідну від процесів із незалежними періодичними приростами, тобто дамо згідно з роботою [155] наступне означення.

Означення В.8. Узагальнену похідну від процесу з незалежними періодичними приростами будемо називати періодичним білим шумом.

Якщо областю визначення білого шуму є множина цілих чисел \mathbf{Z} , то можна дати означення періодичного білого шуму дискретного аргументу ще таким чином.

Означення В.9. Білий шум $\{\zeta(\omega, t), \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{Z}\}$, тобто випадкова послідовність із незалежними (некорельованими) значеннями, називається дискретним періодичним білим шумом із періодом $T \in \mathbf{N}$ ($T \geq 2$), якщо випадкові

величини $\zeta(\omega, t)$ та $\zeta(\omega, t+T)$, є стохастично еквівалентними у широкому розумінні для будь-якого $t \in \mathbf{Z}$.

Для дискретного періодичного білого шуму його функція розподілу задовольняє рівності

$$F_{\zeta}(x, t) = F_{\zeta}(x, t+T), x, t \in \mathbf{Z}, T > 0. \quad (\text{B.51})$$

Також можна суттєво розширити клас періодичних білих шумів, якщо конкретизувати тип їх розподілів. Зокрема в роботах [270] виділяють періодичні білі шуми із нормальним, рівномірним, експоненціальним, пуассонівським, логарифмічним, гамма і т.д. розподілами.

В.2.2.6. Періодичні марковські випадкові процеси

Як відомо, марковським випадковим процесом $\{\xi(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}\}$ називається випадковий процес, у якого багатовимірні функції розподілу визначаються одновимірною безумовною функцією розподілу та одновимірними умовними функціями розподілу переходів, а саме:

$$F_k(x_1, \dots, x_k, t_1, \dots, t_k) = F_1(x_1, t_1) \cdot \prod_{j=2}^k F_1(x_j, t_j | x_{j-1}, t_{j-1}), x_j, t_j \in \mathbf{R}, j = \overline{1, k}. \quad (\text{B.52})$$

Марковський випадковий процес називають стаціонарним, якщо сімейство його функцій розподілу є інваріантне відносно зсувів у часі. Якщо сімейство функцій розподілу марковського процесу є періодичним за сукупністю часових аргументів, то кажуть про періодичний марковський випадковий процес [353, 354, 375, 376, 404, 441, 106, 107].

Наведемо означення періодичного марковського випадкового процесу.

Означення В.10. Марковський випадковий процес $\{\xi(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}\}$ називається періодичним, якщо для його одновимірних безумовної та умовної

функцій розподілу мають місце рівності

$$F_1(x, t) = F_1(x, t + T), \quad x, t \in \mathbf{R}, T > 0$$

$$F_1(x_j, t_j | x_{j-1}, t_{j-1}) = F_1(x_j, t_j + T | x_{j-1}, t_{j-1} + T), \quad x_j, t_j \in \mathbf{R}, j = \overline{2, k}. \quad (\text{B.53})$$

Аналогічно можна дати означення періодичного ланцюга Маркова, що набуває значення зі скінченної множин дійсних чисел (множини станів) і заданий на множині цілих або натуральних чисел.

В.2.2.7. Лінійний періодичний та періодично корельований випадкові процеси

Лінійний випадковий процес можна навести у вигляді стохастичного інтеграла:

$$\xi(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t, \tau) \zeta(\omega, \tau) d\tau, \quad \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R} \quad (\text{B.54})$$

або у вигляді інтеграла за стохастичною мірою Стілтєса

$$\xi(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t, \tau) d\eta(\omega, \tau), \quad \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.55})$$

де $\zeta(\omega, t), \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}$ – білий шум у вузькому (широкому розумінні); $\eta(\omega, t), \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}$ – випадковий процес із незалежними (некорельованими) приростами (породжуючий процес), узагальнена похідна від якого є білим шумом $\zeta(\omega, t)$ у вузькому (широкому) розумінні.

Для лінійного випадкового процесу його k -вимірна характеристична функція у формі Леві має вигляд [229]

$$\begin{aligned} \ln f_k(u_1, \dots, u_k; t_1, \dots, t_k) = & \\ = i \sum_{j=1}^k u_j \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t_j) d\mu(\tau) - \sum_{i,j=1}^k u_i u_j \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t_i) \varphi(\tau, t_j) d\sigma(\tau) + & \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[e^{ix \sum_{j=1}^k u_j \varphi(\tau, t_j)} - 1 - \frac{ix}{1+x^2} \sum_{k=1}^n u_j \varphi(\tau, t_j) \right] d_x d_\tau L(x, \tau), & \\ u_1, \dots, u_k; t_1, \dots, t_k \in \mathbf{R}, & \quad (\text{B.56}) \end{aligned}$$

де $L(x, \tau)$ – неозначена в нулі функція, що називається пуассонівським спектром стрибків у формі Леві.

Дана функція означається так:

$$L(x, \tau) = \begin{cases} M(x, \tau), & x < 0, \\ N(x, \tau), & x > 0, \end{cases} \quad (\text{B.57})$$

де $M(x, \tau)$ та $N(x, \tau)$ ($M(-\infty, \tau) = N(\infty, \tau) = 0$) – неспадні функції, що відповідно задають від’ємні та додатні стрибки (прирости) породжуючого процесу.

Функції $\mu(\tau)$ та $\sigma(\tau)$ визначають так:

$$d\mu(\tau) = d\chi_1(\tau) - d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x d_x L(x, \tau), \quad (\text{B.58})$$

$$d\sigma(\tau) = d\chi_2(\tau) - d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} (1+x^2) d_x L(x, \tau), \quad (\text{B.59})$$

де $\chi_1(\tau)$ та $\chi_2(\tau)$ – перша та друга кумулянтні функції породжуючого процесу $\eta(\omega, \tau)$.

Для врахування циклічності сигналів використовують ЛВП із періодичними ймовірнісними характеристикам – лінійні періодичні випадкові процеси (ЛПВП), що є підкласом ЛВП. На основі результатів роботи [228], лінійний випадковий

процес (В.55) буде T -періодичним ($T > 0$) у трьох таких випадках [228].

У загальному випадку:

$$\text{а) } \varphi(t, \tau) = \varphi(t + T, \tau + \alpha T), \alpha \in (-\infty, \infty), \quad (\text{В.60})$$

тобто $\varphi(t, \tau)$ – ядро періодично нестационарної лінійної системи;

$$\begin{aligned} \text{б) } \quad & d\chi_1(\tau) = d\chi_1(\tau + \alpha T), \\ & d\chi_2(\tau) = d\chi_2(\tau + \alpha T), \\ & \partial_x \partial_\tau L(x, \tau) = \partial_x \partial_\tau L(x, \tau + \alpha T), \end{aligned} \quad (\text{В.61})$$

де параметр α має значення відношення періоду приростів породжуючого процесу до періоду лінійного випадкового процесу.

2. Для ядра та параметрів породжуючого процесу ЛВП (В.55) мають місце такі властивості:

а) $\varphi(t, \tau) = \varphi(t - \tau)$ – ядро часоінваріантної лінійної системи;

б) виконуються умови (В.61) при $\alpha = 1$. Тобто $\eta(\omega, \tau)$ – випадковий процес із незалежними T -періодичними приростами.

3. Для ядра та параметрів породжуючого процесу ЛВП (В.55) мають місце такі властивості:

$$\text{а) } \varphi(t, \tau) = \varphi(t + T, \tau),$$

$$\text{б) } \chi_1(\tau) \equiv \mu; \chi_2(\tau) = \sigma^2, L(x, \tau) \equiv L(x), \quad (\text{В.62})$$

тобто породжуючий процес $\eta(\omega, \tau)$ є однорідним.

Лінійний періодично корельований процес – це такий випадковий процес, який можна навести у вигляді конструкції (В.55), де в ролі породжуючого процесу використовується процес із некорельованими приростами. Для елементів конструкції такого випадкового процесу аналогічно умовам (В.60)–(В.62) можна

також вказати умови, коли він буде періодично корельованим, як це є в роботі [112].

В.2.3. Майже періодичні випадкові процеси

Майже періодичні випадкові процеси – це такі випадкові процеси, в яких усі (такі процеси називають майже періодично розподіленими) або деякі ймовірнісні характеристики є майже періодичними функціями. Зокрема, виділяють майже періодично корельовані випадкові процеси, які у ряді робіт закордонних учених називають майже циклостаціонарно корельованими випадковими процесами [201]. Майже періодично корельований випадковий процес як і ПКВП можна навести через стаціонарні випадкові компоненти у вигляді ряду [109]

$$\xi(\omega, t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \xi_k(\omega, t) \cdot e^{i\lambda_k t} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \xi_k(\omega, t) \cdot e^{i \frac{2\pi}{T_k} t}, \quad \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.63})$$

де $\{\xi_k(\omega, t), k \in \mathbf{Z}\}$ – зліченновимірний вектор стаціонарних та стаціонарно пов'язаних у широкому розумінні випадкових процесів; $\{e^{i\lambda_k t}, k \in \mathbf{Z}\}$ – зліченний базис детермінованих комплексних експонент із загалом некрратними частотами.

Математичне сподівання $m_\xi(t)$ та функцію кореляції $B_\xi(t, \tau) = R_\xi(t, t + \tau)$ майже періодично корельованого випадкового процесу також можна навести у вигляді таких рядів:

$$m_\xi(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} m_{\xi_k} \cdot e^{i\lambda_k t} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} m_{\xi_k} \cdot e^{i \frac{2\pi}{T_k} t}, \quad t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.64})$$

$$B_\xi(t, \tau) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} B_{\xi_k}(\tau) \cdot e^{i\lambda_k t} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} B_{\xi_k}(\tau) \cdot e^{i \frac{2\pi}{T_k} t}, \quad t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.65})$$

де $\{m_{\xi_k}, k \in \mathbf{Z}\}$ – множина математичних сподівань; $\{B_{\xi_k}(\tau), k \in \mathbf{Z}\}$ – множина

кореляційних компонент вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових процесів у широкому розумінні $\{\xi_k(\omega, t), k \in \mathbf{Z}\}$.

Майже періодично корельований випадковий процес можна навести і у вигляді інтеграла (В.43) за стохастичною мірою, а його кореляційну функцію – у вигляді інтеграла Стілтєса (В.44) за спектральною бімірою $\mathbf{F}(d\lambda_1, d\lambda_2), \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbf{R}^2$.

Для аналізу сигналів на основі їх математичної моделі у вигляді майже періодичного випадкового процесу розроблено компонентний та фільтровий метод їх опрацювання [109].

Відомим є клас поліперіодично корельованих випадкових процесів [111] як таких, що описують кратну ритміку і є підкласами майже періодично корельованих випадкових процесів. Для поліперіодично корельованого випадкового процесу характерно те, що їх показники Фур'є мають вигляд базису Бола, а саме:

$$\lambda_k = \sum_{j=1}^N n_{kj} \Lambda_j, k, n_{kj} \in \mathbf{Z}, j = \overline{1, N}, \quad (\text{В.66})$$

де $\{\Lambda_j, j = \overline{1, N}\}$ – множина некратних базових частот. Якщо в (В.66) $N = 2$, то в роботі [109] такий процес названо біперіодично корельованим випадковим процесом.

Узагальненням майже періодично корельованого випадкового процесу, на випадок функцій розподілів, є майже періодичний випадковий процес у вузькому сенсі (в роботі [109] його називають майже періодично розподіленим випадковим процесом). Згідно з роботами [109, 119] майже періодично розподіленим випадковим процесом називається такий випадковий процес, параметричні функції розподілу якого є майже періодичними функціями з однією і тією ж самою множиною показників Фур'є. Аналогічно вводяться і класи

квазіперіодично (поліперіодично) розподілених та періодично розподілених випадкових процесів.

Випадкові процеси, які є періодично-, квазі-періодично (поліперіодично) чи майже періодично розподіленими в роботі [109] називаються циклорозподіленими.

В.3. Математичні моделі циклічних сигналів у вигляді квазігармонічних функцій

У випадку гармонічної модуляції несучої, використовують математичні подання модульованого сигналу у вигляді різних модифікацій квазігармонічної функції

$$f(t) = A(t)\cos(\psi(t)), t \in \mathbf{R}, \quad (\text{B.67})$$

де функції $A(t)$ та $\psi(t)$ залежать від інформаційного повідомлення, що закладається у зміну відповідного параметра гармонічної функції. На ці функції накладаються певні обмеження, які зумовлюються вимогою достовірності передавання повідомлення від передавача до приймача й технічними особливостями систем зв'язку [52, 84, 85].

Зокрема, вимагається, щоб швидкість зміни функцій $A(t)$ та $\psi(t)$ була суттєво меншою у порівнянні зі швидкістю зміни несучої (див. рисунки В.4 та В.5).

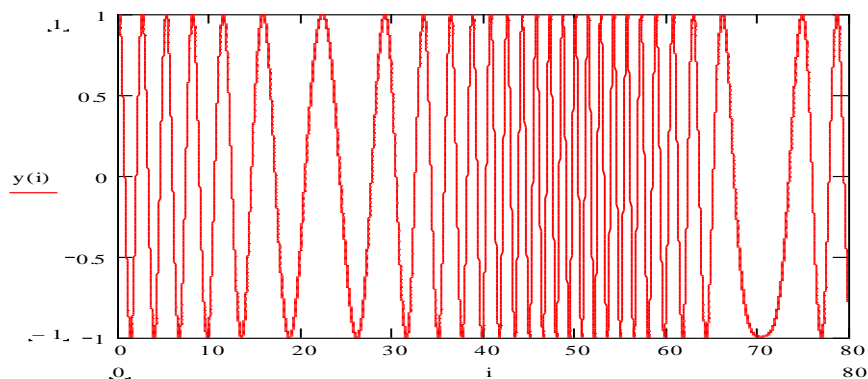


Рис. В.4. Графік квазігармонічної функції (частотно модульований сигнал)

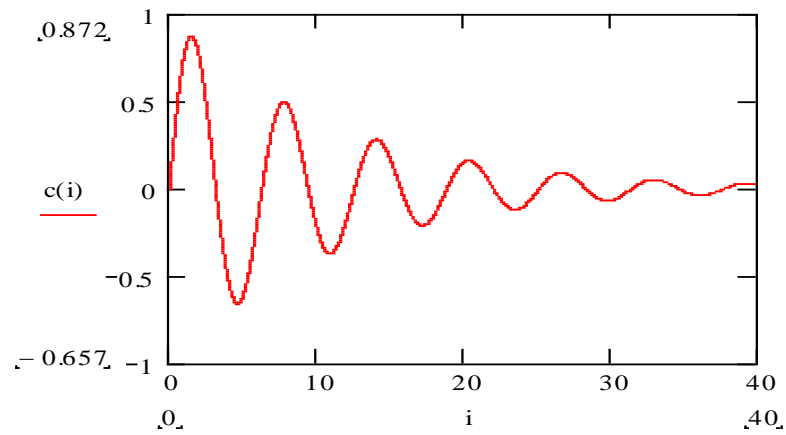


Рис. В.5. Графік квазігармонічної функції (модульований за амплітудою сигнал)

У роботах [52, 84, 85, 128, 162, 313, 371, 374] функції $A(t)$ та $\psi(t)$ розглядаються як детерміновані, так і як стохастичні (випадкові) функції. При стохастичній зміні інформаційного повідомлення функції $A(t)$ та $\psi(t)$ наводять, в основному, у вигляді стаціонарного нормально розподіленого випадкового процесу і проводять дослідження вихідного процесу (радіосигналу) в рамках спектрально-кореляційної теорії випадкових процесів.

Однією із найпростіших квазігармонічних математичних моделей, яка описує коливне явище в рамках стохастичного підходу і здебільшого використовується як тестовий сигнал у вимірювальній техніці, є гармонічна функція із випадковою фазою [84]

$$\xi(\omega, t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi(\omega)), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{В.68})$$

де $A_0 > 0$ – амплітуда коливання; $f_0 > 0$ – частота коливання; $\varphi(\omega)$ – випадкова початкова фаза коливання.

Якщо $\varphi(\omega)$ – випадкова величина, що рівномірно розподілена на півінтервалі $\left[0, \frac{1}{f_0}\right)$, то випадковий процес (В.68) буде вузькосмуговим стаціонарним у широкому розумінні випадковим процесом із нульовим математичним сподіванням та кореляційною функцією

$$R(\tau) = \frac{A_0}{2} \cdot \cos(2\pi f_0 \tau), \tau \in \mathbf{R}. \quad (\text{B.69})$$

Тобто всі реалізації цього процесу є періодичними, а саме гармонічними, але сам процес є стаціонарним у широкому розумінні.

Якщо ж розподіл випадкової величини $\varphi(\omega)$ відмінний від рівномірного, то випадковий процес (B.68) вже буде нестаціонарним (періодично корельованим). Як бачимо, за одних умов (розподіл початкової фази є рівномірним) конструкція (B.68) приводить до формування стаціонарного випадкового процесу, а за інших умов (розподіл початкової фази відмінний від рівномірного) отримуємо нестаціонарний, а саме, періодично корельований випадковий процес.

В.4. Структурні, ієрархічні математичні моделі з ознаками форми, що повторюються

Цікавими з точки зору врахування особливостей циклічних сигналів є математичні моделі, які дозволяють описувати складні медико-біологічні явища, описані в роботах Воробйова С.А. [60, 61-65]. В них пропонується використовувати математичну модель у вигляді реалізації багаторівневого випадкового процесу, який відрізняється роздільними механізмами чергування типів подій та варіаціями їх тривалості.

При цьому процес зміни станів розглядається як послідовність подій, кожна з яких може бути віднесена до одного з кінцевого числа класів. Загальна кількість класів подій m відносно невелике – набагато менше загального числа зміни станів джерела за час спостереження. Для описування механізму зміни станів використовується марковський ланцюг перемикачів. Кожна подія об'єктивно належить одному з m класів. У кожен конкретний момент дискретного часу t може відбуватися тільки одна подія.

Загальна риса всіх запропонованих моделей – послідовність номерів класів подій, є марковським ланцюгом перемикачів з матрицею умовних ймовірностей переходів $Q = \{q_{ij}\}$. Однак цей ланцюг керує тільки чергуванням класів

послідовності подій, але не їх тривалостями. Діагональний елемент матриці тепер визначає тільки можливість послідовної появи двох ділянок одного типу, що не мало сенсу для авторегресійної моделі, але істотно для ділянок повторюваної форми. Тривалостями однорідних ділянок керують різні моделі, не пов'язані з марковським ланцюгом перемикачів. Модель сигналу з ділянками фіксованої довжини пов'язує з кожним класом i -у тривалість T_i подій даного класу. Якщо s -та подія відбулася в момент часу t_s і належало i -ому класу, то наступна $s+1$ подія відбудеться обов'язково в момент часу $t_s + T_i$ і клас цієї події буде залежати лише від класу попередньої події.

Для кожного моменту часу t введені [66–460] поняття класу h_t і фази τ_t . Нехай t_s – момент початку останнього відносно моменту t події, $t_s \leq t$, а i – клас цієї події. Тоді $h_t = i$, $\tau_t = t - t_s + 1$. Пара визначає (h_t, τ_t) – приналежність моменту t . Марковський ланцюг перемикачів визначений не на всій осі t дискретного часу, а в моменти t_s . У рамках даної моделі $q_{ij} = P(h_t = j / h_{t-1} = i, \tau_{t-1} = T_i)$. Перший рівень моделі являє собою двокомпонентний цілочисельний випадковий процес. Реалізацію цього процесу кінцевої довжини для $t=1, \dots, N$ позначаємо $H_1^N = \{h_1, \tau_1, \dots, h_N, \tau_N\}$. Процес повністю характеризується матрицею $Q = \{q_{ij}\}$ і вектором довжин фрагментів $T = \{T_i\}$. Для описування невеликих варіацій тривалості використовують "події–паузи" одиничної довжини.

Розглянута модель марковського неспостережуваного процесу (названий так з долею умовності, оскільки в ряді прикладних задач він недоступний для спостереження) є окремим випадком при виборі T_i , що використовується при розробленні методів вибору типу моделі. У свою чергу, всі запропоновані моделі можна перетворити до марковської, якщо розглядати кожну пару "клас–фаза" як окремий стан марковського ланцюга. Таке перетворення має лише теоретичне значення, оскільки отримана модель для реальних сигналів буде мати близько 106 і більше елементів матриці Q .

Враховуючи даний підхід, Воробйов С.А. запропонував ряд таких математичних моделей: модель з ділянками випадкової величини, модель з

обривними ділянками, модель з повтором середньої форми фрагментів та інші [60]. Розглянемо деякі з них.

В.4.1. Модель з ділянками випадкової довжини

Модель з ділянками випадкової довжини використовується для описування шумоподібних ділянок і використовується для "стикування" з методами обробки таких сигналів. У цій моделі марковський ланцюг як і раніше курує лише чергуванням класів подій. Для отримання розподілу довжин вводиться параметр μ_i , що визначає ймовірність збереження поточного стану. Така модифікація спрощує оцінювання параметрів моделі.

В.4.2. Модель з обривними ділянками

Модель з обривними ділянками передбачає, що подія кожного типу може мати деяку випадкову тривалість у межах максимального для даного класу i значення T_i . Вважають, що подія обов'язково триває час, достатній для появи на реалізації спостережуваного сигналу ділянки характерної форми. Але нова подія може настати до завершення ділянки тривалості T_i і/або затерти "хвіст" даної ділянки, або відповідні еталонні форми підсумовуються залежно від обраної моделі спостережуваного процесу. Тут тривалість події класу i є випадковою величиною, розподіленою на інтервалі $[l, T_i]$. Її розподіл залежить тільки від класу події i і характеризується набором умовних ймовірностей переривання фрагмента w^{il} , де w^{il} – ймовірність того, що перший відлік події класу i є останнім відліком цієї події за умови, що він належить до даної події. Їх отримують з розподілів довжин відрізків $P(\mathcal{G}_i=k)$, де \mathcal{G}_i – тривалість події класу i за формулою

$$w^{il} = P(\mathcal{G}_i=k) / \sum_{l=k}^{T_i} P(\mathcal{G}_i = l). \quad (\text{B.70})$$

Чергуванням номерів класів подій як і раніше керує марковський ланцюг $Q = \{q_{ij}\}$. Використовується додатковий параметр – матриця умовних ймовірностей

переривання фрагмента $W=\{w^{il}\}$. Матриці Q і W близькі за властивостями й можуть бути замінені єдиною матрицею умовних ймовірностей. Однак таке об'єднання збільшить загальне число використовуваних параметрів і зменшить швидкість роботи алгоритмів. Це буде помітно вже для процедури сегментації, але особливо позначиться при оцінюванні невідомих параметрів моделі.

В.4.3. Модель з фрагментами фіксованої довжини і повтором середньої форми фрагментів

Ці моделі використовують найпростішу ознаку – математичне сподівання форми на ділянках реалізації сигналу, що відповідають подіям даного класу. Модель компоненти X_t двокомпонентного випадкового процесу, при цьому набуде такого вигляду: з кожним класом подій i зв'язується еталонна форма $\varphi(i, \tau) = \varphi^{i\tau}$ фрагмента тривалістю T_i . Тоді випадковий процес

$$X_t = \varphi(h_t, \tau_t) + b(h_t)\xi(t) \quad (\text{В.71})$$

являє собою суму цих еталонів і нормального білого шуму $\xi(t)$ з нульовим математичним сподіванням і одиничною дисперсією; $b(h_t) = b^i$ – рівень шуму, що залежить від номера класу $i=h_t$. Відрізок реалізації процесу X_t позначимо $X_t^N = \{x_1, \dots, x_N\}$. Процес повністю характеризується формулою (В.71), матрицею $\Theta = \{\varphi^{ik}\}$ еталонних форм і вектором рівнів шуму $B = \{b^i\}$. Разом з розглянутою моделлю спостережуваного процесу можуть використовуватися всі моделі неспостережуваного процесу. Модель досить універсальна для описування сигналів, що є продуктом технічних або технологічних процесів, але для обробки біомедичних даних зазвичай потрібні складніші моделі [60].

В.4.4. Модель з накладанням сусідніх фрагментів

Моделі з накладанням сусідніх фрагментів використовуються у випадках, коли після настання чергової події сигнал зберігає сліди попередньої, досить

значні для того, щоб їх не можна було адекватно описати адитивним шумом як в моделі (В.71). Модель спостережуваного процесу на випадок перетинання двох сусідніх фрагментів записують так:

$$X_t = \varphi(i, t - u_{s-1} + 1) + \varphi(i, t - u_s + 1)b^i \xi(t). \quad (\text{В.72})$$

Аналогічним чином можна розширити модель для випадку трьох або більше фрагментів, що перетинаються. З цією моделлю спостережуваного процесу найзручніше використовувати моделі неспостережуваного процесу з ділянками, що обриваються або з ділянками випадкової довжини.

В.4.5. Модель з багатоеталонним завданням форми фрагментів

Цю модель використовують для сигналів з великою різноманітністю форм на однотипних ділянках, як правило, біологічного походження. Для описування ним поведінки такого сигналу на ділянці класу i використовують набір n_i еталонних форм $s\varphi^{ik}$. Кожен момент часу t характеризується, крім класу h_t і фази τ_t , варіантом еталона $v_t = 1, \dots, n_i$, що використовується. Протягом одного фрагмента значення v_t не змінюється. Процес X_t формується так:

$$X_t = s\varphi^{ik} + b^i \xi(t), \quad (\text{В.73})$$

де $i = h_t, k = \tau_t, s = v_t$. Модель передбачає або можливість появи на кожній конкретній ділянці даного класу кожного з n_i варіантів форми з рівними можливостями $1/n_i$, або можливість появи протягом даної реалізації тільки одного варіанта форми для ділянок даного класу. Ця модель поєднується з будь-якою моделлю неспостережуваного процесу. Вона характеризується ще одним параметром – вектором розмірності наборів еталонів $\mu(m) = \{n_1, \dots, n_m\}$.

В.4.6. Модель із завданням форми фрагментів лінійною комбінацією еталонних форм

Даний тип моделі використовує в якості ознаки форми сигналу на ділянках i -го типу розкладання по базису еталонів. Кожному типу i від 1 до m як і раніше ставимо у відповідність n_i базисних еталонів $r\varphi^{ik}$, де $i = h_i, k = \tau_i, r = 1, \dots, n_i$. Зазвичай достатньо два, три елементи в базисі для ефективної роботи алгоритму [60]. Спостережуваний процес X_t утворюється так:

$$X_t = \sum_{r=1}^{n_i} \alpha_r r\varphi^{ik} + b^i \xi(t), \quad (\text{B.74})$$

причому $\sum_{r=1}^{n_i} \alpha_r = 1$ і $0 \leq \alpha_r \leq 1$ для всіх $r = 1, \dots, n_i$.

Набір коефіцієнтів α_r залишається незмінним протягом даного фрагмента. Дана модель може використовуватися з будь-якою моделлю неспостережуваного процесу. Параметр $\mu(m) = \{n_1, \dots, n_m\}$ є тут розмірністю базисного набору еталонних форм для кожного класу. На відміну від попередніх, цей спосіб задає не точку в просторі ознак, а обсяг – опуклу лінійну оболонку, що дозволяє досить простим способом описувати значні варіації форми спостережуваного сигналу.

В.4.7. Ієрархічні моделі процесів

Дані моделі використовуються при тривалих спостереженнях, коли реєструється велика кількість подій і ймовірнісні характеристики неспостережуваного процесу в ході спостереження змінюються, причому неодноразово, і ці зміни відображають деякі зміни об'єкта. Для описування таких сигналів використовується модель трирівневого процесу [67, 68]. Процес першого рівня управляє джерелом, що генерує процес другого рівня, той, у свою чергу, управляє джерелом, що генерує процес третього рівня. Спостерігаємо тільки процес третього (нижнього) рівня, решта – неспостережувані. Позначимо процес першого рівня g_t . Він визначений на кінцевій порівняно невеликій множині

значень $g_t=1, \dots, m_0$. Будемо описувати його за допомогою дискретного ланцюга Маркова з матрицею умовних ймовірностей переходів

$$R = \{r^{ij}\}, r^{ij} = P(g_t = j / g_{t-1}), i, j = 1, \dots, m_0. \quad (\text{B.75})$$

Реалізацію цього процесу для $t=1, \dots, N$ позначимо $G_1^N = \{g_1, \dots, g_N\}$. Очевидно, що діагональні елементи матриці $r_{ii} > r_{ij}$. Для процесу другого рівня можна використовувати будь-яку модель неспостережуваного процесу. Параметри процесу (h, τ) залежать від поточного стану $g_t=i$ процесу першого рівня. При цьому змінюються або всі ймовірні властивості процесу, або тільки деякі з них. Так, замість однієї матриці Q умовних ймовірностей переходів матимемо m_0 матриць iQ , $i=1, \dots, m_0$, причому в кожен момент часу t використовується тільки одна з них. Оскільки діагональні елементи матриці R набагато більші за інші, час безперервного використання однієї і тієї ж матриці iQ досить тривалий. Крім того, можлива зміна довжин однорідних фрагментів – замість вектора T довжин еталонів у цьому випадку маємо m_0 векторів iT , $i=1, \dots, m_0$. Можуть змінюватися й інші параметри. У ряді прикладних задач обмежуємо кількість змінних параметрів процесів другого рівня. Як правило, це або матриця Q умовних ймовірностей, або матриця умовних ймовірностей переривання фрагмента W , інші параметри процесу незмінні.

Спостережуваний процес третього рівня при цьому може бути будь-яким із запропонованих вище. Оскільки він залежить тільки від поточного стану процесу другого рівня, ніякої зміни в зв'язку зі збільшенням числа рівнів у цих моделях не відбудеться. Аналогічно будуються моделі, які мають чотири і більше ієрархічних рівнів [60].

В.5. Циклічні випадкові процеси

В.5.1. Циклічні випадкові процеси неперервного та дискретного аргументу

До таких моделей відноситься цілий клас математичних моделей, описаних

у роботах Лупенка С.А. [201, 200, 202, 205]. Циклічні випадкові процеси можуть бути задані цілим спектром своїх ймовірнісних характеристик. Тому можна означити цілі класи випадкових процесів за певною ознакою циклічності їх відповідних ймовірнісних характеристик. Наприклад, циклічно розподілений випадковий процес (циклічний випадковий процес), циклічний випадковий процес відносно сукупності його умовних функцій розподілу, циклічний випадковий процес відносно сукупності функцій розподілу його приростів (випадковий процес із циклічними приростами) та інші. Розглянемо в загальному означення циклічного випадкового процесу.

Означення В.11. Сепарабельний випадковий процес $\xi(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}$ називається циклічним випадковим процесом неперервного аргументу, якщо існує така функція $T(t, n)$, яка задовольняє умовам функції ритму, що скінченновимірні вектори $(\xi(\omega, t_1), \xi(\omega, t_2), \dots, \xi(\omega, t_k))$ та $(\xi(\omega, t_1 + T(t_1, n)), \xi(\omega, t_2 + T(t_2, n)), \dots, \xi(\omega, t_k + T(t_k, n)))$, $n \in \mathbf{Z}$, де $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ – множина сепарабельності процесу $\xi(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}$, при всіх цілих $k \in \mathbf{N}$ є стохастично еквівалентними у широкому розумінні [205].

Для циклічного випадкового процесу неперервного аргументу характерно те, що сімейство його узгоджених функцій розподілу задовольняє таким рівностям:

$$\begin{aligned} F_{k_\xi}(x_1, \dots, x_k, t_1, \dots, t_k) &= F_{k_\xi}(x_1, \dots, x_k, y(t_1, n), \dots, y(t_k, n)) = \\ &= F_{k_\xi}(x_1, \dots, x_k, t_1 + T(t_1, n), \dots, t_k + T(t_k, n)), x_1, \dots, x_k, t_1, \dots, t_k \in \mathbf{R}, n \in \mathbf{Z}, k \in \mathbf{N}. \end{aligned} \quad (\text{В.76})$$

Іншими словами, циклічний випадковий процес (ЦВП) – це такий випадковий процес, функції розподілу якого за сукупністю часових аргументів є інваріантними до зліченної біциклічної розривної групи перетворень $\Gamma = \{T_n(t) = y(t, n), n \in \mathbf{Z}\}$, які задовольняють умовам функції ритму. Для циклічного випадкового процесу сімейство його характеристичних функцій та

моментних функції (якщо вони існують) задовольняють рівностям, які аналогічні рівностям (В.76).

Якщо функція ритму $T(t, n) = n \cdot T, T = \text{const}, T > 0$, то будемо мати випадковий циклічний процес зі стабільним ритмом, який у літературних джерелах відомий як стохастично періодичний процес (циклостаціонарний випадковий процес, періодично розподілений випадковий процес). Якщо $T(t, n) \neq n \cdot T$, то будемо мати випадковий циклічний процес зі змінним ритмом.

Наведемо означення циклічного випадкового процесу із дискретним аргументом, оскільки на практиці в цифрових системах опрацювання циклічних сигналів завжди доводиться мати справу з дискретними аргументами.

Означення В.12. Дискретний випадковий процес $\xi(\omega, t_j)$, $\omega \in \Omega, t_j \in \mathbf{D}$ називається циклічним дискретним випадковим процесом, якщо існує така дискретна функція $T(t_j, n)$, яка задовольняє умовам функції ритму, що скінченновимірні вектори $(\xi(\omega, t_{j1}), \xi(\omega, t_{j2}), \dots, \xi(\omega, t_{jk}))$ та $(\xi(\omega, t_{j1} + T(t_{j1}, n)), \xi(\omega, t_{j2} + T(t_{j2}, n)), \dots, \xi(\omega, t_{jk} + T(t_{jk}, n)))$, $n \in \mathbf{Z}$ при всіх цілих $k \geq 1$ є стохастично еквівалентними у широкому розумінні [205].

Для дискретного циклічного випадкового процесу сімейство його функцій розподілу задовольняє рівностям

$$F_{k\xi}(x_1, \dots, x_k; t_{j1}, \dots, t_{jk}) = F_{k\xi}(x_1, \dots, x_k; t_{j1} + T(t_{j1}, n), \dots, t_{jk} + T(t_{jk}, n)),$$

$$x_1, \dots, x_k \in \mathbf{R}, t_{j1}, \dots, t_{jk} \in \mathbf{D}, n \in \mathbf{Z}, k \in \mathbf{N}. \quad (\text{В.77})$$

Відзначимо той факт, що коли областю визначення циклічного дискретного випадкового процесу є множина цілих чисел ($\mathbf{D} = \mathbf{Z}$), тобто матимемо випадкову послідовність, то у цьому випадку ЦВП не може бути зі змінним ритмом. Він

може бути лише періодичним, оскільки у такому разі неможливо задати мінливий характер ритмічної структури процесу – його ритмічна структура є стабільною й визначається періодом, який є цілим додатнім числом, що більше за одиницю [205].

Про циклічний випадковий процес із сегментною структурою сказано в додатку Ж. Деякі інші математичні моделі циклічних випадкових процесів наведено в додатку З.

В.5.2. Вектор циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів

Для сумісного опрацювання циклічних сигналів необхідно враховувати вектор ЦВП, у якому випадкові процеси пов'язані через ритмічну структуру.

Означення В.13. Вектор $\Theta_N(\omega, t)$ циклічних випадкових процесів $\left\{ \xi_i(\omega, t), i = \overline{1, N}, \omega \in \Omega, t \in \mathbf{W} \right\}$ будемо називати вектором циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів, а самі циклічні процеси – ритмічно пов'язаними, якщо існує така функція $T(t, n)$, яка задовольняє умовам функції ритму, що скінченновимірні вектори $\left\{ \xi_{i_1}(\omega, t_1), \xi_{i_2}(\omega, t_2), \dots, \xi_{i_k}(\omega, t_k) \right\}$ та $\left\{ \xi_{i_1}(\omega, t_1 + T(t_1, n)), \xi_{i_2}(\omega, t_2 + T(t_2, n)), \dots, \xi_{i_k}(\omega, t_k + T(t_k, n)) \right\}$ $n \in \mathbf{Z}, i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}$, де $\{t_1, \dots, t_k\}$ – множина сепарабельності вектора $\Theta_N(\omega, t)$, при всіх цілих $k \in \mathbf{N}$ є стохастично еквівалентними у широкому розумінні [205].

У частинному випадку, коли $T(t, n) = n \cdot T, T = \text{const}, T > 0$, із вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів (циклічного випадкового процесу) отримується відомий математичний об'єкт – вектор періодично пов'язаних випадкових процесів (періодичний випадковий вектор) [107].

У випадку, коли вектор $\Theta_N(\omega, t)$ містить лише одну компоненту ($N = 1$), із нього отримується циклічний випадковий процес $\xi(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}$.

Нижче наведені основні властивості ймовірнісних характеристик вектора $\Theta_N(\omega, t)$ циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів [202].

Властивість ймовірнісних характеристик вектора $\Theta_N(\omega, t)$ циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів, а саме, сумісна k – вимірна функція

розподілу визначається

$$\begin{aligned}
 F_{k, \xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) &= F_{k, \xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}(x_1, \dots, x_k; y(t_1, n), \dots, y(t_k, n)) = \\
 &= F_{k, \xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}(x_1, \dots, x_k; t_1 + T(t_1, n), \dots, t_k + T(t_k, n)), \quad k \in \mathbf{N}, n \in \mathbf{Z}, i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}, t_1, \dots, t_k \in \mathbf{W}. \quad (\text{B.78})
 \end{aligned}$$

де $y(t_1, n), \dots, y(t_k, n)$ – структурні функції циклічних випадкових процесів [205].

Змішана початкова моментна функція порядку $p = \sum_{j=1}^k R_j$

$$\begin{aligned}
 c_{p, \xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}(t_1, \dots, t_k) &= \mathbf{M} \left\{ \xi_{i_1}^{\xi_{i_1} R_1}(\omega, t_1) \cdot \dots \cdot \xi_{i_k}^{\xi_{i_k} R_k}(\omega, t_k) \right\} = \\
 &= c_{p, \xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}(t_1 + T(t_1, n), \dots, t_k + T(t_k, n)), \quad t_1, \dots, t_k \in \mathbf{W}, i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}, n \in \mathbf{Z}. \quad (\text{B.79})
 \end{aligned}$$

Змішана центральна моментна функція порядку $p = \sum_{j=1}^k R_j$

$$\begin{aligned}
 r_{p, \xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}(t_1, \dots, t_k) &= \mathbf{M} \left\{ \left(\xi_{i_1}^{\xi_{i_1}}(\omega, t_1) - m_{\xi_{i_1}}^{\xi_{i_1}}(t_1) \right)^{R_1} \cdot \dots \cdot \left(\xi_{i_k}^{\xi_{i_k}}(\omega, t_k) - m_{\xi_{i_k}}^{\xi_{i_k}}(t_k) \right)^{R_k} \right\} = \\
 &= r_{p, \xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}(t_1 + T(t_1, n), \dots, t_k + T(t_k, n)), \quad t_1, \dots, t_k \in \mathbf{W}, i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}, n \in \mathbf{Z}. \quad (\text{B.80})
 \end{aligned}$$

Використання поняття ритмічної пов'язаності циклічних випадкових процесів розширює сферу застосування стохастичного підходу до моделювання та сумісного аналізу взаємопов'язаних циклічних сигналів із однаковою ритмічною структурою [205].

В.6. Класифікація та порівняльна характеристика відомих математичних моделей циклічних сигналів

У таблиці В.1 наведено класифікацію та порівняльну характеристику математичних моделей циклічних сигналів та моделей, використаних у дисертаційній роботі (обведено рамкою).

Таблиця В.1

Порівняння математичних моделей циклічних сигналів

		ВЛАСТИВОСТІ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ									
		МОРФОЛОГІЧНІ			РИТМІЧНІ			ІНШІ ВЛАСТИВОСТІ			
		ВРАХОВУЮТЬ ЦИКЛІЧНІСТЬ СИГНАЛІВ	ВРАХОВУЮТЬ СЕГМЕНТНУ СТРУКТУРУ	ВРАХОВУЮТЬ ДОВЖІЙНІСТЬ АТРИБУТУ ЦИКЛІЧНОСТІ	МІНЛИВІСТЬ РИТМУ (СТАБІЛЬНІСТЬ, ЗМІННІСТЬ)	ЗМІНА РИТМУ ЗА ДОВЖІЙНИМ ЗАКОНОМ	СПІЛЬНІСТЬ РИТМУ	НЕВІЗНАЧЕНІСТЬ, НЕТОЧНІСТЬ, ВИПАДКОВІСТЬ СИГНАЛІВ	МОЖЛИВІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ СЕГМЕНТНОЇ СТРУКТУРИ	МОЖЛИВІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ РИТМУ	
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ВІДОМІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ	ДЕТЕРМІНОВАНІ	ГАРМОНІЧНА ФУНКЦІЯ	+	-	-	-	-	-	-	-	+/-
		ПЕРІОДИЧНА ФУНКЦІЯ	+	-	-	-	-	-	-	-	+/-
		КВАЗІГАРМОНІЧНА ФУНКЦІЯ	+/-	-	-	+	+	-	-	-	+/-
		МАЙЖЕ ПЕРІОДИЧНА ФУНКЦІЯ	+/-	-	-	+/-	+/-	-	+/-	-	+/-
		КВАЗІМЕАНДР (МОДУЛЬОВАНИЙ МЕАНДР)	+	-	-	+	+	-	-	-	+/-
		ЦИКЛІЧНА ЧИСЛОВА ФУНКЦІЯ	+	+/-	+	+	+	-	-	+/-	+
		ЦИКЛІЧНА ЧИСЛОВА ФУНКЦІЯ ІЗ СЕГМЕНТНОЮ СТРУКТУРОЮ	+	+	+	+	+	-	-	+	+

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ВІДОМІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ	СТОХАСТИЧНІ	ВЕКТОР ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН	-	+/-	-	-	-	-	+	-	-
		СТАЦІОНАРНИЙ ВИПАДКОВИЙ ПРОЦЕС	+/-	-	-	-	-	-	+	-	+/-
		СТОХАСТИЧНО ПЕРІОДИЧНИЙ ПРОЦЕС (ПКВП, ПРВП, ЛПВП І Т.П.)	+	+/-	-	+/-	+/-	-	+	+/-	+/-
		ПЕРІОДИЧНИЙ ВИПАДКОВИЙ ВЕКТОР	+	+/-	-	-	-	+	+	+/-	+/-
		МАЙЖЕ ПЕРІОДИЧНИЙ ВИПАДКОВИЙ ПРОЦЕС	+/-	+/-	-	+/-	-	-	+	-	+/-
		КВАЗІГАРМОНІЧНИЙ ВИПАДКОВИЙ ПРОЦЕС	+/-	-	-	+/-	+/-	-	+	-	+/-
		СТРУКТУРНІ, ІЄРАРХІЧНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ	+/-	+/-	-	+/-	+/-	-	+	-	+/-
		ВЕКТОР ПЕРІОДИЧНИХ У ЧАСІ З РІЗНИМИ ПЕРІОДАМИ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ	+	+/-	-	+	+/-	-	+	+/-	+/-
		ВЕКТОР ЦИКЛІЧНИХ РИТМІЧНО ПОВ'ЯЗАНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ	+	+/-	-	+	+	+	+	+/-	+
		ЦИКЛІЧНИЙ ВИПАДКОВИЙ ПРОЦЕС	+	+/-	+	+	+	-	+	+/-	+/-
ЦИКЛІЧНИЙ ВИПАДКОВИЙ ПРОЦЕС ІЗ СЕГМЕНТНОЮ СТРУКТУРОЮ	+	+	+	+	+	-	+	+	+		

“+” - враховує (відображає), “-” - не враховує (не відображає),

“+/-” - враховує (відображає) частково.

Додаток Д

Відомі методи сегментації циклічних сигналів. Таблиця порівняння методів сегментації в системах цифрового опрацювання циклічних сигналів

У багатьох задачах аналізу циклічних сигналів постає завдання їх сегментації – розбиття на певні характерні сегменти (цикли, зони). Відомості про сегментну структуру циклічного сигналу необхідні для оцінювання його ритмічної структури, що, у свою чергу, дає змогу провести дискретизацію й статистичний аналіз циклічних сигналів та отримати необхідну інформацію для проведення діагностики чи прогнозування.

Відомими методами сегментації умовно можна поділити на ті які використовують детермінований підхід та ті які використовують стохастичний підхід.

Д.1. Детермінований підхід

Д.1.1. Методи, засновані на хвильовому перетворенні

В останні роки широкого використання набули методи, засновані на хвильовому перетворенні [121, 357, 411].

Існує безперервне вейвлет-перетворення (CWT) та дискретне вейвлет-перетворення (DWT). Безперервне вейвлет-перетворення в різних часових масштабах характеризує сигнал у різних частотних діапазонах, а дискретне вейвлет-перетворення (DWT) обмежене масштабами, які є степенями двійки.

Розглянемо метод сегментації на основі використання безперервного вейвлет-перетворення наведеного у роботі [121].

Нехай $s(t)$ – сигнал і ψ – вейвлет. При безперервному перетворенні вейвлет-коефіцієнти сигналу $s(t)$ відповідають масштабному коефіцієнту a і положенню b , визначаються за формулою [307]

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (Д.1)$$

Для вибору оптимального вейвлета, який використовується в якості базису, вибирається той, який забезпечує правильне розташування координат дев'яти точок кардіоциклу: початок, пік і зміщення Р-зубця, QRS-комплексу та Т-зубця. В роботах [435, 459] застосовуються біортогональні вейвлети з компактним носієм, використовуючи масштаби, кратні ступеню двійки. У роботах [459, 450] використовуються гауссові вейвлети (передвейвлети). Найкращим вейвлет-носієм, що задовольняє вимогам, пропонується біортогональний вейвлет [121]. В якості масштабу, що використовується для визначення правильного розташування дев'яти координат точок ЕКС, використано масштабний коефіцієнт, що дорівнює 15 для виявлення QRS-комплексу [358, 360, 408, 450, 459] і масштабний коефіцієнт, що дорівнює 41 для виявлення Р і Т зубців [459]. Масштабні коефіцієнти 15 і 41 забезпечують найбільшу точність у виявленні даних зубців при виборі вейвлета «bior1.5», згідно з роботою [121].

Д.1.2. Методи, засновані на нейронних мережах

Для розв'язку задачі класифікації ефективними методами є методи, засновані на нейронних мережах [362, 437, 455, 468], які володіють властивостями, заснованими на досвіді навчання та є стійкими до присутності помилок за умови навчання по великій базі репрезентативних циклічних сигналів.

В основі таких алгоритмів може бути покладений перцептрон, який має один зовнішній шар та один прихований шар [287]. Мережа навчається, шукаючи схожість між взірцями (образами) безпосередньо в міру їх представлення в навчаючій вибірці, що подається на вхід. Правила класифікації виводяться із навчаючих даних без використання апріорної інформації про розподіли класів образів у цих даних. Для навчання класифікатора зазвичай використовують алгоритм зворотного розподілу [362, 437, 455]. Алгоритм навчання класифікатора повторюється до тих пір, поки помилки між входом і фактичними виходом, що вимагається, для навчаючої вибірки не стануть менше, ніж деяка наперед задана порогова величина.

Д.1.3. Метричні методи аналізу амплітудних характеристик сигналу, засновані на використанні порогів

До метричних методів, які засновані на використанні порогів, відносять метод пошуку моменту часу перетину фронту зони R із заданим пороговим значенням [1, 41, 185, 300, 301, 359, 462]. Недолік цього методу полягає в його нестійкості у випадку дрейфу ізопотенціальної лінії. Такий метод був удосконалений за рахунок використання двох порогових значень. Одне значення приймалося над ізопотенціальною лінією, а інше – під нею [160]. Отримані точки перетину з ЕКС умовно з'єднувалися похилою прямою до перетину з ізопотенціальною лінією. Точка перетину ізопотенціальної лінії вважалася початком діагностичної зони. Метод „адаптивного пошуку” зони R є різновидом метричних методів. Ідея методу полягає в знаходженні серед масиву даних максимального значення сигналу R_{\max} . Вважається, що максимум відповідає деякій зоні R на реалізації ЕКС. Визначене значення використовується як верхня межа діапазону пошуку інших максимумів сегментів-R, а нижня межа вираховується за формулою $(0,125 \div 0,66) \cdot R_{\max}$. Нижня межа діапазону, що відповідає максимальній амплітуді зони T, була експериментально встановлена лікарями-діагностами. Даний метод володіє недоліком, який проявляється в випадку, коли сегменти R мають малу амплітуду у порівнянні з P або T сегментами або у випадку роздвоєння, розтросення сегмента R. Некоректне визначення діагностичних зон метричними методами призводить до хибних результатів діагностики.

Д.1.4. Метричні методи, засновані на використанні похідної (різницевої функції)

До таких метричних методів відносяться методи наведені у роботах [287, 439, 350, 433]: аналіз різницевої функції першого порядку (першої похідної) сигналу та порівняння її екстремумів з пороговими значеннями; аналіз допоміжних залежностей типу „функції форми”, „узагальненої енергетичної функції” та інших модифікацій методу в основу яких покладена похідна.

В роботі [287] використовується алгоритм для сегментації QRS-комплексу, заснований на використанні першої похідної. За цим методом апроксимується згладжена по трьох точках перша похідна $y_0(n)$ від вхідного сигналу $x(n)$. Похідна визначається

$$y_0(n) = |x(n) - x(n-2)|. \quad (\text{Д.2})$$

Друга похідна апроксимується

$$y_1(n) = |x(n) - 2 \cdot x(n-2) + x(n-4)|. \quad (\text{Д.3})$$

Ці два результати зважуються та комбінуються, що дає

$$y_2(n) = 1.3 \cdot y_0(n) + 1.1 \cdot y_1(n). \quad (\text{Д.4})$$

Результуючий сигнал $y_2(n)$ сканується з використанням порога, що дорівнює 1,0. У випадках, де сигнал перетинає поріг, наступні вісім відліків також перевіряються з даним порогом. У випадку, коли шість із восьми значень і відліків які їм відповідають, проходять тест, тоді даний сегмент, що складається із восьми відліків, вважається частиною QRS-комплексу. Даний метод дуже чутливий до присутності шумів.

У роботі [287] запропонований метод виявлення QRS-комплексу, заснований на зваженому піднесеному до квадрата операторі першої похідної із використанням фільтра ковзного середнього. В цьому випадку оператор похідної визначається

$$g_1(n) = \sum_{i=1}^N |x(n-i+1) - x(n-i)|^2 (N-i+1), \quad (\text{Д.5})$$

де N – ширина вікна, в межах якого різниця першого порядку визначається, підноситься до квадрата і зважується з використанням коефіцієнта $(N - i + 1)$. Зважений коефіцієнт лінійно спадає, починаючи від поточної різниці до різниці, яка вирахована на N відліків раніше за часом, що забезпечує згладжуючий ефект. Далі згладження відбувається з використанням фільтра ковзного середнього

$$g(n) = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} g_1(n - j). \quad (\text{Д.6})$$

При частоті дискретизації 100 Гц ширина вікна $N = M = 8$. Даний алгоритм дозволяє виділити R-сегмент. Подальші кроки алгоритму пов'язані з використанням порогів і пошуку їх перетину в сигналі $g(n)$.

При опрацюванні ЕКС від трьох відведень використовують метод сегментації, заснований на використанні першої та другої похідних [1], при цьому використовують множник граничної форми

$$M(k) = C_1 \sum_{i=1}^3 x_i'(k) + C_2 \sum_{i=1}^3 x_i''(k), \quad (\text{Д.7})$$

де C_1, C_2 – константи; $x_i(k)$ – ЕКС відповідного відведення. При цьому похідні (різниці першого та другого порядку) визначаються за формулами

$$x_i'(k) = x_i(k + 1) - x_i(k - 1), \quad (\text{Д.8})$$

$$x_i''(k) = x_i(k + 2) - 2 \cdot x_i(k) + x_i(k - 2). \quad (\text{Д.9})$$

Використовуючи даний метод, визначають сегменти ЕКС.

Д.1.5. Методи, засновані на використанні еталонних форм

Головна ідея методу еталонів [95, 466] полягає у тому, що один із комплексів QRS на початку аналізу ЕКС приймається за еталон. Далі відбувається його співставлення з іншими QRS – комплексами залежно від обраної метрики близькості (наприклад, середньоквадратична, рівномірна, кореляційна, Д.10-Д.12). Цей метод має велику завадостійкість. Але головний недолік його полягає в тому, що невдалий вибір зашумленого еталона призведе до помилок при його порівнянні з іншими ділянками ЕКС.

$$\rho(x, y) = \sqrt{\sum (x_i - y_i)^2}, \quad (\text{Д.10})$$

$$\rho(x, y) = \sup_i |x_i - y_i|, \quad (\text{Д.11})$$

$$\rho(x, y) = \sum |x_i - y_i|. \quad (\text{Д.12})$$

При застосуванні цього методу отримується інформація лише про сегменти-цикли. Для отримання інформації про дрібніші сегменти необхідно проводити додаткову сегментацію на виділених сегментах-циклах.

Д.1.6. Приклади циклічних сигналів (електрокардіосигналів), при опрацюванні яких відомі методи сегментації, некоректно виділяють діагностичні сегменти (діагностичні зони)

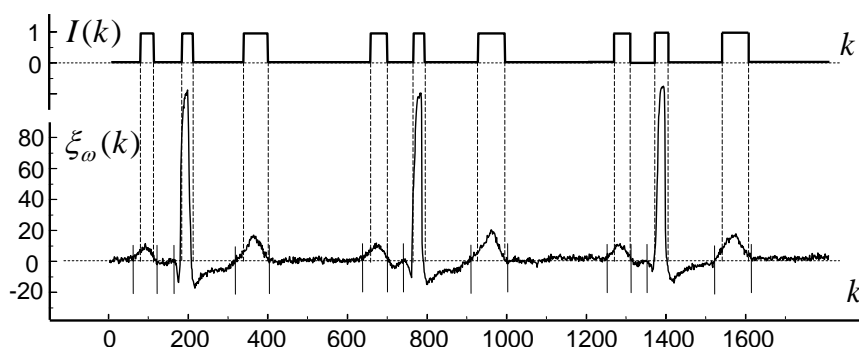


Рис. Д.1. Виділення діагностичних сегментів методом різницевої функції першого порядку, реалізація ЕКС у нормі, суцільні лінії – виділені діагностичні зони

лікарем-діагностом

На рисунках Д.1–Д.5 наведено приклади електрокардіосигналів та здійснено сегментацію відомими методами. Результати сегментації (виділені сегменти) зображено у вигляді індикаторних функцій, які відображають діагностичні сегменти.

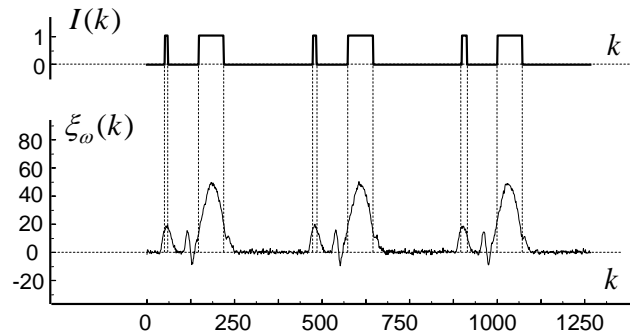


Рис. Д.2. Виділення діагностичних сегментів методом різницевої функції першого порядку, реалізація ЕКС при патології – блокада правої ніжки пучка Гіса (амплітуда зони «г» менша в порівнянні з іншими зонами)

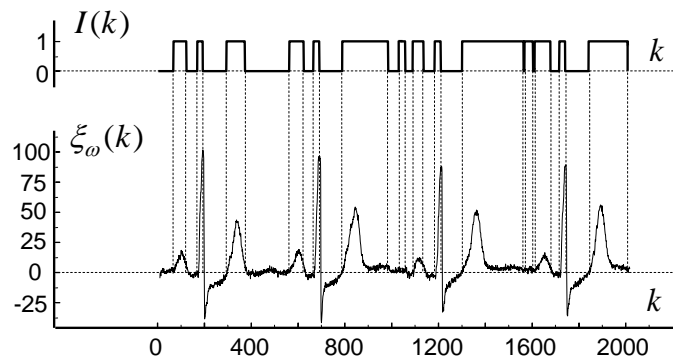


Рис. Д.3. Виділення діагностичних сегментів методом різницевої функції другого порядку, реалізація ЕКС в нормі (завада – тренд)

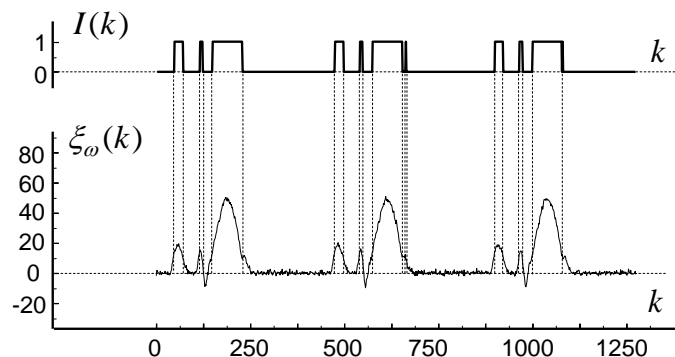


Рис. Д.4. Виділення діагностичних сегментів методом різницевої функції другого порядку, реалізація ЕКС при патології – блокада правої ніжки пучка Гіса (амплітуда зони «г» менша в порівнянні з іншими зонами)

З поданих графіків бачимо, що методи сегментації не завжди коректно визначають межі сегментів реальних циклічних сигналів та адекватно розв'язують задачу сегментації.

Д.2. Стохастичний підхід (статистичні методи)

При аналізі циклічного сигналу широко використовують стохастичний підхід. При цьому сигнал розглядають як реалізацію деякого випадкового процесу. Сегментація такого сигналу тісно пов'язана з проблемою виявлення моментів зміни властивостей циклічних випадкових процесів. Вона полягає у знаходженні меж між однорідними фрагментами, і може бути сформульоване як завдання з виявлення кількох моментів розладок випадкового процесу.

Існуючі методи опрацювання сигналів, які мають повторювану структуру, можуть бути поділені на три основні групи. До першої групи відносяться алгоритми, які не використовують математичні моделі сигналу, а засновані лише на припущенні, що він складається із однорідних фрагментів з приблизно постійними значеннями деяких ознак форми, але при цьому значення ознак на сусідніх фрагментах відрізняються. Опис фрагментів і механізмів їх чергування при цьому не пропонується, лише необхідний вибір певного набору ознак форми сигналу, а також деякий критерій однорідності його поведінки на фрагменті. Це алгоритми, що використовують для сегментації різні функції складності, які характеризують ступінь мінливості поведінки процесу на даній ділянці. Вони спрямовані на поділ реалізації на окремі фрагменти так, що ознаки форми відносно постійні всередині фрагментів і сильно змінюються на їхніх межах. Сюди ж можна віднести алгоритми сегментації за заданим критерієм, алгоритми кускової й часткової апроксимації за допомогою многочленів і за деякою системою базисних функцій.

У загальному випадку розв'язати задачу сегментації, коли математичні моделі розглядають у вигляді циклічного випадкового процесу, є складно, оскільки завжди необхідно уточнити, конкретизувати апріорну інформацію про його ймовірнісні характеристики, зокрема мати відомості про особливості

ймовірносних характеристик випадкового процесу в ті моменти часу, які відповідають початкам його сегментів-циклів чи сегментів-зон.

Завдання сегментації (виділення зонної та циклічної структур) циклічного випадкового процесу сформульована у роботі [418].

Д.2.1. Методи сегментації, засновані на основі пошуку розладок

У випадку, коли випадковий процес є КСВП, що має повторювану структуру, задача його сегментації може бути розв'язана шляхом використання відомих методів пошуку розладки випадкових процесів [29, 31, 34, 36, 37, 38, 40, 42, 59, 77, 78, 79, 96, 98, 99, 138, 142, 246, 247, 402, 442, 453]. Такий підхід (на основі пошуку розладок випадкового процесу) широко використовується для аналізу медичних даних, наприклад, електроенцефалограм – сигналів, які відображають стан мозкової активності людини [31, 40].

Серед науковців, які займалися проблемами математичного моделювання та аналізу процесів із розладками можна назвати Бородкіна Л.І., Бродського Б.Е., Дарховського Б.С., Клігене Н.І., Колмогорова А.М., Ліпейка А.К., Монтвіласа А.М., Нікіфорова І.В., Пейджа Е.С., Тельксніса Л.А., Воробейчикова С, Коньєва В., Моттля В., Ширяєва А.М., Марченка Б.Г., Nadler J., Robbins N., Segen J., Sanderson A. Розглянемо деякі відомі методи та критерії виявлення розладки, що можуть бути адаптовані та використані для створення методів сегментації циклічного КСВП, який має повторювану структуру.

Розрізняють два підходи щодо побудови методів виявлення розладки випадкового процесу – непараметричні та параметричні. Крім цього, за способом отримання інформації про об'єкт, який аналізують, розрізняють апостеріорний і послідовний аналізи.

В багатьох літературних джерелах вживають термін розладка (розладнання) або дефект. Розглянемо типи розладок (дефектів) випадкових процесів.

Д.2.2. Типи розладок випадкових процесів

1. Розладка – однократна, стрибкоподібна зміна математичного сподівання,

$$z(n) \in N(\mu_1, \beta_1), n \in [0, n_0]$$

$$z(n) \in N(\mu_2, \beta_1), n \in [n_0 + 1, N]$$

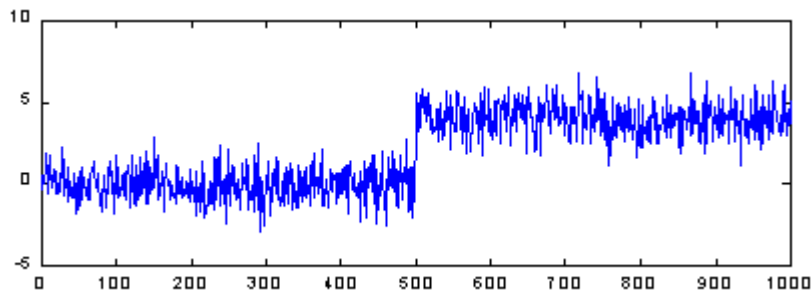


Рис. Д.1. Розладка – однократна, стрибкоподібна зміна математичного сподівання

2. Розладка – однократна, стрибкоподібна зміна дисперсії

$$z(n) \in N(\mu_1, \beta_1), n \in [0, n_0]$$

$$z(n) \in N(\mu_1, \beta_2), n \in [n_0 + 1, N]$$

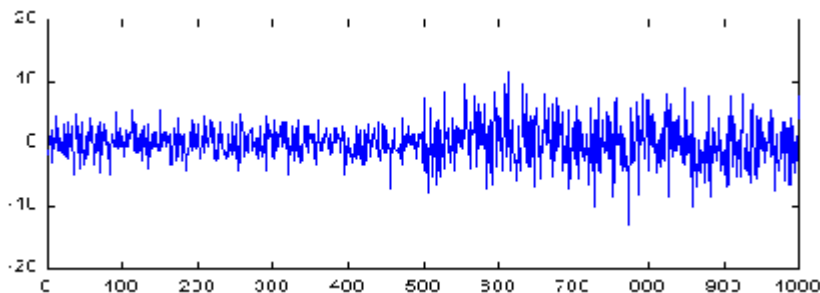


Рис. Д.2. Розладка – однократна, стрибкоподібна зміна дисперсії

3. Розладка – відновлювана стрибкоподібна зміна математичного сподівання (багаторазова розладка),

$$z(n) \in N(\mu_1, \beta_1), n \in [0, n_1]$$

$$z(n) \in N(\mu_2, \beta_1), n \in [n_1 + 1, n_2]$$

$$z(n) \in N(\mu_1, \beta_1), n \in [n_2 + 1, n_3]$$

$$z(n) \in N(\mu_2, \beta_1), n \in [n_3 + 1, n_4]$$

...

$$z(n) \in N(\mu_1, \beta_1), n \in [n_m + 1, N]$$

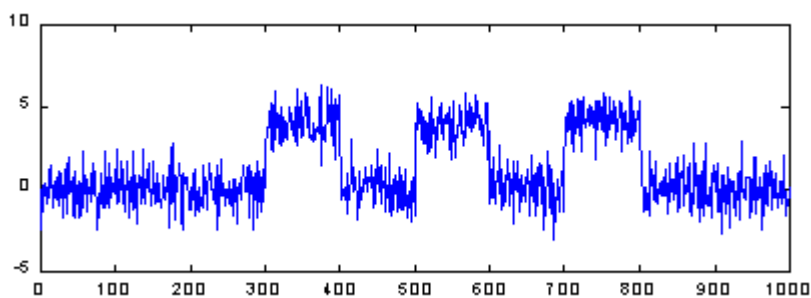


Рис. Д.3. Розладка – відновлювана стрибкоподібна зміна математичного сподівання

4. Розладка – відновлювана стрибкоподібна зміна дисперсії

$$z(n) \in N(\mu_1, \beta_1), n \in [0, n_1]$$

$$z(n) \in N(\mu_2, \beta_1), n \in [n_1 + 1, n_2]$$

$$z(n) \in N(\mu_1, \beta_1), n \in [n_2 + 1, n_3]$$

$$z(n) \in N(\mu_2, \beta_1), n \in [n_3 + 1, n_4]$$

...

$$z(n) \in N(\mu_1, \beta_1), n \in [n_m + 1, N]$$

5. Розладка – багаторазова, стрибкоподібна зміна математичного сподівання

$$z(n) \in N(\mu_1, \beta_1), n \in [0, n_1]$$

$$z(n) \in N(\mu_2, \beta_1), n \in [n_1 + 1, n_2]$$

$$z(n) \in N(\mu_3, \beta_1), n \in [n_2 + 1, n_3]$$

$$z(n) \in N(\mu_4, \beta_1), n \in [n_3 + 1, n_4]$$

...

$$z(n) \in N(\mu_{m+1}, \beta_1), n \in [n_m + 1, N]$$

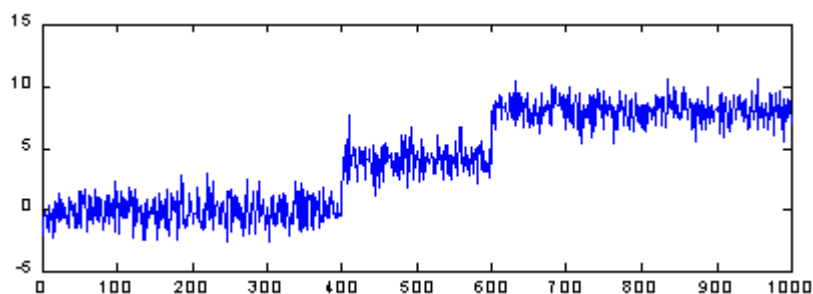


Рис. Д.4. Розладка – багаторазова, стрибкоподібна зміна математичного сподівання

б. Розладка – одноразова плавна зміна математичного сподівання

$$z(n) \in N(\mu_1, \beta_1), n \in [0, n_0]$$

$$z(n) = g(n) + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\Delta} (n - n_0), g(n) \in N(0, \beta_1), n \in [n_0, n_0 + \Delta]$$

$$z(n) \in N(\mu_2, \beta_1), n \in [n_0 + \Delta, N]$$

Д.2.3. Послідовні методи (алгоритми) виявлення розладки

Розглянемо послідовні методи виявлення зміни властивостей випадкового процесу, тобто розладку. Такі алгоритми на кожному кроці використовують інформацію, отриману на попередніх кроках, для визначення факту настання розладки. Результатом роботи алгоритму є рішення про наявність або відсутність розладки (дефекту) в кожен момент часу. Для цього на кожному кроці за значеннями сигналу $z(n) \in N(\mu_1, \beta_1)$ обчислюється вирішальна функція $G(n)$ і порівнюється з порогом (порогами).

Д.2.3.1. Алгоритми типу кумулятивних сум

В алгоритмах даного класу на кожному кроці розраховується так звана кумулятивна сума.

1. Алгоритм Пейджса [246]

$$G(n) = \begin{cases} S_n - \min_{1 < k < n} S_k, \mu_1 < \mu_2, S_n = \sum_{i=1}^n (z(i) - \mu_1 - v/2) \\ \max_{1 < k < n} S_k - S_n, \mu_1 > \mu_2, S_n = \sum_{i=1}^n (z(i) - \mu_1 + v/2) \end{cases}, \quad (\text{Д.13})$$

де $\mu_2 = \bar{z}$, μ_1 – математичне сподівання вихідного сигналу z до появи розладки, $v > 0$ – поріг чутливості.

Рішення про наявність або відсутність розладки в кожен момент часу приймається на основі результатів порівняння

$G < h \Rightarrow$ розладки немає,

$G \geq h \Rightarrow$ є розладка,

де $h > 0$ – поріг спрацювання.

2. Модифікація алгоритму (рекурентний вид)

Формула (Д.13) для випадку $\mu_1 < \mu_2$ перетворюється до вигляду

$$G(n) = S_n - \hat{S}_n,$$

$$\text{де } \hat{S}_n = \min(\hat{S}_{n-1}, S_n), \quad S_n = S_{n-1} + z(n) - \mu_1 - v/2.$$

$$\text{Початкові умови: } S_1 = z(1) - \mu_1 - v/2, \quad \hat{S}_1 = S_1.$$

Для випадку, коли $\mu_1 > \mu_2$ перетворюється до вигляду

$$G(n) = \hat{S}_n - S_n,$$

$$\text{де } \hat{S}_n = \max(\hat{S}_{n-1}, S_n),$$

$$S_n = S_{n-1} + z(n) - \mu_1 + v/2.$$

$$\text{Початкові умови: } S_1 = z(1) - \mu_1 + v/2, \quad \hat{S}_1 = S_1.$$

3. Алгоритм кумулятивних сум з відбиваючим екраном (АКС)

Даний вид алгоритму являє собою модифіковану форму записування алгоритму Пейджа [246]

$$G(n) = \begin{cases} \max\{0, G(n-1) + z(n) - \mu_1 - v/2\}, & \mu_1 < \mu_2 \\ \max\{0, G(n-1) + z(n) - \mu_1 + v/2\}, & \mu_1 > \mu_2 \end{cases}, \quad (\text{Д.14})$$

$$G(0) = 0.$$

Аналітичне налаштування параметрів алгоритму.

При аналізі зміни властивостей процесу авторегресії оцінка ймовірності хибного виявлення визначається за формулою [247]

$$P_{\text{ло}} = \frac{(\mu' - \mu)^2 \left(1 - \sum_{i=1}^p a_i\right)^2}{2\beta} (e^h - h - 1). \quad (\text{Д.15})$$

Оцінка середнього часу виявлення визначається за формулою

$$\bar{\tau} = \frac{2\beta}{(\mu' - \mu)^2 \left(1 - \sum_{i=1}^p a_i\right)^2} (e^{-h} + h - 1), \quad (\text{Д.16})$$

де a_i – коефіцієнти авторегресії; p – порядок авторегресії; μ – математичне сподівання процесу авторегресії до разладки; μ' – математичне сподівання процесу авторегресії після разладки; β – дисперсія процесу авторегресії; h – поріг спрацювання алгоритма.

4. Модифікація алгоритму кумулятивних сум

Якщо сигнал $z(n)$ має складову типу не частих великих викидів, то алгоритми Пейджа і алгоритм кумулятивних сум можуть бути неефективними, так як викиди різко збільшують величину значення вирішальної функції, що призводить до хибного виявлення. Тому вводять дві модифікації алгоритму [42].

Перший варіант модифікованого алгоритму (АКС-м1)

$$G(n) = \begin{cases} \max\{0, G(n-1) + \text{sign}(z(n) - \mu_1 - v/2)\}, & \mu_1 < \mu_2 \\ \max\{0, G(n-1) + \text{sign}(z(n) - \mu_1 + v/2)\}, & \mu_1 > \mu_2 \end{cases}, \quad (\text{Д.17})$$

$$G(0) = 0.$$

Другий варіант модифікованого алгоритму (АКС-м2)

$$G(n) = \begin{cases} \max\{0, (G(n-1)+1) \cdot \text{sign}(z(n) - \mu_1 - \nu/2)\}, & \mu_1 < \mu_2 \\ \max\{0, (G(n-1)+1) \cdot \text{sign}(z(n) - \mu_1 + \nu/2)\}, & \mu_1 > \mu_2 \end{cases}, \quad (\text{Д.18})$$

$$G(0) = 0.$$

5. Алгоритм Сегена-Сандерсона

Даний алгоритм Сегена-Сандерсона описаний в роботі [453]

$$G(n) = \max_{i \leq n} \{S_i - \min_{k \leq i} S_k\}, \quad (\text{Д.19})$$

$$\text{де } S_i = \sum_{j=1}^i z(j).$$

Для отримання можливості налаштування алгоритму вводиться модифікація алгоритму

$$G(n) = \frac{1}{\max(\nu, n)} \max_{i \leq n} \{S_i - \min_{k \leq i} S_k\}, \quad (\text{Д.20})$$

де $\nu > 0$ – поріг чутливості алгоритму.

6. Модифікація алгоритму (рекурентний вид)

Формула (Д.20) перетворюється до вигляду

$$G(n) = \frac{\hat{G}_n}{\max(\nu, n)},$$

$$\text{де } \hat{G}_n = \max(\hat{G}_{n-1}, S_n - \hat{S}_n), \quad \hat{S}_n = \min(\hat{S}_{n-1}, S_n), \quad S_n = S_{n-1} + z(n).$$

$$\text{Початкові умови: } S_1 = z(1), \quad \hat{S}_1 = S_1, \quad \hat{G}_1 = 0.$$

7. Алгоритм Надлера-Роббінза

Даний алгоритм Надлера-Роббінза описаний в праці [442]

$$G(n) = \max_{0 \leq k \leq n} S_k - \min_{0 \leq k \leq n} S_k, \quad (\text{Д.21})$$

де $S_0 = 0$, $S_k = \sum_{j=1}^k (z(j) - \mu_1)$.

8. Модифікація алгоритму (рекурентний вид)

Формула (Д.21) перетворюється до вигляду

$$G(n) = S_n' - S_n'',$$

де $S_n' = \max(S_{n-1}', S_n)$, $S_n'' = \min(S_{n-1}'', S_n)$, $S_n = S_{n-1} + z(n) - \mu_1$.

Початкові умови: $S_1 = z(1) - \mu_1$, $S_1' = S_1$, $S_1'' = S_1$.

Д.2.3.2. Алгоритми зі згладжуванням

1. Алгоритм сигнального відношення

Алгоритм сигнального відношення (АСВ) наведено в роботі [138]

$$G(n) = \frac{S(n)}{R(n)}, \quad (\text{Д.22})$$

$$\text{де } S(n) = (1 - \alpha)S(n-1) + \alpha e(n), \quad (\text{Д.23})$$

$$R(n) = (1 - \alpha)R(n-1) + \alpha |e(n)|, \quad (\text{Д.24})$$

$$e(n) = z(n) - \mu_1. \quad (\text{Д.25})$$

Початкові умови:

$$S(0) = 0, \quad R(0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}}.$$

Параметри алгоритму:

μ_1 – математичне сподівання вихідного сигналу об'єкта до появи розладки,

$0 < \alpha < 1$ – коефіцієнт згладжування.

Рішення про наявність або відсутність розладки в кожен момент часу приймається на основі результатів порівняння

$h_1 < G < h_2 \Rightarrow$ розладки немає,

$G \geq h_2, G \leq h_1 \Rightarrow$ розладка є,

де $-1 < h_1 < h_2 < 1$ – нижній і верхній пороги спрацювання.

2. Аналітичне настроювання параметрів алгоритму

Значення вирішальної функції, сформованої за даним алгоритмом, розподілене нормально з нульовим математичним сподіванням і дисперсією

$$\theta^2 = \frac{\pi\alpha}{2\left(2 - \frac{2}{\pi}\right)^2(2 - \alpha)}, \quad (\text{Д.26})$$

де $\alpha < 0.176$ – коефіцієнт згладжування.

Оцінка ймовірності хибного виявлення визначається за формулою [138]

$$P_{\text{ло}} = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{h_2}{\theta\sqrt{2}}\right) + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{h_1}{\theta\sqrt{2}}\right), \quad (\text{Д.27})$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt,$$

де $-1 < h_1 < h_2 < 1$ – нижній і верхній пороги спрацювання.

При аналізі змін математичного сподівання випадкового процесу від 0 до $\mu' > 0$ і симетричних порогів $h = h_2 = -h_1$ оцінка середнього часу виявлення визначається за формулою

$$\bar{r} = \left[\frac{\ln \left(\frac{r(1-h)}{r(1-h) + \frac{2h}{\sqrt{2\pi}}} \right)}{\ln(1-\alpha)} \right] - 1 \quad (\text{Д.28})$$

де $r = \frac{\mu'}{\beta}$, $\lceil x \rceil$ – заокруглене зверху – найближче ціле більше x , β – дисперсія випадкового процесу.

3. Алгоритм сигнального відношення з перевіркою дисперсії

В алгоритмі сигнального відношення, який описується формулами (Д.22) – (Д.25), вводять додаткові порівняння $R(n)$ з порогом h

$R < h \Rightarrow$ розладки немає,

$R \geq h \Rightarrow$ розладка є.

Отриманий алгоритм сигнального відношення з перевіркою дисперсії (АСВ-д) володіє можливістю виявлення змін дисперсії.

4. Алгоритм експоненціального згладжування

В якості вирішальної функції використовують не відношення $S(n)$ до $R(n)$, а лише $S(n)$. У цьому випадку отримують алгоритм експоненціального згладжування (АЕЗ), [32, 33]

$$G(n) = (1 - \alpha)G(n-1) + \alpha e(n), \quad (\text{Д.29})$$

$$G(0) = 0.$$

Д.2.3.3. Алгоритми з пам'яттю

В алгоритмах даного класу при підрахунку вирішальної функції на кожному кроці використовують значення сигналу в попередні M моментів часу. Параметр $M > 0$ називають глибиною пам'яті алгоритму.

Рішення про наявність або відсутність розладки в кожен момент часу приймається на основі результатів порівняння

$G < h \Rightarrow$ розладки немає,

$G \geq h \Rightarrow$ розладка є,

де $h > 0$ – поріг спрацювання.

1. Алгоритм Шюхарта

Даний алгоритм описано в роботі [33]

$$G(n) = \begin{cases} 0, n < M \\ \frac{1}{M} \sum_{i=n-M+1}^n z(i), n \geq M \end{cases} \quad (\text{Д.30})$$

2. Модифікація алгоритму (рекурентний вид)

Формула (Д.30) перетворюється до вигляду

$$G(n) = \begin{cases} 0, n < M \\ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M z(i), n = M \\ G(n-1) + \frac{z(n) - z(n-M)}{M}, n > M \end{cases}$$

3. Алгоритм Дарховського-Бродського

Даний алгоритм Дарховського-Бродського описано в працях [31, 33, 96] і добре себе зарекомендував при опрацюванні сигналів електроенцефалограм

$$G(n) = \begin{cases} 0, n < M \\ \max_{\lfloor \alpha M \rfloor \leq k \leq \lfloor (1-\alpha)M \rfloor} |Y_M(k, n)|, n \geq M \end{cases} \quad (\text{Д.31})$$

$$Y_M(k, n) = \frac{1}{k} \sum_{n-M+1}^{n-M+k} z(i) - \frac{1}{M-k} \sum_{n-M+k+1}^n z(i), n \geq M; \quad (\text{Д.32})$$

де $\lfloor x \rfloor$ – заокруглення знизу – найближче ціле число менше x ; $0 < \alpha < \frac{1}{2}$ – коефіцієнт глибини пам'яті.

4. Модифікація алгоритму (рекурентний вид)

Формула (Д.32) перетворюється до вигляду

$$Y_M(k, n) = Y_M(k, n-1) + \frac{z(n-M+k) - z(n-M)}{k} - \frac{z(n) - z(n-M+k)}{M-k}, n > M.$$

Початкові умови: $Y_M(k, M) = \frac{1}{k} \sum_1^k z(i) - \frac{1}{M-k} \sum_{k+1}^M z(i).$

5. Алгоритм Воробейчикова

Даний алгоритм Воробейчикова наведено в роботі [59]

$$G(n) = \begin{cases} h_0, n \leq M \\ \max\{h_0, G(n-1) + r * \text{sign}(z_n - z_{n-M}) - q\}, n > M \end{cases}, \quad (\text{Д.33})$$

де $r > q$ – натуральні нескорочувані числа; $h_0 = r + q$ – мінімальний поріг спрацювання: $h > h_0$.

Д.2.3.4. Алгоритм, заснований на принципі нев'язок (АПН)

Вирішальна функція алгоритму, заснованого на принципі нев'язок, формулюється як нев'язка (розходження) між тією, яку спостерігаємо, і прийнятою моделями випадкового процесу z [29]:

$$G(n) = \frac{1}{\sqrt{2n}} \sum_{i=n-M}^n \left(\left(\frac{z(i) - \mu_1}{\beta_1} \right)^2 - 1 \right), \quad (\text{Д.34})$$

де $M > 0$ – глибина пам'яті; μ_1 і β_1 – математичне сподівання і дисперсія вихідного сигналу z до появи розладки.

1. Аналітичне налаштування параметрів алгоритму

Ймовірність хибного виявлення для цього алгоритму може бути визначена на основі використання марківських процесів [142]. Такий підхід дозволяє отримати вираз для ймовірності хибного виявлення

$$P_{\text{ло}} = \frac{1 - \prod_{i=1}^M p_i}{2 + \sum_{j=1}^{M-1} \prod_{i=1}^j p_i - \prod_{i=1}^M p_i}, \quad (\text{Д.35})$$

$$\text{де } p_i = \begin{cases} F_i(h\sqrt{2i} + i) - F_i(-h\sqrt{2i} + i), & h \leq \sqrt{\frac{i}{2}}, \\ F_i(h\sqrt{2i} + i), & h > \sqrt{\frac{i}{2}} \end{cases}, \quad (\text{Д.36})$$

де F_i – функція розподілу χ^2 з i степенями свободи; M – глибина пам'яті; h – поріг спрацювання алгоритму.

2. Модифікація алгоритму (рекурентний вид)

Формула (Д.34) перетворюється до вигляду

$$G(n) = \sqrt{\frac{n-1}{n}} \cdot G(n-1) + \frac{1}{\sqrt{2n}} \left(\left(\frac{z(n) - \mu_1}{\beta_1} \right)^2 - 1 \right).$$

Початкові умови: $G(1) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\left(\frac{z(1) - \mu_1}{\beta_1} \right)^2 - 1 \right)$.

3. Алгоритм, заснований на перевірці узагальненої дисперсії

Алгоритм, заснований на перевірці узагальненої дисперсії (АУД), наведено в праці [77]

$$G(n) = \begin{cases} 0, n < M \\ \det(S_n), n \geq M \end{cases}, \quad (\text{Д.37})$$

$$\text{де } S_n = \frac{1}{M-1} \sum_{i=n-M+1}^n (z(i) - m_n)(z(i) - m_n)^T, n \geq M, \quad (\text{Д.38})$$

$$m_n = \frac{1}{M} \sum_{i=n-M+1}^n z(i), n \geq M. \quad (\text{Д.39})$$

4. Модифікація алгоритму (рекурентний вид)

Формули (Д.38), (Д.39) перетворюються до вигляду (для простоти розмірність вектора z дорівнює 1)

$$S_n = S_{n-1} + \frac{z(n) - z(n-M)}{M-1} \left(z(n) + z(n-M) - 2m_{n-1} - \frac{1}{M} \right), n > M$$

$$m_n = m_{n-1} + \frac{z(n) - z(n-M)}{M}, n > M.$$

Початкові умови:

$$S_M = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (z(i) - m_M)^2, m_M = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M z(i).$$

Д.2.3.5. Алгоритм, заснований на перевірці нормалізованої оновленої матриці (АНОМ)

В даному алгоритмі, заснованому на перевірці нормалізованої оновленої матриці, на кожному кроці формується нормалізована оновлена матриця A_n , яка складається з векторів z , які відповідають R різним моментам часу [78]

$$A_n = [z_{n-R+1} \quad \dots \quad z_n], \quad (\text{Д.40})$$

де $R \geq 2$ – глибина пам'яті об'єднаної матриці.

Вирішальна функція розраховується таким чином:

$$G(n) = \frac{1}{M} \sum_{n-M+1}^n \sqrt{\max \lambda \{A_n^T A_n\}}, \quad (\text{Д.41})$$

де $\lambda\{A\}$ – власні числа матриці A .

Поріг спрацювання алгоритму:

$$h = \sqrt{\max(m, R)},$$

де m – розмірність вектора $z(n)$.

Рішення про наявність чи відсутність розладки в кожному моменті часу приймається на основі результатів порівняння

$$h < G < 2h \Rightarrow \text{розладки немає,}$$

$$G \geq 2h, G \leq h \Rightarrow \text{розладка є.}$$

Д.4.3.6. Інші типи алгоритмів на основі пошуку розладки

1. Алгоритм, заснований на інтервальному підході (АІП)

Перед початком розгляду алгоритму наведемо означення толерантного та довірчого інтервалів. Толерантний інтервал – це інтервал, який із заданою ймовірністю γ покриває (охоплює) δ випадкових величин із усієї вибірки $0 < \gamma < 1$, $0 < \delta < 1$. Довірчий інтервал – це інтервал, який із заданою ймовірністю q покриває (охоплює) величину $0 < q < 1$.

Задаючи довірчу ймовірність q , будемо довірчий інтервал $[u_1, u_2]$ для сигналу $z(n) \in N(\mu_1, \beta_1)$ з допомогою квантилей розподілу Стюдента $t_{\frac{1+q}{2}}(n-1)$

$$u_1(n) = m_n - t_{\frac{1+q}{2}}(n-1) \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \quad (\text{Д.42})$$

$$u_2(n) = m_n + t_{\frac{1+q}{2}}(n-1) \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \quad (\text{Д.43})$$

$$\text{де } m_n = \frac{1}{n} \sum_1^n z(i), \quad (\text{Д.44})$$

$$S_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (z(i) - m_n)^2, \quad n > 1. \quad (\text{Д.45})$$

Для знаходження m_n і S_n^2 використовують «принцип рухомого вікна»

$$m_n = \frac{1}{M} \sum_{n-M+1}^n z(i)$$

$$S_n^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{n-M+1}^n (z(i) - m_n)^2$$

Задаючи γ і δ , знаходимо толерантний множник K

$$K_n = Z_\infty \left(1 + \frac{Z_\gamma}{\sqrt{2n}} + \frac{5Z_\gamma^2 + 10}{12n} \right), \quad (\text{Д.46})$$

де Z_∞, Z_γ – абсциси нормованої функції Лапласа $\Phi_0(Z)$:

$$\delta = 2\Phi_0(Z_\infty), \quad \Phi_0(Z_\gamma) = \gamma - 0.5, \quad \Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{2}} \right).$$

Будуємо толерантний інтервал $[l_1, l_2]$

$$l_1(n) = m_n - K_n S_n, \quad (\text{Д.47})$$

$$l_2(n) = m_n + K_n S_n. \quad (\text{Д.48})$$

Рішення приймається, виходячи з аналізу отриманих інтервалів

$u_2 \geq l_1, l_2 \geq u_1 \Rightarrow$ розладки немає,

$u_2 < l_1$ чи $l_2 < u_1 \Rightarrow$ розладка є.

2. Модифікація алгоритму (рекурентний вид)

Формули (Д.44), (Д.45) перетворюються до вигляду

$$m_n = \frac{n-1}{n} m_{n-1} + \frac{1}{n} z(n), n > 1,$$

$$S_n^2 = \frac{n-2}{n-1} S_{n-1}^2 + \frac{1}{n} (z(n) - m_{n-1})^2, n > 1.$$

$$\text{Початкові умови: } m_2 = \frac{z(1) + z(2)}{2}, S_2^2 = \frac{(z(1) - z(2))^2}{2}.$$

3. Допусковий алгоритм (ДА)

Допусковий алгоритм полягає в перевірці знаходження в допуску значень сигналу z [22]

$$G(n) = z(n). \quad (\text{Д.49})$$

Рішення про наявність чи відсутність розладки у кожен момент часу приймається на основі результатів порівняння

$h_1 < G < h_2 \Rightarrow$ розладки немає,

$G \geq h_2, G \leq h_1 \Rightarrow$ розладка є,

де $h_1 < h_2$ – нижній і верхній пороги спрацювання.

4. Аналітичне налаштування параметрів алгоритму

Оцінка ймовірності хибного виявлення визначається за формулою

$$P_{\text{ло}} = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{h_2 - \mu}{\beta \sqrt{2}} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{h_1 - \mu}{\beta \sqrt{2}} \right), \quad (\text{Д.50})$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt,$$

де $h_1 < h_2$ – нижній і верхній пороги спрацювання.

5. Алгоритм Гіршика-Рубіна-Ширяєва

Вирішувальна функція даного алгоритму Гіршика-Рубіна-Ширяєва (ГРШ) розраховується за формулою [38, 39]

$$G(n) = e^{z^{(n)}} (1 + G(n-1)), \quad (\text{Д.51})$$

$$G(0) = 0.$$

Для отримання можливості налаштування алгоритму вводиться модифікація алгоритму:

$$G(n) = e^{z^{(n)-\nu}} (1 + G(n-1)), \quad (\text{Д.52})$$

де $\nu > 0$ – поріг чутливості алгоритму.

6. Аналітичне налаштування параметрів алгоритму

Оцінка середнього часу виявлення визначається за формулою [38]

$$\bar{\tau} = \frac{\ln h}{\mu' - \mu - |\mu|}, \quad (\text{Д.53})$$

де μ – математичне сподівання процесу до разладки; μ' – математичне сподівання процесу після разладки; h – поріг спрацювання алгоритму.

7. Алгоритм Керра

В даному алгоритмі при розрахунку вирішуючої функції використовують проміжні змінні Фільтра Калмана [402]

$$R_{n+1} = AR_nA^T + F\beta_1F^T, \quad (\text{Д.54})$$

$$m_{n+1} = Am_n. \quad (\text{Д.55})$$

Початкові умови: $m_0 = \tilde{x}_0$, $R_0 = \beta_1E$.

Вирішуюча функція визначається таким чином:

$$G(n+1) = (x_{n+1}^* - \tilde{x}_{n+1})^T Q_{n+1}^{-1} (x_{n+1}^* - \tilde{x}_{n+1}), \quad (\text{Д.56})$$

$$\text{где } x_{n+1}^* = (1 - \lambda_{n+1})R_{n+1}L_{n+1}^{-1}\tilde{x}_{n+1} + \lambda_{n+1}Q_{n+1}L_{n+1}^{-1}m_{n+1}, \quad (\text{Д.57})$$

$$L_{n+1} = (1 - \lambda_{n+1})R_{n+1} + \lambda_{n+1}Q_{n+1}, \quad (\text{Д.58})$$

де λ_{n+1} визначається таким рекурентним алгоритмом

$$\lambda_{n+1}^{(k+1)} = \frac{1}{1 + \frac{W_{n+1}^T L_{n+1}^{(k)} Q_{n+1} L_{n+1}^{(k)} W_{n+1}}{W_{n+1}^T L_{n+1}^{(k)} W_{n+1}}}, \quad (\text{Д.59})$$

$$\text{де } L_{n+1}^{(k)} = [(1 - \lambda_{n+1}^{(k)})R_{n+1} + \lambda_{n+1}^{(k)}Q_{n+1}]^{-1}, \quad (\text{Д.60})$$

$$W_{n+1} = \tilde{x}_{n+1} - m_{n+1}. \quad (\text{Д.61})$$

Початкове значення $\lambda_{n+1}^{(0)} = \frac{3}{4}$.

Правило зупинки $|\lambda_{n+1}^{(k+1)} - \lambda_{n+1}^{(k)}| < 10^{-6} |\lambda_{n+1}^{(k)}|$.

У таблиці Д.1 наведені властивості оглянутих послідовних методів виявлення розладки.

Таблиця Д.1

Властивості розглянутих послідовних алгоритмів

Алгоритм	Виявлення зміни математичного сподівання	Виявлення зміни дисперсії	Трудомісткість	Пам'ять
Пейджа	+	–	швидкий	мало
АКС	+	–	швидкий	мало
АКС-м1	+	–	швидкий	мало
АКС-м2	+	–	швидкий	мало
Сегена-Сандерсона	+	–	швидкий	мало
Надлера-Роббінза	+	–	швидкий	мало
АСВ	+	–	середній	мало
АСВ-д	+	+	швидкий	мало
АЕЗ	+	–	швидкий	мало
Шюхарта	+	–	швидкий	багато
Дарховського-Бродського	+	–	дуже повільний	багато
Воробейчикова	+	–	швидкий	багато
АПН	+	+	середній	багато
АУД	+	+	середній	багато
АНОМ	+	+	середній	мало
АП	+	–	повільний	мало
ДА	+	+	швидкий	мало
Гіршика-Рубіна-Ширяєва	+	+	швидкий	мало
Керра	+	+	повільний	мало

Д.2.4.1. Апостеріорні алгоритми

Апостеріорні алгоритми виявлення змін властивостей випадкового процесу.

Ці алгоритми, на відміну від послідовних алгоритмів, використовують всю інформацію для визначення моменту часу, коли відбувається розладка. При використанні апріорних алгоритмів пошуку розладки виявляються розладки типу стрибкоподібної зміни математичного сподівання та відновлювана

стрибкоподібна зміна математичного сподівання (багаторазова розладка), а також розладки 4-го та 5-го типів.

1. Алгоритм, який використовує статистику Мана-Уїтні

Даний алгоритм використовує статистику Мана-Уїтні [98]

$$t_{ik} = \begin{cases} 1, z_i \geq z_k \\ 0, z_i < z_k \end{cases}$$

$$G(n) = \frac{\sum_{k=n+1}^N \sum_{i=1}^n t_{ik}}{n(N-n)}, \quad (Д.62)$$

$$\hat{n}_0 = \arg \min_{[aN] \leq n \leq [N-aN]} G(n), \mu_1 < \mu_2$$

$$\hat{n}_0 = \arg \max_{[aN] \leq n \leq [N-aN]} G(n), \mu_1 > \mu_2$$

де \hat{n}_0 – оцінка моменту виникнення розладки.

Виявляє розладку першого типу.

2. Узагальнений випадок алгоритму Бродського-Дарховського

Даний алгоритм Бродського-Дарховського наведено в роботі [34]

$$Y(n) = \left[\frac{n}{N} \left(1 - \frac{n}{N} \right) \right]^\nu \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i - \frac{1}{N-n} \sum_{i=n+1}^N z_i \right),$$

$$0 \leq \nu \leq 1, \quad (Д.63)$$

$$\hat{n}_0 = \arg \max_{[aN] \leq n \leq [bN]} |Y(n)|,$$

$$0 < a < \frac{1}{2} < b < 1$$

де \hat{n}_0 – оцінка моменту виникнення розладки.

Асимптотично найкращий метод у розумінні ймовірності хибних виявлень $\nu = 1$.

Асимптотично найкращий метод у розумінні ймовірності хибного спокою $\nu = 0$.

Асимптотично міні-максний метод $\nu = \frac{1}{2}$.

Виявляє розладку першого типу.

3. Алгоритм Бродського-Дарховського №1

Даний алгоритм Бродського-Дарховського №1 [35]

$$Y(n) = \frac{n}{N} \left(1 - \frac{n}{N} \right) \left(\frac{1}{n} \sum_1^n z_i - \frac{1}{N-n} \sum_{n+1}^N z_i \right),$$

$$G = \max_{1 \leq n \leq N-1} |Y(n)|, \quad (\text{Д.64})$$

$G < h \Rightarrow$ розладки немає,

$G \geq h \Rightarrow$ розладка є.

$$T(n) = Y(n + [\varepsilon N]) - Y(n), \quad 0 < \varepsilon < \frac{\delta}{4}$$

$$n_1 = \begin{cases} \min A_1, A_1 \neq \emptyset \\ N, A_1 = \emptyset \end{cases}, \quad \text{де } A_1 = \{n \geq 1 : \text{sign}(T(n)) \neq \text{sign}(T(n+1))\}$$

$$n_i = \begin{cases} \min A_i, A_i \neq \emptyset \\ N, A_i = \emptyset \end{cases}, \quad \text{де } A_i = \{n \geq n_{i+1} + [\delta N / 2] : \text{sign}(T(n)) \neq \text{sign}(T(n+1))\}$$

$$i = 2.. \tilde{k},$$

$$\tilde{k} = \min \{s : n_s = N\} - 1$$

При цьому $n_1, n_2, \dots, n_{\tilde{k}}$ – оцінки моментів виникнення розладок; \tilde{k} – оцінка кількості моментів виникнення розладок.

Виявляє розладку першого та другого типів.

4. Алгоритм Бродського-Дарховського №2

Цей алгоритм Бродського-Дарховського №2 наведено в роботах [36, 37]

$$Y(n) = \frac{n}{N} \left(1 - \frac{n}{N} \right) \left(\frac{1}{n} \sum_1^n z_i - \frac{1}{N-n} \sum_{n+1}^N z_i \right),$$

$$G = \max_{1 \leq n \leq N-1} |Y(n)|, \quad (\text{Д.65})$$

$G < h \Rightarrow$ розладки немає,

$G \geq h \Rightarrow$ розладка є,

$$T(n) = Y(n + [\varepsilon N]) - 2Y(n) + Y(n - [\varepsilon N]), 0 < \varepsilon < \frac{\delta}{4}$$

$$n_1 = \begin{cases} \min A_1, A_1 \neq \emptyset \\ N, A_1 = \emptyset \end{cases}, \text{ де } A_1 = \{[\delta N] \leq n < N - [\delta N] : |T(n)| > 4\varepsilon h\}$$

$$n_i = \begin{cases} \min A_i, A_i \neq \emptyset \\ N, A_i = \emptyset \end{cases}, \text{ де } A_i = \{n_{i+1} + [\delta N / 2] \leq n < N - [\delta N] : |T(n)| > 4\varepsilon h\}$$

$$i = 2.. \tilde{k},$$

$$\tilde{k} = \min \{s : n_s = N\} - 1$$

При цьому $n_1, n_2, \dots, n_{\tilde{k}}$ – оцінки моментів виникнення розладок; \tilde{k} – оцінка кількості моментів виникнення розладок.

Виявляє розладку першого, другого та п'ятого типів.

5. Алгоритм Дарховського

Даний алгоритм був запропонований Дарховським у праці [97]

Нехай z_j набирає значення $a_1 \dots a_k$.

Тоді, якщо Δ відома,

$$Y(n) = \sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_j(i) - \frac{1}{N-n-\Delta} \sum_{i=n+\Delta+1}^N x_j(i) \right)^2, \quad (\text{Д.66})$$

$$x_j(i) = \begin{cases} 1, z_i = a_j \\ 0, z_i \neq a_j \end{cases}$$

$$M = \left\{ \arg \max_{\alpha \leq t \leq \beta} Y(tN) \right\}$$

$$0 < \alpha \leq \frac{n_0}{N} \leq \frac{n_0 + \Delta}{N} \leq \beta < 1$$

$$\hat{\theta}_0 \in M,$$

$$\hat{n}_0 = \hat{\theta}_0 \cdot N,$$

де \hat{n}_0 – оцінка моменту виникнення розладки.

Виявляє розладку першого (при $\Delta = 1$) та четвертого типів.

Існують й інші методи, які дозволяють оцінити моменти різкої зміни ймовірнісних характеристик випадкових процесів. Наприклад, методи, побудовані з використанням методу максимальної правдоподібності, методи з використанням баєзовських вирішуючих правил [60] та інші.

Д.2.5. Сегментація на основі використання методу пошуку розладок випадкового процесу (визначення зонно-часової структури електрокардіосигналу)

У кандидатській дисертаційній роботі автора [185] розроблено метод сегментації ЕКС із використанням непераметричного методу пошуку розладки. Метод визначення зонно-часової структури ЕКС побудований із використанням статистики Бродського-Дарховського [337]. Статистика реагує на зміни математичного сподівання циклічного сигналу. Отримані на її основі моменти часу, які відповідають екстремумам статистики, використовуються для визначення меж сегментів. При застосуванні даного методу визначаємо межі стаціонарних ділянок та отримуємо межі нестаціонарних ділянок, які для ЕКС чергуються. Таким чином, виділивши стаціонарні ділянки, можна було отримати нестаціонарні, які відповідали сегментам Р, QRS-комплексу та сегменту-Т.

Д.2.6. Приклади сегментації циклічних випадкових процесів

Розглянемо використання непараметричного методу визначення розладок ЦВП. Для прикладу, застосуємо статистику Бродського-Дарховського [337]. Результати застосування даної статистики для задачі сегментації циклічних кусково-стаціонарних випадкових процесів наведено на рисунках Д.5 та Д.6.

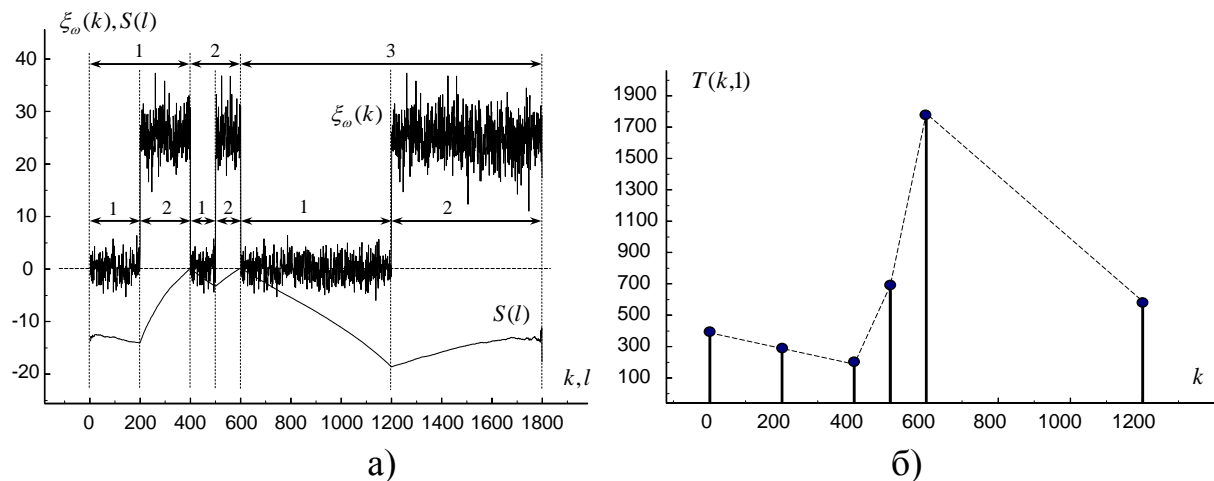


Рис. Д.5. Циклічний кусково-стаціонарний випадковий процес, визначена для нього статистика (розладка – зміна математичного сподівання) та оцінка функції ритму: а) реалізація циклічного кусково-стаціонарного випадкового процесу (цикли $C = 3$, зони $Z = 2$); б) визначена дискретна функція ритму циклічного кусково-стаціонарного випадкового процесу (пунктиром зображено кусково-лінійну інтерполяцію)

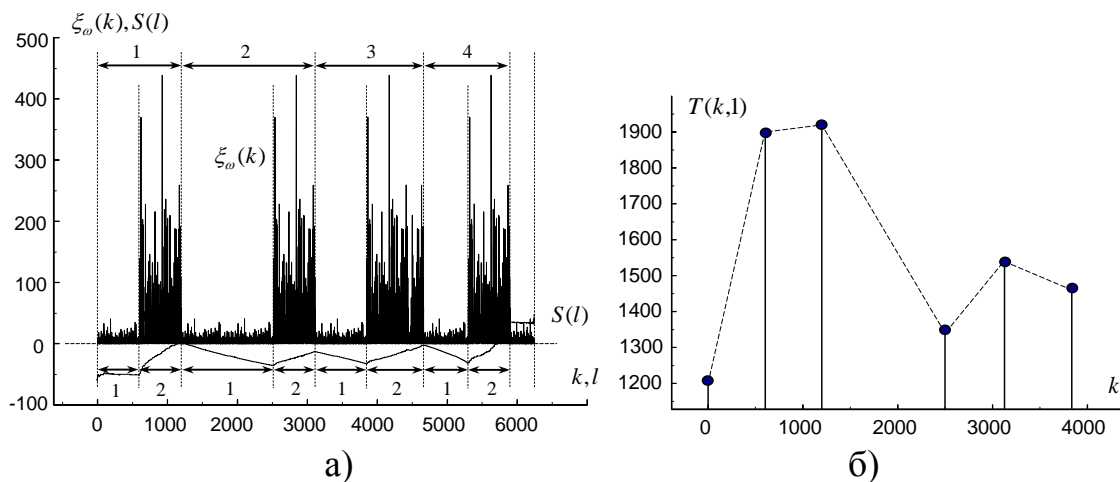


Рис. Д.6. Циклічний кусково-стаціонарний випадковий процес, визначена для нього статистика (розладка – зміна дисперсії) та дискретна функція ритму: а) реалізація циклічного кусково-стаціонарного випадкового процесу (цикли $C = 4$, зони $Z = 2$); б) визначена функція ритму циклічного кусково-стаціонарного випадкового процесу (пунктиром зображено кусково-лінійну інтерполяцію)

У випадку, коли ЦВП складається з почергово слідуючих один за одним стаціонарних та нестаціонарних сегментів, задача його сегментації також може бути розв'язана шляхом використання відомих методів пошуку розладки кусково-стаціонарного випадкового процесу. Як приклад, використання непараметричного методу виявлення розладок циклічного випадкового процесу із послідовним чергуванням стаціонарних та нестаціонарних сегментів наведено у роботі [185]. Результати застосування даної статистики наведено на рисунку Д.7.

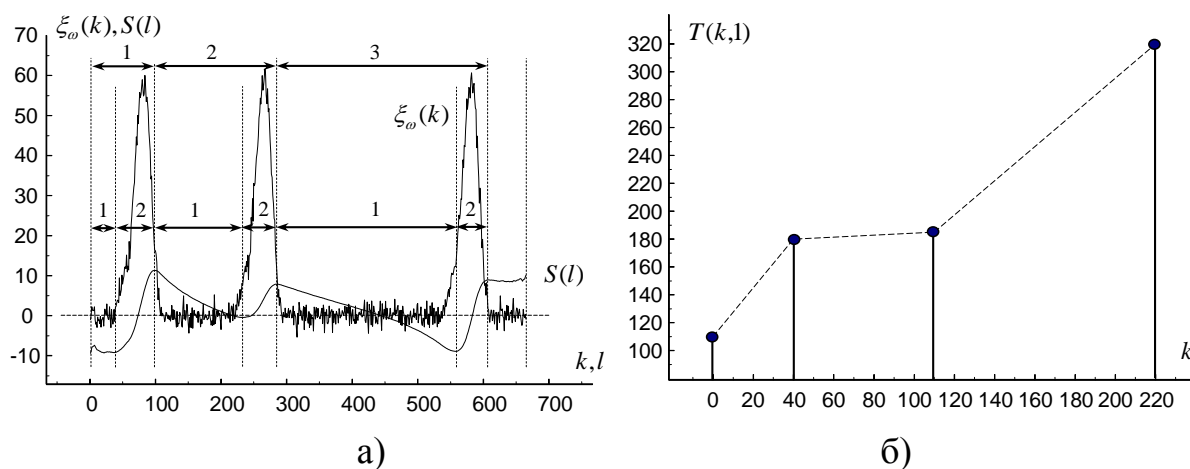


Рис. Д.7. Циклічний випадковий процес із стаціонарними сегментами, визначена для нього статистика (розладка – зміна математичного сподівання) та дискретна функція ритму: а) реалізація циклічного випадкового процесу зі стаціонарними сегментами (цикли $C = 3$, зони $Z = 2$); б) визначена функція ритму циклічного випадкового процесу зі стаціонарними сегментами (пунктиром зображено кусково-лінійну інтерполяцію)

В роботі [185] обґрунтовано можливість використання статистики Бродського-Дарховського для побудови методу сегментації електрокардіосигналу. Для експериментальних досліджень використовувалися реалізації електрокардіосигналів, які зареєстровані у II відведенні, результати наведені на рисунку Д.8.

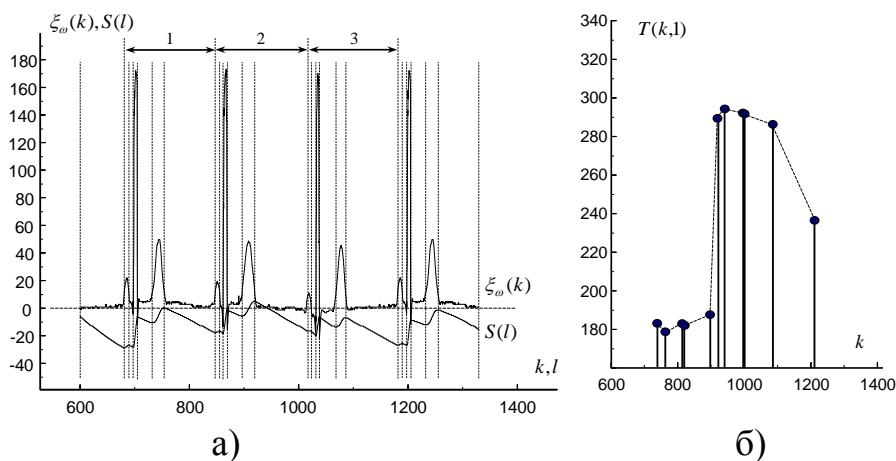


Рис. Д.8. Циклічний випадковий процес (електрокардіосигнал), визначена для нього статистика (розладка – зміна математичного сподівання) та дискретна функція ритму: а) фрагмент реалізації циклічного випадкового процесу (фрагмент цикли $C = 3$, зони $Z = 6$); б) визначена функція ритму циклічного випадкового процесу (пунктиром зображено кусково-лінійну інтерполяцію)

Д.3. Методи сегментації, запропоновані Воробйовим (методи визначення параметрів структурних, ієрархічних моделей)

У роботах Воробйова [60–65] використовуються методи сегментації структурних сигналів, побудовані на баєсовських вирішуючих правилах.

Для реалізації описаних методів [60] необхідно вказати спосіб обчислення правил для апостеріорних ймовірностей. Використовуються дві рекурентні процедури [61]:

$$\hat{\Omega}_t(X_1^N) = \arg \min_{\hat{h}_t, \hat{\tau}_t} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{T_i} \lambda(i, \hat{h}_t, k, \hat{\tau}_t) \cdot P(h_t = i, \tau_t = k / X_1^N), \quad (\text{Д.67})$$

де функція втрат λ спеціального виду (антидіагональна)

$$\lambda(i, \hat{h}_t, k, \hat{\tau}_t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } h_t = \hat{h}_t \text{ і } \tau_t = \hat{\tau}_t \\ 1, & \text{якщо } h_t \neq \hat{h}_t \text{ або } \tau_t \neq \hat{\tau}_t \end{cases}$$

оптимальне вирішуюче правило спрощується

$$\hat{\Omega}_t(X_1^N) = \arg \min_{i,i} P(h_t = i, \tau_t = k / X_1^N). \quad (\text{Д.68})$$

Спочатку використовується процедура прямого обчислення ймовірностей, а потім процедура зворотного ходу перераховує отримані результати. В роботі запропоновано ряд варіантів сегментації: послідовна сегментація, сегментація з затримкою, сегментація компромісом та інші. При оцінюванні функції втрат (адитивної та глобальної), як критеріїв сегментації, оптимальне вирішуюче правило зводиться до вибору такого варіанта сегментації, апостеріорна ймовірність якої відносно до оброблюваної реалізації була б максимальна. Оптимальним алгоритмом сегментації для глобальної функції втрат є алгоритм, що побудований за схемою динамічного програмування. А для адитивної функції втрат – алгоритм точкової класифікації відліків на основі апостеріорних ймовірностей їх належності. Недоліком алгоритму на основі динамічного програмування є застосування його для сегментації сигналів лише фіксованої довжини.

Д.4. Методи кластерного аналізу

Розглянемо методи кластерного аналізу, які можуть бути використані при побудові методів сегментації на етапі класифікації чи виявленні, визначенні відмінностей у досліджуваному сигналі.

Перш за все необхідно сказати, що кластерний аналіз – це процедура розбиття заданої вибірки об'єктів на підмножини, які називаються кластерами, так, щоб кожен кластер складався із схожих об'єктів, а об'єкти різних кластерів істотно відрізнялися, також були на значній відстані один від одного. Завдання кластеризації відноситься до статистичного опрацювання, а також до широкого класу завдань навчання без учителя.

В сучасній науці застосовується значна кількість алгоритмів кластерного аналізу даних. Виділяють два види аналізу: аналіз шляхом порівняння об'єктів, виходячи з їх ознак (найпоширеніший у біологічних науках), його називають аналізом Q-типу, а в разі, коли порівнюються ознаки на основі об'єктів, то

аналізом R-типу. Існують спроби використання гібридних типів аналізу (наприклад, RQ-аналіз), але зараз ця методологія перебуває на етапі розроблення.

Мета кластерного аналізу – у пошуку наявних структур, що полягає в утворенні груп, схожих між собою об'єктів – кластерів. Водночас його дія полягає у формуванні структури серед досліджуваних об'єктів. Це означає, що методи кластеризації використовуються для виявлення структури в даних, яку нелегко знайти при візуальному обстеженні або за допомогою експертів.

Задача кластеризації є дуже поширена на практиці у багатьох прикладних областях, де для її використання автори деяких праць вживають інші терміни: таксонометрія, сегментація, групування, самоорганізація. Проте, на думку автора, необхідно вживати такі полісемантичні поняття, не просто на інтуїтивному рівні, а чітко усвідомлюючи та інтерпретуючи їх. Є чітке розмежування понять сегментація, кластеризація і розпізнавання. Для цього розглянемо завдання кластеризації й відмінності його від поняття класифікації. Поняття сегментації наведено в додатку Е.

Завдання кластеризації відноситься до широкого класу завдань навчання без учителя, на відміну від класифікації – навчання з учителем, де класи визначені наперед. На відміну від класифікації, кластеризація – це розбиття множини даних на кластери. Кластери – підмножини однорідних одиниць сукупності, параметри яких заздалегідь невідомі. Кластерний аналіз відноситься до методів класифікації даних, при цьому даний метод має ряд переваг над іншими методами. Методи кластерного аналізу часто застосовують для розбиття досліджуваних об'єктів за однією чи групою ознак (наприклад, при опрацюванні зображень). Керування впливом тих чи інших параметрів може бути реалізовано на основі введення коефіцієнтів. В методах кластерного аналізу немає обмежень за групуванням різних видів об'єктів, тому дані методи можна застосовувати до даних майже доільної природи. Особливістю процедури кластеризації є те, що більшість її методів здатні самостійно (без участі людини) виділити характеристики кластерів та визначити їх кількість.

Цілі кластеризації можуть значно відрізнятись й залежати від конкретної задачі. Серед поширених задач кластерного аналізу слід назвати такі:

1. Вивчення даних – розбиття даних на групи, допомагає виявити внутрішні закономірності. Зробити дані більш наочними, висунути нові гіпотези. Зрозуміти, наскільки інформативними є властивості досліджуваних об'єктів.

2. Полегшення аналізу – за рахунок кластеризації можна спростити подальше опрацювання даних і побудову моделі для кожного окремого кластера. Тобто кластеризація може виступати попереднім, підготовчим етапом перед розв'язком інших задач Data mining: класифікації, регресії, асоціації, послідовних шаблонів і таке інше.

3. Стиснення даних – за рахунок збереження лише найтипівіших об'єктів кожного кластера.

4. Прогнозування – при віднесенні нового об'єкту до певного кластеру з'являється можливість прогнозування його поведінки, вважаючи, що вона буде схожою з поведінкою інших об'єктів кластера.

5. Виявлення аномалій (outlier detection) – за рахунок виявлення кластерів, до яких потрапляє дуже мала кількість «нетипових» об'єктів.

Треба усвідомити, що сама по собі кластеризація не надає якихось результатів аналізу. Для отримання ефекту необхідно надати змістовну інтерпретацію кожному кластеру, що передбачає присвоєння кожному кластеру інформаційно наповненої назви, яка відображає його сутність. Тому інтерпретація потребує ретельного дослідження кожного кластера: його статистичних характеристик, розподілу значень об'єктів у кластері, оцінювання потужності кластера й таке інше. При такому підході важливим є візуалізація даних, подавання результатів у вигляді спеціальних дендограм, кластерограм, карт і таке інше, що дозволяє полегшити інтерпретацію отриманих даних.

Для класифікації методів кластеризації можна виділити ряд груп підходів (деякі методи можна віднести безпосередньо до кількох груп), тому пропонується розглянути дану класифікацію методів як дуже узагальнену, що наведена у роботі [23], а також зустрічається у багатьох інтернет-джерелах:

1. Ймовірнісний підхід. Передбачається, що кожен об'єкт відноситься до певного класу, але кількість класів невідома:
 - Метод К-середніх (*K-means*).
 - Метод К-медіан.
 - EM-алгоритм (Expectation-maximization, EM-algorithm).
 - Алгоритми сімейства FOREL.
 - Дискримінантний аналіз.
2. Підходи на основі систем штучного інтелекту (дуже умовна група, так як методи дуже багаточисельні й досить різноманітні):
 - Метод нечіткої кластеризації С-середніх (*C-means*).
 - Нейронна мережа Кохонена.
 - Еволюційний (генетичний) алгоритм.
3. Логічний підхід. Побудова дендрограм здійснюється за допомогою дерева рішень.
4. Теоретико-графовий підхід.
 - Графові алгоритми кластеризації.
5. Ієрархічний підхід. Передбачає наявність кластерів різного порядку. Відомо, що при такому підході, алгоритми, поділяються на об'єднуючі (агломеративні) та розділяючі (дивизивні). За кільквстю ознак іноді виділяють за одною ознакою (монотетичні) та за багатьма (політетичні) методи класифікації.
 - Ієрархічна дивизивна кластеризації або таксономія. Задачі кластеризації розглядаються в кількісній таксономії.
6. Інші методи, які не увійшли до попередніх груп.
 - Статистичні алгоритми кластеризації.
 - Ансамбль кластеризаторів.
 - Алгоритми сімейства КРАБ.
 - Алгоритм, заснований на методі просіювання.
 - DBSCAN та інші.

Четвертий та п'ятий підходи іноді об'єднуються під назвою структурного або

геометричного підходу, що володіє більшою формалізацією поняття близькості зазначено у праці [72]. Не зважаючи на значні відмінності між перерахованими методами, всі вони ґрунтуються на "гіпотезі компактності": всі близькі об'єкти повинні відноситися до одного кластера, а всі різні об'єкти відповідно повинні знаходитися у різних наведено відомі .

У роботі [23] розглянуто підходи та методи кластерного аналізу. Оглядом наведемо їх.

1. Ймовірнісний підхід

Як було сказано вище, передбачається, що кожен об'єкт відноситься до певного класу, але кількість класів невідома, оскільки об'єкти вибираються з загальної сукупності випадково й незалежно, то змінні які описують об'єкти є випадковими. При цьому для кожного класу визначається ймовірність розподілу заданого сімейства величин, але при цьому параметри розподілу невідомі.

Є вибірка спостережень, яка являє собою реалізацію суміші розподілів. Необхідно визначити найбільш правдоподібні значення параметрів, відновивши закон розподілу для кожного класу. Для цього використовують наближені алгоритми розділення суміші, *EM-algorithm* [4]. Перевірка значущості розподілу може бути проведена з використанням апарата перевірки статистичних гіпотез. Існують також алгоритми, засновані на непараметричних оцінках густини ймовірності розподілу. В алгоритмі *K-means* [124] групує рішення формується динамічно з деякої вхідної групи шляхом поетапного перерозподілу об'єктів у групи з найближчими центрами ваги. Цей перерозподіл іде до отримання стійкого розділення. Аналогічна методика також використовується і в алгоритмі FOREL [127].

2. Підхід, заснований на теорії графів

Є декілька алгоритмів, що відносяться до даного підходу, одним із відомих є алгоритм найкоротшого незамкненого шляху [471]. При застосуванні даного алгоритму передбачено побудову мінімального стовбурового дерева графа. У

такого графа вершини відповідають об'єктам, а ребра відповідають довжинам відстаней між відповідними об'єктами. При побудові кластерів, враховуючі дерево графа вибирають ребра максимальної довжини.

3. Ієрархічний підхід

Даний підхід також відносять у літературних джерелах до графового підходу. При такому підході використовується дерево групувань (дендограма), що відображає групування об'єктів. До даного підходу відносять алгоритми, які поетапно об'єднують наближені об'єкти у групи (агломерати). Відповідно такий підклас алгоритмів називають агломеративні. Інший підклас алгоритмів отримав назву дивизивних, оскільки в них здійснюється поетанне розділення вихідної групи об'єктів на найбільш віддалені підгрупи і так далі. Рішення, які стосуються групування об'єктів відображаються ієрархічною структурою.

4. Підхід, заснований на понятті найближчого сусіда

Ще одним типом алгоритмів, які відносяться до кластерного аналізу є алгоритм що заснований на понятті найближчого сусіда. При його застосуванні здійснюється послідовне групування об'єктів у кластер, в якому знаходяться найближчі об'єкти (сусіди). При цьому перевіряється відстань, щоб вона не перевищувала заданий поріг (розмежування кластерів). Існують різні варіанти визначення такої відстані [380].

5. Підхід на основі нечітких алгоритмів кластерного аналізу

При використанні данного підходу передбачається, що кожен кластер являє собою незліченну множину об'єктів. До найпоширеніших алгоритмів цього підходу можна віднести відомий алгоритм нечітких *C-середніх* [352].

6. Підхід, що використовує штучні нейронні мережі

Широки поширені алгоритми які використовують даний підходу [395]. При цьому алгоритми такого класу мають архітектуру, що являє собою одношарову

мережу, в якій кожен нейрон відповідає деякому кластеру. В процесі навчання мережі відбувається ітеративна зміна ваг між вхідними та вихідними вузлами мережі. Тим самим здійснюється пошук оптимального значення критерію групування. Нейронні мережі дозволяють ефективно використовувати паралельні методи розрахунку. До таких алгоритмів можна віднести алгоритми самоорганізуючихся мереж Кохонена [405]. Вони дозволяють сформувати двомірне відображення множини об'єктів.

7. Еволюційний (генетичний) підхід

Алгоритми, що відносяться до даного класу побудовані на аналогії з природною еволюцією. В них використовуються поняття популяції – набір різних варіантів групування (також їх називаються хромосомами, за аналогією з відповідними біологічними об'єктами), і еволюційних процедур, що дозволяють з одного або кількох батьківських хромосом отримати одну або кілька хромосом-нащадків. До таких процедур належать: селекція, рекомбінація та мутація. Генетичний (еволюційний) алгоритм здатен здійснювати пошук рішення, забезпечуючи глобальний мінімум критерію якості групувань [378].

Д.5. Методи сегментації зображень

Сегментація зображень полягає у розділенні цифрового зображення на сегменти (множину пікселів, суперпікселів). Таким чином можна сказати, що процес сегментації зображень полягає у виділенні певних об'єктів на ньому зі спільними ознаками, а також виділення країв цих об'єктів. Метою сегментації є спрощення і/або зміна представлення зображення для полегшення його аналізу. У результаті сегментації зображення отримується множина сегментів, які разом об'єднують усе зображення, або множина виділених контурів сегментів. Всі пікселі які належать до сегмента схожі за певною його характеристикою або за визначеною його властивістю, наприклад, колір, яскравість або текстура. При цьому сегменти, що межують між собою істотно відрізняються за цими характеристиками або властивостями [325].

При оцінюванні якості (коректності) сегментації використовуються різні властивості [86, 161]: однорідність регіонів (однорідність кольору або текстури), несхожість сусідніх регіонів, гладкість кордону регіону та інші.

В різних методах сегментації зображень враховуються різні властивості за якими відбувається його розбиття. Тому, під час вибору того чи іншого методу сегментації для вирішення конкретного завдання слід визначитися, які властивості розбиття є важливими. У багатьох прикладних задачах сегментації використовують властивості однорідності регіонів або несхожості сусідніх регіонів.

На практиці, задачі сегментації зображень виникають у медицині при аналізі томографічних зображень внутрішніх органів, наприклад, при виявленні пухлин та інших патологій [363]; при аналізі супутникових топографічних зображень; при розпізнаванні облич та автомобільних номерів в задачах побудови алгоритмів комп'ютерного зору.

Універсальних методів сегментації зображень не існує. Тому на практиці різні методи сегментації поєднують, а також використовують знання особливостей зображень із предметної області, щоб ефективніше розв'язати задачу розбиття зображень на досліджувані сегменти.

Алгоритми сегментації, як правило, ґрунтуються на двох фундаментальних принципах: розривності й подібності. У першому випадку основний підхід ґрунтується на визначенні контурів, а у другому – на визначенні порогового рівня та розширенні області. Ці поняття стосуються як до статичних зображень (фотографії, кадри зображень), так і до динамічних зображень (відеозображень). Сегментацію зображень найчастіше проводять за яскравістю для одноколірного зображення. На даний час існує багато різних способів сегментації зображень які умовно можна розділити на такі групи: порогові методи, методи нарощування областей (методи водоподілу, розщеплення – злиття, центроїдного зв'язування), текстурні методи, методи виділення границь, методи із застосуванням кластерного аналізу, графові методи та багато інших [86, 237, 267, 290, 309].

Розглянемо дані методи, лише оглядово, опис яких зустрічається в різних інтернет-джерелах, зокрема у: <https://uk.wikipedia.org/>.

1. Методи на основі використання порогів

Одним із найпростіших та ефективних методів сегментації є метод заснований на використанні порогів. В основі таких методів закладений поріг при якому відсікаються значення яскравості зображення для перетворення його з градацій чорного в бінаризоване зображення.

При застосуванні методів даного класу важливо коректно вибрати порогове значення або кількох значень у випадку вибору декількох поргів. На практиці широко використовують кілька відомих методів визначення порогів. Наприклад, метод максимальної ентропії, а також методи кластерного аналізу [302, 333]. Відомо, що такі методи широко використовують при аналізі томографічних зображень. Якщо вхідне зображення містить кілька об'єктів, застосовується метод перетинів, коли задаються два пороги, і сегментують пікселі зображення, яскравість яких знаходиться у середині заданих порогів [302, 333].

В останні роки, серед порогових методів, все частіше стали використовувати математичний апарат нечіткої логіки. В таких роботах рішення про належність кожного пікселя зображення до відповідного сегмента формується на основі багатовимірних правил, отриманих із використанням нечіткої логіки та еволюційних алгоритмів.

2. Методи кластерного аналізу

Серед методів даного класу (див. пункт Д.4) широко використовують відомий метод k -середніх. При застосуванні алгоритмів даного класу спочатку виконують процедуру субдискретизації зображення. При цьому знижується колірна роздільна здатність зображення, а після цього застосовуються методи кластерного аналізу. Метод k -середніх – це метод в основі якого покладено ітераційний підхід до розділення зображення на K кластерів. Відомий базовий алгоритм може бути описаний так:

1. Вибирають K центрів кластерів, випадково або на основі деякої евристики.

2. Відносять кожен піксель зображення до кластеру, центр якого є найближчим до цього пікселя.

3. Знову визначають центри кластерів, усереднюючи всі пікселі в кластері.

4. Повторюють кроки 2 та 3 до збіжності (наприклад, коли пікселі будуть залишатися в тому ж кластері).

Використовуючи даний метод за відстань приймають суму квадратів або абсолютних значень різниць між пікселем і центром кластера. Відмінності особливостей кластерів ґрунтуються на кольорі, яскравості, текстурі або місці знаходження пікселя. Цей алгоритм гарантовано сходиться, проте він може давати не оптимальне рішення. Якість рішення залежить від початкової множини центрів кластерів і їх кількості K .

3. Методи, засновані на стисненні

Методи даного класу відносяться до методів в основі яких покладено стохастичний підхід. За методами даного класу оптимальною сегментацією зображення буде таке, яке використовує найменший об'єм даних для кодування результуючого зображення, зазначено у працях [388, 454]. При цьому зв'язок між сегментацією та стисненням полягає у тому, що сегментація дозволяє знайти шаблони (патерни) в зображенні, а будь-який взаємозв'язок у зображенні може бути використаний для його стиснення. Даний підхід описує кожен сегмент за його текстурою і формою контуру. При цьому кожна складова сегмента враховується формулою ймовірнісного розподілу, а об'єм даних для кодування обчислюється, як зазначено у працях [388, 454], таким чином:

1. Кодування контурів ґрунтується на факті, що області на звичайних зображеннях повинні мати гладкий контур. Це припущення використовується в кодуванні Хаффмана для закодування ланцюга контурів на зображенні. Чим гладкіший контур тим менше він займає місця.

2. Текстура кодується за допомогою стиснення зі втратами шляхом, схожим до принципу мінімально допустимої довжини, але тут об'єм даних для моделі є апроксимованим кількістю вибірок ентропії моделі. Текстура в кожній області

моделюється багатовимірним нормальним розподілом, ентропія якого найбільш схожа з вхідною.

Для сегментації на довільну кількість сегментів дана схема обчислює кількість біт, потрібну для кодування зображення з використанням обраної сегментації. Серед усіх можливих сегментацій зображення потрібно знайти сегментацію, яка представляється закодованими даними найменшої довжини. Це досягається з використанням методів ієрархічної кластеризації. Спотворення в стисненні зі втратами визначає похибку сегментації та її оптимальне значення може відрізнитися для окремих зображень. Цей параметр може бути оцінено евристично за показниками контрасту текстур на зображенні [388, 454].

4. Методи з використанням гістограм

Методи, які відносяться до даного класу, що використовують гістограми характеризуються своєю ефективністю, за рахунок того, що вимагають тільки один прохід по пікселях зображення. При застосуванні даних методів обчислюється гістограма за всіма пікселями зображення, її мінімуми і максимуми використовуються для того, щоб знайти кластери на зображенні, зазначено у праці [412]. При цьому властивості коліру або яскравості зображення можуть бути використані при порівнянні. Існують модифікації цього методу, що полягають у рекурсивному його застосуванні до кластерів на зображенні з метою поділу їх на дрібніші кластери. Процес триває до тих пір, поки не перестануть з'являтися нові кластери [412, 449].

У такій ситуації застосовується гістограмна сегментація, основна ідея якої полягає у тому, щоб побудувати бімодальну гістограму яскравості зображення у виділеній області, вибрати поріг у точці мінімуму й сегментувати зображення з цим порогом, зазначено у працях [333, 302]. В умовах нерівномірності освітлення або наявності великої кількості об'єктів гістограма яскравості не має бімодальної структури. Тому для ефективного застосування гістограмного методу необхідно проводити локалізацію об'єкта. З цією метою використовують скануючі маски, або розбиття зображень. Найважливішою перевагою гістограмних методів є їх адаптивність до розподілу яскравості об'єкта і фону, яка виражається в

можливості адекватного вибору порога для сегментації зображення, причому в змінних умовах отримання даних. Однак така адаптивність у більшості випадків носить локальний характер і можлива лише в деякому околі локалізованого об'єкта [333, 302]. Недоліком цього методу є те, що в алгоритмі важко знайти значні мінімуми і максимуми на зображенні.

Методи засновані на використанні гістограм, можна адаптувати для кількох кадрів (для аналізу відеозображень), зберігаючи їх переваги за рахунок одного проходу. Гістограма може бути побудована кількома способами, коли розглядаються кілька кадрів. Той самий підхід, який використовується для одного кадру, також можна застосовувати для кількох зазначено у праці Смелякова К.С. та інших. Тобто після об'єднання результатів усі мінімуми і максимуми, які було складно виділити на окремих кадрах, стають помітнішими. Методи на основі гістограм можуть бути застосовані для кожного пікселя, де інформація використовується для визначення найчастішого кольору, що зустрічається для даного положення пікселя. Цей підхід використовує сегментацію зображень рухомих об'єктах на нерухомому оточенні, що дає інший різновид сегментації, корисний у відео трекінгу (для аналізу відеозображень).

5. Статистичні методи сегментації

В умовах невизначеності застосовуються статистичні методи сегментації, засновані, як правило, на використанні оптимальних статистичних класифікаторів. Хоча в порівнянні з детермінованими методами такі методи і є більш трудомісткими, проте вони часто дозволяють стійко сегментувати зображення в умовах невизначеності [302, 379, 456]. Недоліком таких методів є те, що вони ефективні лише для опрацювання кольорових зображень.

6. Методи виділення країв на зображенні

На межі областей зображень існує перепад яскравості, що дозволяє використовувати таку властивість для побудови методів виділення країв областей сегментів. Тому методи виділення країв областей зображення часто використовуються для іншого методу сегментації. При застосуванні таких методів

існує недолік який полягає у тому, що краї зображення бувають розірваними, а для виділення об'єкту вони повинні бути замкненими.

7. Методи розростання областей

Відомим є метод розростання областей з «насіння». Вхідними даними для цього методу є зображення і набір «насіння». Насіння визначає об'єкти, які потрібно виділити. Області поступово розростаються, порівнюючи всі незайняті сусідні пікселі з областю розростання. Різниця δ між яскравістю пікселя і середньою яскравістю області використовується як міра схожості. Піксель з найменшою такою ж різницею додається у відповідну область. Процес триває доти, доки всі пікселі не будуть додані в один із регіонів.

Метод розростання областей з «насіння» вимагає додаткового введення «набору насіння». Результат залежить від вибору набору «насіння». Шум на зображенні може призвести до поганого розміщення «насіння». Метод розростання областей без використання «насіння» – це змінений алгоритм, який не вимагає явного набору «насіння». Він починає з однієї області A_1 – обраний піксель, незначно впливає на кінцеву сегментацію. На кожній ітерації він розглядає сусідні пікселі так само, як метод розростання областей із використанням «насіння». Але він відрізняється тим, що коли мінімальна δ не менша, аніж заданий поріг L , то він додається у відповідну область A_j . В іншому випадку піксель вважається таким, що сильно відрізняється від усіх поточних областей A_i і створюється нова область A_{n+1} , яка містить цей піксель.

Один із варіантів цього методу заснований на використанні яскравості пікселів [412]. Математичне сподівання, дисперсія області та яскравість пікселя-кандидата використовується для побудови тестової статистики. Якщо тестова статистика достатньо мала, то піксель додається до області й математичне сподівання та дисперсія області перераховується знову. Інакше піксель ігнорується і використовується для створення нової області, зазначено на інтернет ресурсі: <https://uk.wikipedia.org/>.

8. Методи, засновані на використанні диференціальних рівнянь у частинних похідних

Методи цього класу використовують диференціальні рівняння у частинних похідних. Їх розв'язки дозволяють отримувати сегменти зображення, зазначено у [356]. Крива поширення є відомим підходом у цій області і застосовується для виокремлення об'єктів, відслідковування об'єктів, відновлення просторового зображення й т.ін. Щодо зворотної задачі, мінімізації функціонала оцінки, то вона є важкою й накладає певні обмеження щодо гладкості функції при розв'язку, що може бути виражено як геометричні обмеження на еволюційну криву, зазначено на інтернет ресурсі: <https://uk.wikipedia.org/>.

9. Параметричні методи

При застосуванні параметричних методів використовують техніку відновлення многочлена Ланранжа, базуються на визначенні параметра контуру відповідно до деякої стратегії вибірки, і наступної еволюції кожного елемента відповідно до зображення та внутрішніх «термів». Дані техніки є швидкими та ефективними, але початкове "чисто параметричне" формулювання (за Касом Віткіним та Терзополусом в 1987 р. відоме як «змійки») піддане критиці через обмеження, які полягають у виборі стратегії вибірки, внутрішніх геометричних властивостей кривої, зміни топології (поділ та об'єднання кривих), проблеми адресації при вищих вимірах і т.д. На сьогодні розроблені ефективніші «дискретизовані» формулювання для подолання даних обмежень, зберігаючи свою ефективність. В обох випадках оптимізація геометрії виконується методом градієнтного спуску, а для обчислення похідних використовується метод скінченних різниць, зазначено в інтернет ресурсі: <https://uk.wikipedia.org/>. В літературних джерелах можна знайти назву цих методів як одновимірної ієрархічної сегментації сигналів. Даний метод сегментації описаний в роботах Віткіна [464, 465] і полягає у тому, що в масштабному просторі містить ідею про те, що одновимірний сигнал може бути однозначно сегментований на області, використовуючи всього лише один параметр, який керує масштабом сегментації.

10. Методи встановлення рівня

Методи встановлення рівня з самого початку використовувалися для відслідковування об'єктів, котрі переміщувались Ошером та Сетіаном у 1988 р. і увійшли в інші галузі опрацювання зображень наприкінці 90-х. Вони можуть бути використані для ефективного вирішення завдань пошуку кривих поверхонь і т.ін. у неявній формі. Головною ідеєю є представлення еволюціонуючого контуру, використовуючи знакову функцію, нульове значення якої відповідає фактичному контуру. Тоді згідно з рівнянням руху контуру можна легко вивести схожий підхід для неявної поверхні, котра на нульовому рівні буде відображати контур об'єкта. Методи встановлення рівня мають багато переваг, вони задають у неявній формі, не залежать від параметра, що дозволяє просто оцінити геометричні властивості структури, яка еволюціонує, надає можливості зміни топології. Зао, Мерімен та Ошер в 1996 р. запропонували використовувати дані методи як основу у розв'язанні задач оптимізації. З цього випливає, що дані методи можуть бути використані для вирішення різних завдань в області машинного зору та аналізу медичних зображень [444]. Дослідження різноманітних структур даних із використанням методів встановлення рівня дало можливість створити дуже ефективні методи розв'язання цієї задачі, зазначено на інтернет ресурсі: <https://uk.wikipedia.org/>.

11. Методи швидкого проходу

Методи швидкого проходу використовуються при сегментації зображень. Даний підхід був покращений (і дозволив використовувати додатну та від'ємну швидкості поширення) в узагальненому методі швидкого проходу [366], зазначено на інтернет ресурсі: <https://uk.wikipedia.org/>.

12. Методи розрізу графа

Методи розрізу графа ефективно застосовуються для задачі сегментації зображень. У даних методах зображення представляється як зважений неорієнтований граф. Зазвичай піксель або група пікселів асоціюється з вершиною, а ваги ребер визначають несхожість сусідніх пікселів. Потім граф (зображення) розрізається відповідно до критерію, створеному для отримання

«хороших» кластерів. Кожна частина вершин (пікселів), отримувана цими алгоритмами, вважається об'єктом на зображенні. Широко поширені алгоритми цієї категорії, такі, як: нормалізовані розрізи графів [394], випадкове блукання [409], мінімальний розріз [467], ізопериметричний поділ [410] та сегментація за допомогою мінімального зваженого дерева [471], зазначено на інтернет ресурсі: <https://uk.wikipedia.org/>.

13. Метод водоподілу

Це метод, зазначено у інтернет ресурсі: <https://uk.wikipedia.org/>, заснований на областях. Метод відноситься до методів математичної морфології [254]. Даний метод заснований на ідеї, запозиченої з географії, у ній, водоподіл – це хребет, який ділить області різних річкових систем. Розглядаючи зображення як геологічний ландшафт можна сказати, що лінії вододілу це кордони, що розділяють ділянки зображень. У топографічному поданні зображення чисельні значення (наприклад, рівні сірого) кожного пікселя виступають як висоти цієї точки. Перетворення водоподілу обчислює водозбірні басейни та лінії хребтів при тому, що водозбірні басейни – відповідні області зображення, а лінії хребтів – це межі цих областей. Основною проблемою даного алгоритму є надмірна сегментація, оскільки всі межі й шуми подаються в градієнті, що спричинює необхідність усунення шуму. Перший етап видалення шуму в початковому зображенні полягає у застосуванні морфологічних операцій закриття/розкриття, потім обчислюється морфологічний градієнт зображення без шуму і виконується нелінійне перетворення для рівнів сірого на градієнті зображення за допомогою принципу Вебера. Останній етап – обчислення вододілу по нелінійному, розбитому на області, градієнтному зображенню [429]. Зауважимо, що один з найефективніших методів нарощування областей передбачає вибір стартових точок або за допомогою оператора (алгоритм центроїдного зв'язування), або автоматично. Ефективним тут є метод водоподілів, заснований на пошуку локальних мінімумів із подальшим групуванням навколо цих областей по зв'язності [237, 267, 290].

Д.6. Класифікація та порівняльна характеристика відомих методів сегментації циклічних сигналів

У таблиці Д.2 наведено класифікацію та порівняльну характеристику методів опрацювання (сегментації) циклічних сигналів та розроблених методів у дисертаційній роботі (виділені рамкою).

Таблиця Д.2

Порівняльна характеристика методів опрацювання циклічних сигналів

		ВЛАСТИВОСТІ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ										
		ПОВ'ЯЗАНІ З МОРФОЛОГІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ							ПОВ'ЯЗАНІ З РИТМІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ			
		ВРАХОВУЄ СЕГМЕНТНУ СТРУКТУРУ	ВРАХОВУЄ РИТМІЧНУ СТРУКТУРУ	АДАПТУЄТЬСЯ ПІД ЦИКЛІЧНИЙ СИГНАЛ	ПРОЯВЛЯЄ СТІЙКІСТЬ ДО ПРИСУТНОСТІ ШУМУ	ПРОЯВЛЯЄ СТІЙКІСТЬ ДО ПРИСУТНОСТІ ТРЕНДОВОЇ СКЛАДОВОЇ	ДОЗВОЛЯЄ СЕГМЕНТУВАТИ ЦИКЛІЧНІ СИГНАЛИ РІЗНОЇ ФІЗИЧНОЇ ПРИРОДИ	ДОЗВОЛЯЄ ПРОВОДИТИ РОЗПІЗНАВАННЯ СЕГМЕНТІВ (ІДЕНТИФІКАЦІЮ)	ДОЗВОЛЯЄ ПРОВОДИТИ АНАЛІЗ РИТМУ	ДОЗВОЛЯЄ ОЦІНЮВАТИ ВЕЛИЧИНУ ПЕРІОДУ	ДОЗВОЛЯЄ ОЦІНЮВАТИ РИТМІЧНУ СТРУКТУРУ	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
ВІДОМІ МЕТОДИ СЕГМЕНТАЦІЇ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ	ЕВРИСТИЧНІ	МЕТОДИ НА БАЗІ ХВИЛЬОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ (НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТІВ)										
		МЕТОДИ НА БАЗІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ										
		ЧАСТОТНІ МЕТОДИ										
	ДЕТЕРМІНОВАНІ ПІДХОДИ	СТРУКТУРНІ	СТРУКТУРНО-ЛІНГВІСТИЧНІ									
			МЕТОДИ НА ОСНОВІ АМПЛІТУДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛУ									
		МЕТРИЧНІ	МЕТОДИ НА ОСНОВІ РІЗНИЦЕВОЇ ФУНКЦІЇ 1-ГО ПОРЯДКУ									
			МЕТОДИ НА ОСНОВІ РІЗНИЦЕВОЇ ФУНКЦІЇ 2-ГО ПОРЯДКУ (ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ФУНКЦІЇ, ФУНКЦІЇ ФОРМИ) ТА ІНШІ									
			КОМБІНОВАНІ, МЕТОДИ ГІБРИДНІ, НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРІВК									
			МЕТОД ЕТАЛОНІВ									
			НОВИЙ МЕТОД									

Продовж. табл. Д.2

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
ВІДОМІ МЕТОДИ СЕГМЕНТАЦІЇ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ	СТАТИСТИЧНІ	СТОХАСТИЧНІ ПІДХОДИ	ЧАСОВІ МЕТОДИ	СТРУКТУРНІ											
				СТРУКТУРНО-СТАТИСТИЧНІ	+/-	-	+/-	+/-	-	+/-	+	-	-	-	
				НА ОСНОВІ ПОШУКУ РОЗЛАДІВ	ПОСЛІДОВНІ	+/-	-	+	+/-	+/-	+/-	-	-	-	-
				АПОСТЕРІОРНІ	+/-	-	+	+/-	+/-	+/-	-	-	-	-	
				МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗЧС (ЛИШЕ ДЛЯ ЕКС)	+	+/-	+	+	+/-	-	+/-	+/-	-	-	
НА ОСНОВІ БАСОВСЬКИХ ВИПІЛЮЮЧИХ ПРАВИЛ	МЕТОДИ СЕГМЕНТАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРНИХ, ІЄРАРХІЧНИХ МОДЕЛЕЙ	-	+	+	+	-	+	-	+/-	-	-				
		НОВИЙ МЕТОД	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			

“+” - враховує (відображає), “-” - не враховує (не відображає), “+/-” - враховує (відображає) частково.

Додаток Е

Аналіз науково-технічної області моделювання та опрацювання циклічних сигналів з позиції вживаних термінів та понять

Проводячи огляд літературних джерел, які присвячені моделюванню та опрацюванню циклічних сигналів, часто вживають полісемантичні поняття, такі, як “цикл”, “циклічний сигнал”, “зона”, “графоелемент”, “хвиля”, “зубець”, “фаза” “ритм”, “ритмічний сигнал”, “ритміка”, “період”, “періодичний сигнал”, “коливання”, “коливний процес” та інші. Як показує проведений аналіз, багато різних авторів досить часто по-різному називають одні й ті ж речі [205]. Наприклад, щоб вказати на коливний характер процесу чи сигналу, вживаються такі терміни, як циклічний, ритмічний, коливний, періодичний, пульсуючий, вібраційний, репетиційний [1]. Під час описування характерних сегментів (ділянок) циклічних сигналів, які несуть діагностичну інформацію, в багатьох роботах вживають терміни “інтервали”, “хвилі”, “зубці”, “зони”, “графоелементи”, “феномени”. Це лише неповний перелік вживаних термінів лікарями та науковцями-дослідниками [1, 2, 27]. У роботі [152] як синоніми використовуються терміни циклічний, ритмічний, стохастично періодичний. А один і той же клас випадкових процесів, що враховує періодичність його ймовірнісних характеристик, називають стохастично періодичним [228], періодично розподіленим [109], циклостационарним [370–375], періодично нестационарним процесом [25, 26, 94]. Часто під терміном “період функції” одночасно розуміють як число, через яке повторюються значення періодичної функції, так і певний сегмент цієї функції, що визначений на інтервалі довжиною, яка дорівнює періоду. Інші автори навпаки вказують на суттєві відмінності між деякими поняттями-термінами [205].

Ряд зазначених понять вживаються в строгому математичному сенсі, а інші не мають такого чіткого математичного тлумачення й використовуються лише як загальнонаукові поняття на інтуїтивному рівні. Зокрема, поняття термін “періодичний сигнал” має чіткий математичний відповідник – “періодична

функція», чого не можна сказати про інші поняття, такі, як коливний, циклічний, ритмічний сигнали чи процеси.

Зважаючи на таку значну омонімію та синонімію зазначеної термінології, у рамках даного дисертаційного дослідження надамо чітку інтерпретацію таким термінам, як «сегмент», «цикл», «зона», «циклічний сигнал», «фаза», «ритм», які у своїй сукупності становлять основу термінологічно-понятійного апарату методології сегментації та опрацювання циклічних сигналів.

Зупинимось на аналізі термінів «цикл», «зона», «циклічний сигнал», «сегмент», «фаза».

Згідно з великим тлумачним словником української мови [51] поняттям «цикл», «зона», «сегмент», «циклічність», «коливання» надається таке тлумачення.

«*Цикл* – 1) сукупність взаємопов'язаних явищ, процесів, робіт, яка створює закінчене коло дій протягом певного проміжку часу; 2) послідовний ряд чого-небудь».

«*Циклічний* – система організації виробництва, при якій за певний відрізок часу виконується цикл робіт, що повторюється в певній послідовності».

«*Колівання* – дія за значенням *коливати*».

«*Коліватися* – ритмічно рухатися з одного боку в інший».

«*Зона* – 1) певний простір, район, територія, що характеризується спільними ознаками».

Згідно з новим тлумачним словником української мови [250–253]:

«*Цикл* – 1) сукупність взаємопов'язаних явищ, процесів, робіт, яка створює закінчене коло дій протягом певного проміжку часу, серії; 2) послідовний ряд чого-небудь. 3) певна група наук, дисциплін, об'єднаних за яким-небудь загальним принципом».

«*Колівати* – змушувати коліватися; похитувати, гойдати, хилити. Ритмічно рухати з одного боку в інший, назад і вперед або зверху вниз».

«*Сегмент* – 1) у математиці – частина круга, обмежена дугою та хордою, а також частина кулі, відокремлена січною площиною; фігура, предмет або частина площі такої форми; у техніці – назва деяких деталей такої форми».

Згідно з математичним енциклопедичним словником [232]:

«*Цикл* – то же, что повторение – команда исполнителю многократно повторить указанную последовательность команд. Является важнейшим средством, позволяющим исполнителю выполнять длинные последовательности действий на основе коротких предписаний».

Згідно з політехнічним словником [137]:

«*Цикл* – совокупность процессов в системе периодически повторяющихся явлений, при которых объект, подвергающийся изменению в определенной последовательности, вновь приходит в исходное состояние».

«*Колебание* – движение (изменения состояния), характеризующиеся той или иной степенью повторяемости во времени».

Щоб зробити акцент на суто циклічний характер часової або просторової структури досліджуваних сигналів, використовуємо термін “циклічний сигнал” [201], а не “коливний сигнал” чи “коливання”, оскільки часто, наприклад, у роботі [84] під коливанням розуміють довільний фізичний процес чи сигнал, що призводить до втрати специфіки цього терміну.

Згідно з радянським енциклопедичним словником [308]:

«*Цикл* – (от греческого “*ky'klos*” – круг), 1) совокупность явлений, процессов, составляющая кругооборот в течении известного промежутка времени».

«*Зона* – (от греческого “*zōnē*” – пояс), полоса, пространство между какими-либо границами; территория, участок чего-либо, характеризующийся определёнными принципами».

«*Сегмент* – (от латинского “*segmentum*” – отрезок), 1) часть круга, ограниченного дугой и её хордой, отрезок».

Тому термін «*сегментація*», враховуючи подане вище поняття сегмента, будемо вживати, розуміючи, що це процес виділення, відокремлення, розмежування, встановлення меж деякого сегмента.

«*Фаза* – (от греческого “*pha'sis*” – появление), 1) определённый момент в ходе развития какого-либо процесса; 2) в физике, технике фаза колебаний –

состояние колебательного процесса в определённый момент времени (фаза гармонического колебания)».

Крім зазначених понять, необхідно дати означення «атрибуту», оскільки в дисертаційній роботі воно є важливим при побудові методології циклічних сигналів.

«*Атрибут* – (от латинского “attribuo” – придаю, наделяю), 1) необходимое, существенное, неотъемлемое свойство объекта».

Під терміном «цикл» будемо розуміти впорядковану множину фаз, що становить завершене коло у розвитку, розгортанні деякого явища, процесу чи сигналу. А точніше, цикли – це найдрібніші сегменти циклічного сигналу, які складаються із однієї й тієї ж упорядкованої множини фаз та між якими існує відповідність за атрибутом (атрибутами).

Під терміном «зона» будемо розуміти сегмент циклічного сигналу, який є частиною ділянки, фрагмента циклу, сегмента-циклу, він також складається з однієї й тієї ж упорядкованої множини фаз, між якими існує відповідність за атрибутом для такого ж сегменту-зони, але в інших циклах циклічного сигналу. Поняття зон більш деталізує поняття циклу (циклічної структури).

Під терміном «сегмент» будемо розуміти визначену ділянку, фрагмент (часовий або просторовий) досліджуваного циклічного сигналу, яка відповідає циклу або зоні в циклі. Поки не визначена належність фрагмента, ділянки сигналу до циклу чи до зони (не проведена їх ідентифікація), будемо називати їх узагальнюючою назвою – «сегмент».

Під терміном «циклічний сигнал» («циклічний процес») будемо розуміти сигнал (процес), який розвивається (розгортається, еволюціонує) циклами, що мають у деякому сенсі подібні (однакові) властивості та структуру. А точніше, циклічний за атрибутом (атрибутами) сигнал є упорядкованою множиною циклів, між якими існує подібність за цим атрибутом (атрибутами).

Поняття циклу та циклічного сигналу базуються на понятті фази. Поняття “фаза” в науково-технічній літературі має різні смислові відтінки та особливості. У загальнонауковому розумінні “фаза” – це певний етап, стадія у розвитку,

розгортанні деякого явища, процесу чи сигналу. У строгому математичному сенсі термін “фаза” використовується для позначення аргументу синусоїди чи косинусоїди, але у цьому випадку термін “фаза” має суто вузько спеціалізоване значення і стосується найпростіших видів циклічних функцій, а саме, гармонічних.

Більш широкого строго математичного сенсу термін “фаза” набуває в рамках теорії фазового простору (простору станів). У теорії фазового простору термін "фаза" означає будь-який елемент (точку) фазового простору, що не враховує циклічну специфіку розгортання станів системи у часі, оскільки описує будь-які, зокрема і не циклічні траєкторії руху системи, а також безпосередньо не враховує упорядкованість фаз у досліджуваному процесі. Коли ж думають про фазу в циклічному сигналі, то завжди мають на увазі не лише його конкретне значення (елемент фазового простору), але й місце в рамках циклу серед решта його фаз, тобто враховують упорядкований характер фаз у кожному циклі циклічного сигналу чи явища. У рамках циклу коливного процесу всі його фази повинні бути розрізнені між собою, навіть якщо процес у цих фазах приймає однакові значення. Тобто необхідно врахувати унікальність кожної фази у циклі [201, 205].

Крім того, інтуїтивний образ циклічного сигналу враховує не лише строгу рівність значень однотипних фаз у різних циклах циклічного сигналу (наприклад, як це є для числових періодичних функцій), але, в загальному випадку, їх приблизне співпадання (наприклад, стохастично періодичний процес – через період процес повторюється не точно, а лише в рамках визначеної стохастичної еквівалентності, майже періодична функція – через майже період значення функції не обов’язково рівні, але модуль їх різниці не перевищує деяку фіксовану додатну величину). Отже, у загальному випадку, під фазою слід розуміти не елемент фазового простору, а певну його підмножину, що утворена на основі деякої спільної властивості, яка має місце для всіх тих елементів фазового простору, які інтерпретуються як один стан системи і є такими відліками циклічного сигналу, які знаходяться лише у різних його циклах [201, 205].

Отже, в поняття “фаза” в теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів, повинен закладатися специфічніший зміст, ніж це є в теорії фазового простору, а саме: цей зміст повинен обов’язково відображати впорядковану структуру фаз у всіх циклах коливного явища та, загалом, множинну природу фази [201, 205].

Зупинимося на аналізі термінів “ритм”, “ритміка”, “ритмічний”. Згідно з великим тлумачним словником української мови [51] поняттям “ритм”, “ритміка”, “ритмічний” надається таке тлумачення.

«*Ритм* – рівномірне чергування впорядкованих елементів».

«*Ритміка* – 1) сукупність усіх конкретних провів ритму; 2) наука про ритм та його закономірності».

«*Ритмічний* – який підпорядкований ритму, відбувається у ритмі, безперебійний».

Згідно з новим тлумачним словником української мови [250–253]:

«*Ритм* – рівномірне чергування впорядкованих елементів, циклів, фаз, тих чи інших процесів і явищ, темп, пульс».

«*Ритміка* – 1) сукупність усіх конкретних провів ритмів; 2) наука про ритм».

Згідно з політехнічним словником [137]:

«*Ритм* – (от греческого *rhythmo's* – соразмерность) – создается чередованием различных элементов и членений, которые могут метрически повторяться или располагаться в нарастающем или убывающем порядке при решении конкретных композиционных задач».

Згідно з радянським енциклопедичним словником [308]:

«*Ритм* – (от греческого *rhythmo's* – соразмерность), 1) чередование чего-либо, элементов звуковых, речевых и тому подобное; 2) происходящее с определённой последовательностью, частотой, скоростью протекания».

Термін "*ритм*" походить від грецького й означає розмірність, узгодженість і в тлумачних словниках інтерпретується як рівномірне чергування впорядкованих елементів, зокрема, впорядковане чергування циклів. Таке тлумачення ритму

подібне даному нами вище тлумаченню терміну “циклічний сигнал”. Тому з метою мінімізації синонімії будемо вживати термін “ритм” у дещо іншому сенсі, а саме, як темп, пульс коливного процесу [201, 205].

У даній дисертаційній роботі під *ритмом* будемо розуміти властивість, яка притаманна будь-якому циклічному сигналу і яка визначає особливості його розгортання в часі або просторі, а точніше задає величини часових або просторових проміжків між однофазними значеннями циклічного сигналу для всіх його циклів, зон та фаз. Ритм циклічного сигналу може бути стабільним, а може бути і нестабільним, змінним, мінливим, також спільним. Наприклад, кажуть, що серце б’ється ритмічно, серцевий ритм є стабільним. Або кажуть, що технологічний, виробничий процес є ритмічним. У протилежність цьому кажуть – серце б’ється неритмічно, присутня аритмія, виробництво неритмічне (є збої виробничого процесу).

Іноколи термін “ритмічний” вживається для позначення синхронності, спільності ритму кількох циклічних сигналів, однак ритмічність – це поняття, що може характеризувати і один циклічний сигнал, безвідносно до якогось іншого. Для термінологічного позначення факту спільності ритмічної структури двох чи більше циклічних сигналів краще підходить словосполучення “*ритмічна пов’язаність*” або “*синхронність*”. Під *ритмічним сигналом* будемо розуміти циклічний сигнал зі стабільним, постійним ритмом, тобто часові або просторові відстані між однофазними відліками циклічного сигналу в його сусідніх циклах є постійними для будь-яких його фаз та будь-яких двох його сусідніх циклів. Прикладом ритмічного сигналу є сигнал, який описується періодичною функцією (детермінованою чи стохастичною).

В даній дисертаційній роботі використовується поняття «сегментна структура», натомість у ранніх роботах [190, 184] можна зустріти термін «зонно-часова структура». Він був введений у роботах, які стосувалися опрацювання кардіосигналів, зокрема ЕКС [198, 190, 184]. Оскільки розвивалися методи опрацювання циклічних сигналів, зокрема методи сегментації, опрацювання сигналів проводилося не лише в часовій області, а також в області аналізу

просторових координат [414, 417]. Необхідно відзначити, що поняття «зонно-часової структури» не враховує поняття «фази» і «атрибутів», а тому не може використовуватися для побудови узагальнюючої методології сегментації циклічних сигналів. З метою побудови єдиного теоретико-методологічного підходу до сегментації циклічних сигналів було введено поняття «сегментної структури», яке формалізує, розширює поняття «зонної часової структури» та уточнює поняття сегментної циклічної та сегментної зонної структур.

Під «сегментною структурою» розуміємо сукупність, множину впорядкованих моментів, часових або просторових, які відповідають початку та кінцю сегментів-циклів або сегментів-зон і які є ізоморфними відносно порядку, а значення, які їм відповідають, рівні за атрибутом (атрибутами). Визначення сегментної структури (процедура сегментації) є аналогічним знаходженню розбиття області визначення циклічного сигналу. При цьому необхідно проводити ідентифікацію структури, яка була отримана – сегментна циклічна чи сегментна зонна структура відповідно.

Відліки «сегментної структури» відповідають відлікам «ритмічної структури», яка є дискретною функцією ритму. Оскільки в такій структурі можна завжди виділити її елементи (відліки), які відповідають межам сегментів-циклів чи сегментів-зон, то будемо вживати терміни «ритмічна циклічна структура» чи «ритмічна зонна структура», які пов'язані відповідно з «сегментною циклічною структурою» чи з «сегментною зонною структурою». При цьому узагальнюючий термін «ритмічна структура» будемо вживати у випадку загальної, не ідентифікованої структури – «сегментної структури». Крім цього, відліки в такій структурі, якщо їх описувати через поняття «фази», є однофазними для відповідних меж сегментів-циклів чи сегментів-зон при такому підході можна казати про «фазову структуру» циклічного сигналу, яка відповідає дискретним значенням циклічного сигналу.

Додаток Ж

Абстрактні циклічні функції з сегментною структурою як моделі циклічних сигналів

Ж.1. Абстрактна функція з сегментною зонною структурою

Відомо багато типових сигналів в інформаційних системах, які на неперетинаючих часових (просторових) областях утворюються за різними принципами, мають різну часову чи просторову структуру, породжуються різними системами чи підсистемами складної системи, відображають різні її фази, етапи роботи. Прикладами таких сигналів можуть бути кардіосигнали, процеси із розладками, механічні сигнали, що зображаються у вигляді різних сплайнів чи wavelet-функцій та інші. Для математичних моделей таких сигналів характерно те, що їх можна записати у вигляді ряду досить загальних конструкцій.

Якщо маємо вектор N довільних абстрактних функцій [205], що задані на області \mathbf{R} та набувають значення із деякого лінійного простору Ψ , тобто

$$\Xi_N(t) = \{\hat{f}_i(t) \in \Psi, t \in \mathbf{R}, i = \overline{1, N}\}, \quad (\text{Ж.1})$$

та маємо розбиття $\mathbf{D}_R = \{\mathbf{W}_i, i = \overline{1, N}\}$ області визначення \mathbf{R} , тобто для елементів \mathbf{D}_R мають місце такі співвідношення:

$$\bigcup_{i=1}^N \mathbf{W}_i = \mathbf{R}, \quad \mathbf{W}_i \neq \emptyset, \quad \mathbf{W}_i \cap \mathbf{W}_j = \emptyset, \quad \forall i \neq j, i, j = \overline{1, N}. \quad (\text{Ж.2})$$

Елементи \mathbf{W}_i розбиття \mathbf{D}_R є такими півінтервалами $\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1})$.

Із елементами розбиттям \mathbf{D}_R бієктивно пов'язані індикаторні функції

$\{I_{\mathbf{W}_i}(t), i = \overline{1, N}\}$, що означаються згідно з виразом

$$I_{\mathbf{W}_i}(t) = \begin{cases} 1, & t \in \mathbf{W}_i, \\ 0, & t \notin \mathbf{W}_i, \end{cases} \quad i = \overline{1, N}. \quad (\text{Ж.3})$$

Означення Ж.1. Функцію, яку наведено у вигляді конструкції [205],

$$f(t) = \sum_{i=1}^N \hat{f}_i(t) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t), \quad t \in \mathbf{R}, \quad (\text{Ж.4})$$

будемо називати абстрактною функцією із сегментною зонною структурою (із N сегментами-зонами).

Відзначимо, що абстрактна функція із сегментною зонною структурою (Ж.4) може бути наведена, використовуючи й інші математичні конструкції. Одним із способів зображення абстрактної функції із сегментною зонною структурою є її зображення

$$f(t) = \sum_{i=1}^N \tilde{f}_i(t), \quad t \in \mathbf{R}, \quad (\text{Ж.5})$$

де $\{\tilde{f}_i(t) \in \Psi, t \in \mathbf{R}, i = \overline{1, N}\}$ – вектор абстрактних функцій, які дорівнюють

$$\tilde{f}_i(t) = f(t) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t), \quad t \in \mathbf{R}. \quad (\text{Ж.6})$$

Компоненти $\{\tilde{f}_i(t) \in \Psi, t \in \mathbf{R}, i = \overline{1, N}\}$ конструкції (Ж.5) та компоненти $\{\hat{f}_i(t) \in \Psi, t \in \mathbf{R}, i = \overline{1, N}\}$ конструкції (Ж.4) є пов'язаними співвідношеннями

$$\tilde{f}_i(t) = \begin{cases} \hat{f}_i(t), & t \in \mathbf{W}_i, \\ 0, & t \notin \mathbf{W}_i, \end{cases} \quad i = \overline{1, N}, \quad (\text{Ж.7})$$

або, що аналогічно

$$\tilde{f}_i(t) = \hat{f}_i(t) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t), t \in \mathbf{R}, i = \overline{1, N}. \quad (\text{Ж.8})$$

Тобто в конструкції (Ж.5) відповідні i -ті компоненти на відповідних i -тих множинах $\mathbf{W} = \mathbf{R} \setminus \mathbf{W}_i$ тотожно дорівнюють нулеві.

Ще одним способом зображення абстрактної функції із сегментною зонною структурою ґрунтується на використанні поняття упорядкованого об'єднання її сегментів-зон. Якщо інтерпретувати абстрактну функцію та її зони як множини пар “аргумент – значення функції”, то саму абстрактну функцію можна навести як упорядковане об'єднання

$$\{(t, f(t)), t \in \mathbf{R}\} = \bigcup_{i=1}^N \{(t, f_i(t)), t \in \mathbf{W}_i\}, \quad (\text{Ж.9})$$

де $\{(t, f_i(t)), t \in \mathbf{W}_i\}$ – множина пар “аргумент – значення функції”, що задає i -ту зону функції $f(t)$ ($f_i(t) = f(t), t \in \mathbf{W}_i$). На відміну від функцій $\hat{f}_i(t)$ та $\tilde{f}_i(t)$, які задані на всій області визначення \mathbf{R} , кожна i -та функція $f_i(t)$ задана лише на i -му елементі \mathbf{W}_i розбиття $\mathbf{D}_{\mathbf{R}}$.

Зображенням абстрактної функції із сегментною зонною структурою, яке використовує функції $f_i(t), t \in \mathbf{W}_i$, може бути наведено так:

$$f(t) = \begin{cases} f_1(t), t \in \mathbf{W}_1, \\ \vdots \\ f_N(t), t \in \mathbf{W}_N. \end{cases} \quad (\text{Ж.10})$$

Означення абстрактної функції із сегментною зонною структурою має досить загальний характер, що шляхом конкретизації компонент вектора $\Xi_N(t)$ та розбиття $\mathbf{D}_{\mathbf{R}}$ дає змогу з єдиних позицій зображати дуже широкий клас сигналів, моделями яких, наприклад, є кусково-стаціонарні випадкові процеси (процеси із розладками), wavelet-функції, сплайни та інші. Розглянемо циклічні функції в

межах двох підходів – детермінованого та стохастичного.

Ж.2. Детерміновані циклічні функції з сегментною структурою

На практиці серед існуючих різних детермінованих циклічних функцій із сегментною структурою широко використовуються дискретні циклічні числові функції дискретного аргументу, значеннями яких є дійсні числа $\Psi = \mathbf{R}$. Розглянемо саме їх.

Означення Ж.2. Детермінована циклічна числова функція дискретного аргументу із сегментною структурою називається функцією $f(t_k) \in \Psi = \mathbf{R}, t_k \in \mathbf{W} = \mathbf{D} = \{t_k, k = \overline{1, K}\}$, яку наведено у вигляді (через цикли, сегменти-цикли циклічної функції)

$$f(t_k) = \sum_{i \in \mathbf{Z}} f_i(t_k), t_k \in \mathbf{W}, \quad (\text{Ж.11})$$

де t_k – дискретні відліки циклічної числової функції.

На практиці завжди маємо справу з скінченою кількістю дискретних відліків досліджуваного сигналу, тобто $k = \overline{1, K}$.

У формулі (Ж.11) $i \in \mathbf{Z}$, проте, проводячи опрацювання циклічного сигналу, в задачах діагностики чи прогнозу, необхідно визначити цілу кількість циклів досліджуваного сигналу, тобто $i = \overline{1, C}$, де C – кількість сегментів-циклів циклічної функції; $f_i(t_k)$ – відповідає i -му циклу детермінованої циклічної числової функції дискретного аргументу із сегментною структурою, яка визначається так:

$$f_i(t_k) = f(t_k) \cdot I_{\mathbf{w}_i}(t_k), i = \overline{1, C}, t_k \in \mathbf{W}, \quad (\text{Ж.12})$$

де $I_{\mathbf{w}_i}(t_k)$ – індикаторна функція i -го циклу, що дорівнює

$$I_{\mathbf{W}_i}(t_k) = \begin{cases} 1, & t_k \in \mathbf{W}_i, \\ 0, & t_k \notin \mathbf{W}_i. \end{cases}, \quad i = \overline{1, C}. \quad (\text{Ж.13})$$

Області визначення \mathbf{W}_i індикаторної функції i -го сегмента-циклу для випадку детермінованої циклічної числової функції (дискретного циклічного сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{D}$), визначаються

$$\mathbf{W}_i = \{t_{i,l}, i = \overline{1, C}, l = \overline{1, L}\}, \quad (\text{Ж.14})$$

де $t_{i,l}$ – відліки моментів часу, які відповідають i -му сегменту-циклу; L – кількість дискретних відліків на сегменті-циклі, $L = \text{const}$.

Множина відліків моментів часу, яка визначає межі i -го сегмента-циклу, визначаються

$$\hat{\mathbf{W}}_i = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}, \quad (\text{Ж.15})$$

де \hat{t}_i – відліки моментів часу, які відповідають межах сегментів-циклів.

Для дискретної циклічної числової функції, враховуючи співвідношення (2.28) та (2.35), справедливо таке: для атрибутів із урахуванням функції ритму $p(f(t_k)) = p((t_k + T(t_k, n))) \in \mathbf{A}, t_k \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}$; для фази, з врахуванням функції ритму $f_{\varphi\alpha} = \{(t_k^\alpha + T(t_k^\alpha, n), f(t_k^\alpha + T(t_k^\alpha, n))), t_k^\alpha = \text{const} \in \mathbf{W}_i, n \in \mathbf{Z}\}$.

Наведені співвідношення враховують сегментну циклічну структуру. Аналогічним чином можна записати співвідношення, які враховують сегментну зонну структуру (зонно-циклічну структуру).

Перейдемо до розгляду випадкових циклічних функцій.

Ж.3. Випадкові циклічні функції (випадкові процеси з сегментною зонною структурою) та їх імовірнісні характеристики

Врахування абстрактної циклічної функції з сегментною структурою дає

зможу описувати, проводити аналіз та дослідження її структури. Поширимо ці ідеї для циклічного випадкового процесу, який є частинним випадком абстрактної циклічної функції з сегментною структурою, якщо його область значень є лінійним (як правило, Гільбертовим) простором випадкових величин, які задано на одному і тому ж імовірнісному просторі. Нагадаємо, що в пункті 2.2 було сказано, що в загальному сегментну структуру можна розглядати як детерміновану, так і випадкову.

Дамо наступне означення випадкового процесу із випадковою сегментною зонною структурою [205]. Нехай маємо вектор N довільних випадкових процесів

$$\Xi_{\xi}(\omega, t) = \left\{ \hat{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N}, \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R} \right\} \quad (\text{Ж.16})$$

та випадкове розбиття $\mathbf{D}_{\mathbf{R}}(\omega) = \left\{ \mathbf{W}_i(\omega) = [t_i(\omega), t_{i+1}(\omega)), i = \overline{1, N} \right\}$ множини дійсних чисел \mathbf{R} , з яким пов'язані випадкові індикаторні функції $\left\{ I_{\mathbf{W}_i(\omega)}(t), i = \overline{1, N} \right\}$, що означається згідно з виразом

$$I_{\mathbf{W}_i(\omega)}(t) = \begin{cases} 1, & t \in \mathbf{W}_i(\omega), \\ 0, & t \notin \mathbf{W}_i(\omega), \end{cases} \quad i = \overline{1, N}. \quad (\text{Ж.17})$$

Випадкові підобласті $\mathbf{W}_i(\omega) = [t_i(\omega), t_{i+1}(\omega))$ задовольняють умовам

$$\bigcup_{i=1}^N \mathbf{W}_i(\omega) = \mathbf{R}, \quad \mathbf{W}_i(\omega) \cap \mathbf{W}_j(\omega) = \emptyset, \quad \forall \omega \in \Omega, \quad \forall i \neq j, \quad i, j = \overline{1, N}. \quad (\text{Ж.18})$$

Означення Ж.3. Випадковий процес [205], який наведено у вигляді конструкції

$$\xi(\omega, t) = \sum_{i=1}^N \hat{\xi}_i(\omega, t) \cdot I_{\mathbf{w}_i(\omega)}(t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R} \quad (\text{Ж.19})$$

будемо називати випадковим процесом із випадковою сегментною зонною структурою (із N зонами).

Відзначимо, що при означенні випадкового процесу (Ж.19) із сегментною зонною структурою не вказано, які ймовірнісні характеристики мають вектори (Ж.16) та випадкові індикаторні функції (Ж.17), що вказує на можливість використання моделі (Ж.19) для зображення широкого класу реальних сигналів.

Дамо означення випадкового процесу, який є частинним випадком процесу (Ж.19), коли розбиття $\mathbf{D}_{\mathbf{R}} = \left\{ \mathbf{w}_i = [t_i, t_{i+1}), i = \overline{1, N} \right\}$ є не випадковим.

Нехай маємо вектор N довільних випадкових процесів (Ж.16) та не випадкове розбиття $\mathbf{D}_{\mathbf{R}} = \left\{ \mathbf{w}_i = [t_i, t_{i+1}), i = \overline{1, N} \right\}$ множини дійсних чисел \mathbf{R} , з яким пов'язані індикаторні функції $\left\{ I_{\mathbf{w}_i}(t), i = \overline{1, N} \right\}$. Елементи $\mathbf{D}_{\mathbf{R}}$ задовольняють умовам (Ж.2), а індикаторні функції $\left\{ I_{\mathbf{w}_i}(t), i = \overline{1, N} \right\}$ означають згідно з (Ж.3).

Означення Ж.4. Випадковий процес [202], який наведено у вигляді конструкції

$$\xi(\omega, t) = \sum_{i=1}^N \hat{\xi}_i(\omega, t) \cdot I_{\mathbf{w}_i}(t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{Ж.20})$$

будемо називати випадковим процесом із детермінованою сегментною зонною структурою (із N зонами).

На рисунку Ж.1 умовно зображено структурну схему формування випадкового процесу із сегментною зонною структурою, що відображає його конструкцію (Ж.19). Згідно з цим рисунком, вектор випадкових процесів (Ж.16)

формується множиною станів підсистем $\{S_1, \dots, S_N\}$ або множиною станів однієї системи, а закономірність перемикання ключа K визначається множиною індикаторних функцій (Ж.17).

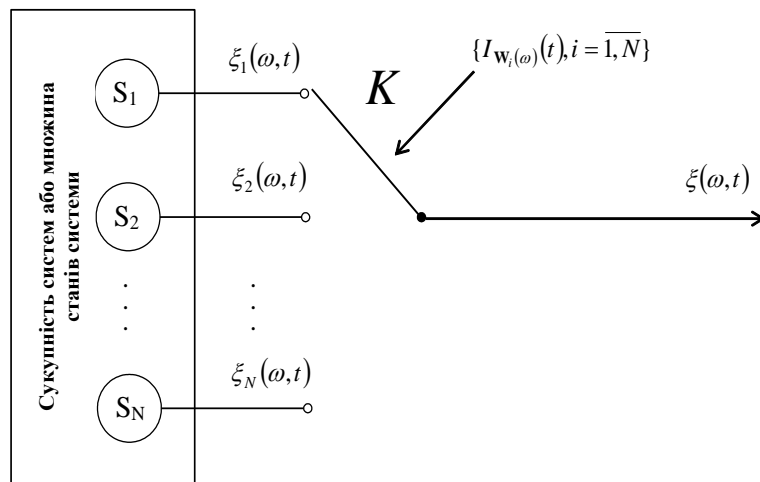


Рис. Ж.1. Структурна схема формування випадкового процесу з сегментною зонною структурою

Зупинимося на можливих задачах, що пов'язані із конструкціями (Ж.19) та (Ж.20). Серед розглянутих задач можна виділити задачу аналізу, пряму задачу та задачу синтезу. Задача аналізу може бути розв'язана однозначно, тобто за заданими ймовірнісними характеристиками вектора випадкових процесів (Ж.16) та ймовірнісними характеристиками розбиття $\mathbf{D}_R(\omega)$ множини дійсних чисел \mathbf{R} . Можна знайти однозначний розв'язок – імовірнісні характеристики результуючого випадкового процесу з сегментною зонною структурою. Задача синтезу, тобто задача пошуку ймовірнісних характеристик випадкового вектора (Ж.16) та ймовірнісних характеристик індикаторних функцій (Ж.17) чи розбиття $\mathbf{D}_R(\omega)$, якщо задано ймовірнісні характеристики випадкового процесу (Ж.19) із сегментною зонною структурою, однозначного розв'язку не має, а існує багато можливих розв'язків. При опрацюванні випадкового процесу із сегментною зонною структурою також постає задача визначення розбиття $\mathbf{D}_R(\omega)$, що має складний неоднозначний характер. Власне цю задачу можна розв'язати за

методами сегментації.

Розглянемо лише задачу аналізу (пряму задачу) для конструкції (Ж.20). Оскільки процес (Ж.20) задано у конструктивній формі, а не аксіоматично, то питання визначення ймовірнісних характеристик процесу із сегментною зонною структурою залишається відкритим.

Припустимо, що ймовірнісні характеристики (багатовимірні функції розподілу та сумісні багатовимірні функції розподілу) вектора випадкових процесів (Ж.16) і множина індикаторних функцій (Ж.3) є заданими, а саме, задано сімейство багатовимірних функцій розподілу

$$\begin{aligned} & \left\{ F_{1_{\xi_i}}(x; t), i = \overline{1, N} \right\}, \\ & \left\{ F_{2_{\xi_{i_1} \xi_{i_2}}}(x_1, x_2; t_1, t_2), i_1, i_2 = \overline{1, N} \right\}, \\ & \quad \cdot \\ & \quad \cdot \\ & \quad \cdot \\ & \left\{ F_{k_{\xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k), i_1, \dots, i_k = \overline{1, N} \right\}; \end{aligned}$$

та задане не випадкове розбиття $\mathbf{D}_R = \left\{ \mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1}), i = \overline{1, N} \right\}$, що є сукупністю часових підобластей, на яких визначені відповідні зони випадкового процесу (Ж.20).

Знайдемо спочатку вигляд одновимірної функції розподілу $F_{\xi}(x, t)$ процесу (Ж.20) із сегментною зонною структурою. Оскільки множина індикаторних функцій $\left\{ I_{\mathbf{W}_i}(t), i = \overline{1, N} \right\}$ розбиває часову область визначення \mathbf{R} випадкового процесу $\xi(\omega, t)$ на неперетинаючі підобласті $\left\{ \mathbf{W}_i \subset \mathbf{R}, i = \overline{1, N} \right\}$, то розглянемо одновимірну функцію розподілу цього процесу на кожній підобласті. На

відповідній i -тій підобласті випадковий процес $\xi(\omega, t)$ дорівнює i -тій компоненті $\hat{\xi}_i(\omega, t)$ випадкового вектора $\Xi_\xi(\omega, t)$, а саме,

$$\xi(\omega, t) = \hat{\xi}_i(\omega, t), t \in \mathbf{W}_i, i = \overline{1, N}. \quad (\text{Ж.21})$$

Тому його одновимірна функція розподілу $F_{1_\xi}(x; t)$ на підобласті \mathbf{W}_i дорівнює одновимірній функції розподілу $F_{1_{\hat{\xi}_i}}(x; t)$ i -тої компоненти $\hat{\xi}_i(\omega, t)$ випадкового вектора $\Xi_\xi(\omega, t)$. Отже одновимірну функцію процесу (Ж.20) можна навести у вигляді

$$F_{1_\xi}(x; t) = \sum_{i=1}^N F_{1_{\hat{\xi}_i}}(x; t) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t), t \in \mathbf{R}, \quad (\text{Ж.22})$$

де $\{F_{1_{\hat{\xi}_i}}(x; t), i = \overline{1, N}\}$ – множина одновимірних функцій розподілу відповідних компонент вектора (Ж.7).

Розглянемо багатовимірні функції розподілу процесу (Ж.20). Цей випадок є складнішим попереднього, тому будемо записувати багатовимірні характеристики процесу (Ж.20) поступово. Спочатку розглянемо найпростіші випадки.

Процес із двома сегментами-зонами ($N = 2$). У цьому разі процес (Ж.20) буде мати вигляд

$$\xi(\omega, t) = \sum_{i=1}^2 \hat{\xi}_i(\omega, t) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t) = \hat{\xi}_1(\omega, t) \cdot I_{\mathbf{W}_1}(t) + \hat{\xi}_2(\omega, t) \cdot I_{\mathbf{W}_2}(t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}. \quad (\text{Ж.23})$$

Віднайдемо вигляд двовимірної функції розподілу процесу (Ж.23).

Двовимірна функція розподілу $F_{2_\xi}(x_1, x_2, t_1, t_2)$ випадкового процесу (Ж.23) у фіксовані моменти часу t_1 та t_2 є функцією розподілу двох випадкових величин

$\xi_{t_1}(\omega)$ та $\xi_{t_2}(\omega)$, які можуть бути вибрані з випадкових процесів $\hat{\xi}_1(\omega, t)$ та $\hat{\xi}_2(\omega, t)$ чотирма варіантами:

1. Випадкові величини вибираються із процесу $\hat{\xi}_1(\omega, t)$, тобто $\xi_{t_1}(\omega) = \hat{\xi}_1(\omega, t_1)$ та $\xi_{t_2}(\omega) = \hat{\xi}_1(\omega, t_2)$ за умови, що $t_1, t_2 \in \mathbf{W}_1$.

2. Випадкові величини вибираються із процесу $\hat{\xi}_2(\omega, t)$, тобто $\xi_{t_1}(\omega) = \hat{\xi}_2(\omega, t_1)$ та $\xi_{t_2}(\omega) = \hat{\xi}_2(\omega, t_2)$ за умови, що $t_1, t_2 \in \mathbf{W}_2$.

3. Випадкова величина $\xi_{t_1}(\omega)$ вибирається із процесу $\hat{\xi}_1(\omega, t)$, а величина $\xi_{t_2}(\omega)$ із процесу $\hat{\xi}_2(\omega, t)$, тобто $\xi_{t_1}(\omega) = \hat{\xi}_1(\omega, t_1)$, а $\xi_{t_2}(\omega) = \hat{\xi}_2(\omega, t_2)$ за умови, що $t_1 \in \mathbf{W}_1, t_2 \in \mathbf{W}_2$.

4. Випадкова величина $\xi_{t_1}(\omega)$ вибирається із процесу $\hat{\xi}_2(\omega, t)$, а величина $\xi_{t_2}(\omega)$ із процесу $\hat{\xi}_1(\omega, t)$, тобто $\xi_{t_1}(\omega) = \hat{\xi}_2(\omega, t_1)$, а $\xi_{t_2}(\omega) = \hat{\xi}_1(\omega, t_2)$, якщо $t_1 \in \mathbf{W}_2, t_2 \in \mathbf{W}_1$.

Відповідно до вищенаведеного, двовимірна функція розподілу процесу (Ж.14) визначається через двовимірну функцію розподілу $F_{2_{\hat{\xi}_1}}(x_1, x_2; t_1, t_2)$ процесу $\hat{\xi}_1(\omega, t)$, двовимірну функцію розподілу $F_{2_{\hat{\xi}_2}}(x_1, x_2; t_1, t_2)$ процесу $\hat{\xi}_2(\omega, t)$ та сумісні двовимірні функції розподілу $F_{2_{\hat{\xi}_1\hat{\xi}_2}}(x_1, x_2; t_1, t_2)$ та $F_{2_{\hat{\xi}_2\hat{\xi}_1}}(x_1, x_2; t_1, t_2)$ процесів $\hat{\xi}_1(\omega, t)$ та $\hat{\xi}_2(\omega, t)$.

Отже, двовимірна функція розподілу процесу (Ж.23) із двома зонами дорівнює

$$F_{2_{\xi}}(x_1, x_2; t_1, t_2) = F_{2_{\hat{\xi}_1}}(x_1, x_2; t_1, t_2) \cdot I_{\mathbf{W}_1^2}(t_1, t_2) + F_{2_{\hat{\xi}_2}}(x_1, x_2; t_1, t_2) \cdot I_{\mathbf{W}_2^2}(t_1, t_2) + F_{2_{\hat{\xi}_1\hat{\xi}_2}}(x_1, x_2; t_1, t_2) \cdot I_{\mathbf{W}_{12}}(t_1, t_2) + F_{2_{\hat{\xi}_2\hat{\xi}_1}}(x_1, x_2; t_1, t_2) \cdot I_{\mathbf{W}_{21}}(t_1, t_2), \quad (\text{Ж.24})$$

де $I_{\mathbf{W}_i^2}(t_1, t_2), i = \overline{1, 2}$ – двовимірні індикаторні функції:

$$I_{\mathbf{W}_i^2}(t_1, t_2) = \begin{cases} 1, & (t_1, t_2) \in \mathbf{W}_i^2, \\ 0, & (t_1, t_2) \notin \mathbf{W}_i^2, \end{cases} \quad i = \overline{1, 2}. \quad (\text{Ж.25})$$

Області $\mathbf{W}_i^2 = \mathbf{W}_i \times \mathbf{W}_i, i = \overline{1, 2}$ – є декартовими добутками областей визначення \mathbf{W}_i індикаторних функцій (Ж.3). Причому двовимірні індикаторні функції (Ж.25) можна навести у вигляді відповідних одновимірних індикаторних функцій (Ж.3)

$$I_{\mathbf{W}_i^2}(t_1, t_2) = I_{\mathbf{W}_i}(t_1) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t_2), \quad i = \overline{1, 2}. \quad (\text{Ж.26})$$

Індикаторні функції $I_{\mathbf{W}_{12}}(t_1, t_2)$ та $I_{\mathbf{W}_{21}}(t_1, t_2)$, що вибирають у сумі (Ж.24) сумісні функції розподілу, відповідно будуть дорівнювати

$$I_{\mathbf{W}_{12}}(t_1, t_2) = \begin{cases} 1, & (t_1, t_2) \in \mathbf{W}_{12}, \\ 0, & (t_1, t_2) \notin \mathbf{W}_{12}, \end{cases} \quad (\text{Ж.27})$$

$$I_{\mathbf{W}_{21}}(t_1, t_2) = \begin{cases} 1, & (t_1, t_2) \in \mathbf{W}_{21}, \\ 0, & (t_1, t_2) \notin \mathbf{W}_{21}, \end{cases} \quad (\text{Ж.28})$$

де двовимірні області \mathbf{W}_{12} та \mathbf{W}_{21} визначаються через декартові добутки одновимірних областей

$$\mathbf{W}_{12} = \mathbf{W}_1 \times \mathbf{W}_2, \quad (\text{Ж.29})$$

$$\mathbf{W}_{21} = \mathbf{W}_2 \times \mathbf{W}_1. \quad (\text{Ж.30})$$

Двовимірні індикаторні функції $I_{\mathbf{W}_{12}}(t_1, t_2)$ та $I_{\mathbf{W}_{21}}(t_1, t_2)$ можна розписати через одновимірні індикаторні функції таким чином:

$$I_{W_{12}}(t_1, t_2) = I_{W_1}(t_1) \cdot I_{W_2}(t_2), \quad (\text{Ж.31})$$

$$I_{W_{21}}(t_1, t_2) = I_{W_2}(t_1) \cdot I_{W_1}(t_2). \quad (\text{Ж.32})$$

На рисунку Ж.2 умовно зображено розбиття площини \mathbf{R}^2 чотирма двовимірними областями, де відповідні індикаторні функції (Ж.27)–(Ж.32), набувають одиничне значення.

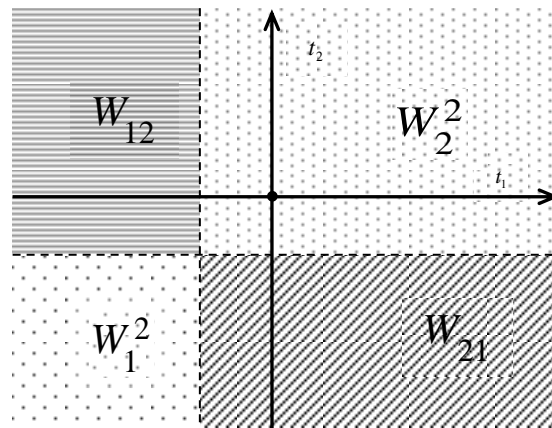


Рис. Ж.2. Области, де двовимірні індикаторні функції набувають одиничне значення

Розпишемо тривимірну функцію розподілу $F_{3_\xi}(x_1, x_2, x_3; t_1, t_2, t_3)$ процесу (Ж.24) із двома зонами у вигляді

$$F_{3_\xi}(x_1, x_2, x_3; t_1, t_2, t_3) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 F_{3_{\hat{\xi}_i \hat{\xi}_j \hat{\xi}_k}}(x_1, x_2, x_3; t_1, t_2, t_3) \cdot I_{W_{ijk}}(t_1, t_2, t_3). \quad (\text{Ж.33})$$

У виразі (Ж.33), коли всі три індекси рівні, тобто $i = j = k = 1$ або $i = j = k = 2$, то індикаторні функції $I_{W_{iii}}(t_1, t_2, t_3)$, $i = \overline{1,2}$ дорівнюють

$$I_{W_{iii}}(t_1, t_2, t_3) = \begin{cases} 1, & (t_1, t_2, t_3) \in W_{iii} \\ 0, & (t_1, t_2, t_3) \notin W_{iii} \end{cases}, \quad i = \overline{1,2}. \quad (\text{Ж.34})$$

Області $\mathbf{W}_{iii} = \mathbf{W}_i \times \mathbf{W}_i \times \mathbf{W}_i$, $i = \overline{1,2}$ визначаються через потрійний декартовий добуток областей \mathbf{W}_i індикаторних функцій (Ж.3).

Тривимірні індикаторні функції (Ж.34) можна навести у вигляді добутку відповідних одновимірних індикаторних функцій (Ж.3)

$$I_{\mathbf{W}_{iii}}(t_1, t_2, t_3) = I_{\mathbf{W}_i}(t_1) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t_2) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t_3), i = \overline{1,2}. \quad (\text{Ж.35})$$

Сумісні індикаторні функції $\left\{ I_{\mathbf{W}_{ijk}}(t_1, t_2, t_3), i, j, k = \overline{1,2}, i \neq j \neq k \right\}$ можна задати так:

$$I_{\mathbf{W}_{ijk}}(t_1, t_2, t_3) = \begin{cases} 1, & (t_1, t_2, t_3) \in \mathbf{W}_{ijk}, \\ 0, & (t_1, t_2, t_3) \notin \mathbf{W}_{ijk}, \end{cases}, i, j, k = \overline{1,2}, i \neq j \neq k, \quad (\text{Ж.36})$$

де тривимірні області $\left\{ \mathbf{W}_{ijk}, i, j, k = \overline{1,2}, i \neq j \neq k \right\}$ визначаються через потрійні декартові добутки одновимірних областей

$$\mathbf{W}_{ijk} = \mathbf{W}_i \times \mathbf{W}_j \times \mathbf{W}_k, i, j, k = \overline{1,2}, i \neq j \neq k. \quad (\text{Ж.37})$$

За аналогією до процедури записування дво- та тривимірної функції розподілу процесу (Ж.20) запишемо k -вимірну функцію розподілу процесу з двома зонами.

$$F_{k\xi}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) = \sum_{i_1=1}^2 \binom{k}{i_1} \sum_{i_k=1}^2 F_{k\xi_{i_1 \dots i_k}}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) \cdot I_{\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}}(t_1, \dots, t_k), \quad (\text{Ж.38})$$

де $\left\{F_{k_{\hat{\xi}_{i_1} \dots \hat{\xi}_{i_k}}} (x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k), i_1, \dots, i_k = \overline{1,2}\right\}$ – множина k -вимірних функцій розподілу процесів $\hat{\xi}_1(\omega, t)$ та $\hat{\xi}_2(\omega, t)$.

Індикаторні функції $\left\{I_{\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}} (t_1, \dots, t_k), i_1, \dots, i_k = \overline{1,2}\right\}$ можна задати

$$I_{\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}} (t_1, \dots, t_k) = \begin{cases} 1, & (t_1, \dots, t_k) \in \mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}, \\ 0, & (t_1, \dots, t_k) \notin \mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}, \end{cases} t_1, \dots, t_k = \overline{1,2}, \quad (\text{Ж.39})$$

де області $\left\{\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}, i_1, \dots, i_k = \overline{1,2}\right\}$ визначаються так

$$\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k} = \mathbf{W}_{i_1} \times \dots \times \mathbf{W}_{i_k}, i_1, \dots, i_k = \overline{1,2}. \quad (\text{Ж.40})$$

Для виявлення закономірностей структури багатовимірних функцій розподілу процесів із сегментною зонною структурою розглянемо процес із трьома зонами ($N = 3$), тобто

$$\xi(\omega, t) = \sum_{i=1}^3 \hat{\xi}_i(\omega, t) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}. \quad (\text{Ж.41})$$

Аналогічно, як і для процесу із двома зонами, запишемо k -вимірну функцію розподілу процесу (Ж.41) із трьома зонами

$$F_{k_{\xi}} (x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) = \sum_{i_1=1}^3 \sum_{i_k=1}^3 F_{k_{\hat{\xi}_{i_1} \dots \hat{\xi}_{i_k}}} (x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) \cdot I_{\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}} (t_1, \dots, t_k). \quad (\text{Ж.42})$$

Поширимо отримані вище результати на загальний випадок, коли кількість зон N є довільне скінченне число. Тобто k -вимірна функція розподілу процесу (Ж.41) буде мати вигляд

$$F_{k\xi}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) = \sum_{i_1=1}^N \sum_{i_k=1}^N F_{k\xi_{i_1 \dots i_k}}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) \cdot I_{\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}}(t_1, \dots, t_k), \quad (\text{Ж.43})$$

де $\{F_{k\xi_{i_1 \dots i_k}}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k)\}$ – множина k -вимірних функцій розподілу компонент вектора (Ж.16).

Елементи множини $\{I_{\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}}(t_1, \dots, t_k), i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}\}$ k -вимірних індикаторних функцій визначаються так

$$I_{\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}}(t_1, \dots, t_k) = \begin{cases} 1, & (t_1, \dots, t_k) \in \mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}, \\ 0, & (t_1, \dots, t_k) \notin \mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}, \end{cases} \quad (\text{Ж.44})$$

де k -вимірні області $\{\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}, i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}\}$ визначаються через декартові добутки k -го порядку одновимірних областей індикаторних функцій (Ж.3)

$$\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k} = \mathbf{W}_{i_1} \times \mathbf{W}_{i_2} \times \dots \times \mathbf{W}_{i_k}, i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}. \quad (\text{Ж.45})$$

Індикаторні функції (Ж.44) можна навести у вигляді відповідних одновимірних індикаторних функцій (Ж.3)

$$I_{\mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}}(t_1, \dots, t_k) = \prod_{j=1}^k I_{\mathbf{W}_{i_j}}(t_j), i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}. \quad (\text{Ж.46})$$

Слід відзначити, що для випадку рівності всіх індексів $i_1 = i_2 = \dots = i_k$ будемо мати множину індикаторних функцій, які виділяють несумісні функції (автофункції) розподілу, а за відсутності такої рівності будемо мати індикаторні функції, що виділяють сумісні функції розподілу компонент вектора випадкових

процесів (Ж.16). Відповідно і для k -вимірних областей $\left\{ \mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}, i_1, \dots, i_k = \overline{1, N} \right\}$ при рівності всіх індексів $i_1 = i_2 = \dots = i_k$ будемо мати області, які дорівнюють декартовому добутку k -го порядку однієї й тієї ж одновимірної області.

Враховуючи формулу (Ж.43), формулу (Ж.46) запишемо остаточно

$$F_{k\xi}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) = \sum_{i_1=1}^N \binom{k}{i_1} \sum_{i_k=1}^N F_{k\xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) \cdot \prod_{j=1}^k I_{\mathbf{W}_{i_j}}(t_j), k \in \mathbf{N}. \quad (\text{Ж.47})$$

Залежність (Ж.47) дає змогу визначати всю сукупність функцій розподілу випадкового процесу (Ж.20) із детермінованою сегментною зонною структурою через аналогічні ймовірнісні характеристики вектора (Ж.16) випадкових процесів та розбиття $\mathbf{D}_{\mathbf{R}} = \left\{ \mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1}), i = \overline{1, N} \right\}$, яке визначає індикаторні функції (Ж.3).

Відзначимо, що записане сімейство функцій розподілу процесу з сегментною зонною структурою задовольняє вимогам симетричності й узгодженості, які висувають до сукупності функцій розподілу випадкового процесу, оскільки самі функції розподілу ніби “зшиті” по часовій координаті $t \in \mathbf{R}$ із аналогічних функцій розподілу вектора (Ж.16), які, за припущенням, задовольняють умовам симетричності й узгодженості.

Випадковий процес (Ж.20) із сегментною зонною структурою можна записати

$$\xi(\omega, t) = \sum_{i=1}^N \tilde{\xi}_i(\omega, t), \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{Ж.48})$$

де $\left\{ \tilde{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N}, \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R} \right\}$ – множина випадкових процесів, що дорівнюють:

$$\tilde{\xi}_i(\omega, t) = \xi(\omega, t) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t), \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}. \quad (\text{Ж.49})$$

Компоненти $\left\{ \tilde{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N}, \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R} \right\}$ конструкції (Ж.49) та компоненти $\left\{ \hat{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N}, \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R} \right\}$ конструкції (Ж.20) є пов'язаними співвідношеннями

$$\tilde{\xi}_i(\omega, t) = \begin{cases} \hat{\xi}_i(\omega, t), t \in \mathbf{W}_i, \\ 0, t \notin \mathbf{W}_i, \end{cases} \quad i = \overline{1, N}, \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{Ж.50})$$

або, що аналогічно

$$\tilde{\xi}_i(\omega, t) = \hat{\xi}_i(\omega, t) \cdot I_{\mathbf{W}_i}(t), \quad i = \overline{1, N}, \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}. \quad (\text{Ж.51})$$

Тобто, в конструкції (Ж.48) відповідні i -ті компоненти на відповідних i -тих множинах $\mathbf{R} \setminus \mathbf{W}_i$ тотожно дорівнюють нулеві.

Функції розподілу випадкового процесу конструкції (Ж.48) мають структуру, що аналогічна структурі функцій розподілу (Ж.47) конструкції (Ж.20) і, відповідно, мають вигляд:

$$F_{k\xi}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) = \sum_{i_1=1}^N \binom{k}{i_1} \sum_{i_k=1}^N F_{k_{\tilde{\xi}_{i_1} \dots \tilde{\xi}_{i_k}}} (x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) \cdot \prod_{j=1}^k I_{\mathbf{W}_{i_j}}(t_j), \quad k \in \mathbf{N}, \quad (\text{Ж.52})$$

де $\left\{ F_{k_{\tilde{\xi}_{i_1} \dots \tilde{\xi}_{i_k}}} (x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) \right\}$ – множина k -вимірних функцій розподілу компонент вектора $\left\{ \tilde{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N}, \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R} \right\}$.

Якщо $(t_1, \dots, t_k) \in \mathbf{W}_{i \dots i} = \mathbf{W}_i^k$ ($i_1 = i_2 = \dots = i_k = i$), то k -вимірна функція розподілу $F_{k_{\tilde{\xi}_i \dots \tilde{\xi}_i}}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k)$ є k -вимірною функцією розподілу i -го випадкового

процесу $\tilde{\xi}_i(\omega, t)$. Тобто його автофункцією розподілу, яка задана на гіперкубі \mathbf{W}_i^k , є k -кратними декартовими добутками області $\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1})$. Якщо ж рівність індексів $i_j, j = \overline{1, k}$ не має місця, тобто загалом $(t_1, \dots, t_k) \in \mathbf{W}_{i_1 \dots i_k}$, то k -вимірною функцією розподілу $F_{k_{\tilde{\xi}_{i_1} \dots \tilde{\xi}_{i_k}}}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k)$ є сумісною k -вимірною функцією розподілу компонент вектора $\left\{ \tilde{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N} \right\}$.

Хоча конструкції (Ж.48) та (Ж.20) призводять до одного й того ж випадкового процесу $\xi(\omega, t)$, однак вони не рівноцінні. Згідно з формулою (Ж.51) компоненти $\left\{ \tilde{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N} \right\}$ можуть бути визначені через компоненти $\left\{ \hat{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N} \right\}$, але не навпаки. Аналогічно, за відомим $\xi(\omega, t)$ неможливо однозначно визначити компоненти $\left\{ \hat{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N} \right\}$, однак можна однозначно визначити компоненти $\left\{ \tilde{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N} \right\}$ згідно з формулою (Ж.49).

Ж.3.1. Умови циклічності випадкового процесу з сегментною зонною структурою

Розглянемо додаткові умови, яким повинні задовольняти елементи (вектора процесів $\left\{ \hat{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N} \right\}$ та множина індикаторних функцій $\left\{ I_{\mathbf{W}_i}(t), i = \overline{1, N} \right\}$) конструкції (Ж.20) процесу з сегментною зонною структурою, щоб він був циклічним (періодичним) випадковим процесом. Для цього наведемо таке твердження [205].

Твердження Ж.1. Якщо в конструкції (Ж.20) випадкового процесу $\xi(\omega, t), \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}$ із сегментною зонною структурою, компоненти вектора $\left\{ \hat{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N}, \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R} \right\}$ є :

1) сукупністю стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових процесів у вузькому розумінні. Тобто для його сумісних багатовимірних функцій розподілу виконується рівність

$$F_{k_{\hat{\xi}_{i_1} \dots \hat{\xi}_{i_k}}} (x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) = F_{k_{\hat{\xi}_{i_1} \dots \hat{\xi}_{i_k}}} (x_1, \dots, x_k; t_1 + L, \dots, t_k + L),$$

$$\forall L \in \mathbf{R}, i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}, t_1, \dots, t_k \in \mathbf{R};$$
(Ж.53)

2) сукупністю циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів із функціями ритму $T(t, n)$. Тобто процесів для сумісної k - вимірної функції розподілу яких має місце рівність

$$F_{k_{\hat{\xi}_{i_1} \dots \hat{\xi}_{i_k}}} (x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) = F_{k_{\hat{\xi}_{i_1} \dots \hat{\xi}_{i_k}}} (x_1, \dots, x_k; t_1 + T(t_1, n), \dots, t_k + T(t_k, n)),$$

$$n \in \mathbf{Z}, i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}, t_1, \dots, t_k \in \mathbf{R},$$
(Ж.54)

а індикаторні функції $\left\{ I_{w_i}(t), i = \overline{1, N} \right\}$ у конструкції (Ж.20) є циклічними детермінованими числовими функціями із функціями ритму $T(t, n)$, а саме,

$$I_{w_i}(t) = I_{w_i}(t + T(t, n)), i = \overline{1, N}, t \in \mathbf{R}, n \in \mathbf{Z},$$
(Ж.55)

то випадковий процес $\xi(\omega, t), \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}$ буде циклічним із функцією ритму $T(t, n)$.

Дане твердження доведене в роботі [205].

Відзначимо, що у випадку виконання умов (Ж.53) процес (Ж.20) буде циклічним випадковим процесом із розладками (циклічним кусково-стаціонарним випадковим процесом).

У частинному випадку, якщо припустити, що індикаторні функції

$\{I_{w_i}(t), i = \overline{1, N}\}$ у конструкції (Ж.20) є періодичними детермінованими функціями з періодом T ,

$$I_{w_i}(t) = I_{w_i}(t + T), i = \overline{1, N}, t \in \mathbf{R}, \quad (\text{Ж.56})$$

а компоненти вектора $\{\hat{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N}, \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}\}$ в конструкції (Ж.20) є:

1) сукупністю стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових процесів у вузькому розумінні, тобто для його сумісних багатовимірних функцій розподілу виконується рівність (Ж.53);

2) сукупністю T -періодичних та T -періодично пов'язаних випадкових процесів, тобто процесів, для яких сумісні багатовимірні функції розподілу є T -періодичними за сукупністю аргументів, тобто

$$F_{k_{\xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) = F_{k_{\xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}}(x_1, \dots, x_k; t_1 + T, \dots, t_k + T), T > 0, \quad (\text{Ж.57})$$

то процес $\xi(\omega, t), \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}$ буде стохастично періодичним із періодом T .

Відзначимо, що властивість (Ж.53) повинна виконуватися для довільного дійсного L , а у властивості (Ж.57) вимагається, щоб число T було періодом, тобто було додатне та найменше (лише одне). У випадку, коли компоненти вектора $\{\hat{\xi}_i(\omega, t), i = \overline{1, N}, \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}\}$ є стаціонарними та стаціонарно пов'язаними випадковими процесами, то процес (Ж.20) буде стохастично періодичним процесом із розладками.

Дані факти дають змогу застосовувати два методи опрацювання циклічних (періодичних) випадкових процесів із розладками, а саме: окремо по сегментах стаціонарності та усереднюючи відліки, взяті з процесу через інтервали, що визначаються функцією ритму $T(t, n)$ для циклічного процесу або через період T

для періодичного процесу. Це буде показано у п'ятому розділі, який стосується статистичного опрацювання циклічних сигналів.

Додаток 3

Деякі відомі підкласи випадкових процесів із циклічними ймовірнісними характеристиками

У даному додатку наведено означення найважливіших підкласів циклічних випадкових процесів [205].

3.1. Процеси з незалежними циклічними приростами

В означеннях, наведених нижче, враховуються дискретні відліки для сегментної циклічної структури. Проте легко можна показати врахування через дискретні відліки сегментної структури.

Означення 3.1. Стохастично неперервний із незалежними приростами процес $\eta(\omega, t)$ будемо називати процесом із незалежними циклічними приростами, якщо існує така функція $T(t, n)$, яка задовольняє умовам функції ритму, що при фіксованому $h > 0$ розподіли приростів (диференціалів) $\Delta_h \eta(\omega, t) (d\eta(\omega, t))$ і $\Delta_h \eta(\omega, t + T(t, n)) (d\eta(\omega, t + T(t, n)))$ однакові для довільного $n \in \mathbf{Z}$ та для будь-якого $t \in \mathbf{R}$.

Аналогічно можна дати означення процесам із незалежними циклічними приростами дискретного аргументу.

Означення 3.2. Випадковий процес $\eta(\omega, t_{i,l}), \omega \in \Omega, t_{i,l} \in \mathbf{W} = \mathbf{D}$ із незалежними приростами будемо називати випадковим процесом дискретного аргументу із незалежними циклічними приростами, якщо існує така функція $T(t_{i,l}, n)$, яка задовольняє умовам функції ритму, що розподіли приростів $\eta(\omega, t_{i_2, l_2}) - \eta(\omega, t_{i_1, l_1})$ та $\eta(\omega, t_{i_2+n, l_2}) - \eta(\omega, t_{i_1+n, l_1}) = \eta(\omega, t_{i_2, l_2} + T(t_{i_2, l_2}, n)) - \eta(\omega, t_{i_1, l_1} + T(t_{i_1, l_1}, n))$ однакові для довільного $n \in \mathbf{Z}$ та для будь-яких $i_1, i_2 \in \mathbf{Z}, l_1, l_2 = \overline{1, L}$.

Для процесу з незалежними циклічними приростами одновимірною функцією розподілу його приростів задовольняє рівності

$$F_{\Delta\eta}(x, t, s) = F_{\Delta\eta}(x, t + T(t, n), s + T(t, n)), x \in \mathbf{R}, t, s \in \mathbf{W}, t < s, n \in \mathbf{Z}. \quad (3.1)$$

3.2. Циклічний випадковий процес із незалежними значеннями (циклічний білий шум)

Наведемо означення циклічного випадкового процесу із незалежними значеннями (циклічного білого шуму). Оскільки білим шумом $\zeta(\omega, t)$ у строгому (широкому) розумінні називають узагальнену похідну від процесу з незалежними (некорельованими) приростами $\eta(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}$, то введемо підклас білих шумів – циклічні білі шуми як узагальнену похідну від процесів із незалежними циклічними приростами, тобто дамо наступне означення.

Означення 3.3. Узагальнену похідну від процесу з незалежними циклічними приростами будемо називати циклічним випадковим процесом із незалежними значеннями (циклічним білим шумом).

З іншого боку, у випадку дискретності області визначення ($\mathbf{W} = \mathbf{D}$) білого шуму, можна дати означення дискретного циклічного випадкового процесу з незалежними значеннями (циклічного білого шуму) таким чином.

Означення 3.4. Білий шум $\zeta(\omega, t), \omega \in \Omega, t \in \mathbf{D}$ тобто дискретний процес із незалежними (некорельованими) значеннями, називається дискретним циклічним випадковим процесом із незалежними (некорельованими) значеннями (дискретним циклічним білим шумом), якщо існує така функція $T(t, n)$, яка задовольняє умовам функції ритму, що випадкові величини $\zeta(\omega, t)$ та $\zeta(\omega, t + T(t, n)), n \in \mathbf{Z}$ є стохастично еквівалентними у широкому розумінні для будь-якого $t \in \mathbf{D}$ та $n \in \mathbf{Z}$.

Для дискретного циклічного білого шуму його одновимірна функція розподілу задовольняє рівності

$$F_{\zeta}(x, t) = F_{\zeta}(x, t + T(t, n)), x \in \mathbf{R}, t \in \mathbf{D}, n \in \mathbf{Z}. \quad (3.2)$$

Циклічний білий шум як підклас циклічного випадкового процесу може

мати стабільний та змінний ритми. У випадку стабільного ритму циклічний білий шум є періодичним білим шумом.

Означення 3.3 вводить поняття циклічного білого шуму як для випадку неперервного, так і дискретного аргументу. Тому, якщо область визначення $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, то будемо мати циклічний білий шум із неперервним аргументом, а якщо $\mathbf{W} = \mathbf{D} = \{t_{i,l}, i \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}\}$, то будемо мати означення циклічного білого шуму дискретного аргументу.

Можна суттєво розширити клас циклічних білих шумів, якщо конкретизувати тип їх розподілів, а тому можна подати клас циклічних білих шумів із нормальним, рівномірним, експоненціальним, пуассонівським, логарифмічним, гамма і т.ін. розподілами. Аналогічне можна зробити і для випадкових процесів із незалежними циклічними приростами, якщо конкретизувати тип розподілу приростів процесу.

3.3. Циклічні марковські випадкові процеси

Наведемо означення циклічного марковського випадкового процесу.

Означення 3.5. Марковський випадковий процес називається циклічним, якщо існує така функція $T(t, n)$, яка задовольняє умовам функції ритму, що для його одновимірної безумовної та умовної функцій розподілу мають місце рівності

$$\begin{aligned}
 F_1(x, t) &= F_1(x, t + T(t, n)), x, t \in \mathbf{R}, n \in \mathbf{Z}, \\
 F_1(x_j, t_j | x_{j-1}, t_{j-1}) &= \\
 &= F_1(x_j, t_j + T(t_j, n) | x_{j-1}, t_{j-1} + T(t_{j-1}, n)), x_j, t_j \in \mathbf{R}, j = \overline{2, k}, n \in \mathbf{Z}.
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Аналогічно можна дати означення дискретного циклічного марковського випадкового процесу, що заданий на дискретній області визначення

$\mathbf{W} = \mathbf{D} = \{t_{i,l}, i \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}\}$ і набуває значення зі скінченної або зліченної множин.

3.4. Циклічні відносно множини інтервалів числові функції

У багатьох задачах моделювання та аналізу циклічних сигналів зустрічаються такі сигнали, однофазні значення яких у різних циклах не рівні, а лише приблизно рівні. Причому можна вказати максимальну величину (верхню грань) відхилення однофазних значень сигналу один від одного. У таких випадках може бути корисною математична модель сигналів – циклічна відносно множини інтервалів числова функція, яка введена в роботі [205]. Наведемо її означення.

Означення 3.6. Нехай задано дві циклічні строго ритмічно пов'язані числові функції $f_1(t), t \in \mathbf{W}$ та $f_2(t), t \in \mathbf{W}$ із функцією ритму $T(t, n)$, різниця між якими є додатною функцією $f_1(t) - f_2(t) = \varepsilon(t) > 0, t \in \mathbf{W}$. Числова функція $\varepsilon(t) > 0$ також є циклічною строго ритмічно пов'язаною з функціями $f_1(t), t \in \mathbf{W}$ та $f_2(t), t \in \mathbf{W}$. Утворимо параметричну з параметром t множину $\Xi = \{\mathbf{A}_t, t \in \mathbf{W}\}$ інтервалів, кінцями яких при фіксованому t є значення функцій $f_1(t)$ та $f_2(t)$, а саме,

$$\mathbf{A}_t = (f_1(t), f_2(t)), t \in \mathbf{W}. \quad (3.4)$$

Внаслідок циклічності й ритмічної пов'язаності функцій $f_1(t), t \in \mathbf{W}$ та $f_2(t), t \in \mathbf{W}$ параметрична множина інтервалів Ξ також циклічно повторюється в часі, а саме,

$$\mathbf{A}_t = (f_1(t), f_2(t)) = (f_1(t + T(t, n)), f_2(t + T(t, n))) = \mathbf{A}_{t+T(t, n)}, n \in \mathbf{Z}, t \in \mathbf{W}. \quad (3.5)$$

Параметричну множину інтервалів або, що те саме, інтервальну функцію \mathbf{A}_t , для якої має місце властивість (3.5), будемо називати циклічною параметричною множиною інтервалів (циклічною інтервальною функцією).

Означення 3.7. Циклічною відносно множини $\Xi = \{\mathbf{A}_t, t \in \mathbf{W}\}$ інтервалів, що задовольняє рівність (3.5), називається функція $f(t), t \in \mathbf{W}$, для якої при кожному $t \in \mathbf{W}$ має місце відношення належності

$$f(t) \in (f_1(t), f_2(t)), t \in \mathbf{W}. \quad (3.6)$$

Для циклічної відносно упорядкованої множини $\Xi = \{A_t, t \in \mathbf{W}\}$ інтервалів функції $f(t), t \in \mathbf{W}$ має місце нерівність

$$|f(t) - f(t + T(t, n))| < \varepsilon(t), n \in \mathbf{Z}, t \in \mathbf{W}, \quad (3.7)$$

що за структурою подібна до нерівності, яка фігурує в означенні майже періодичної функції.

Класифікація циклічних відносно множини інтервалів числових функцій наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Класифікація циклічних відносно множини інтервалів числових функцій

Циклічні відносно множини інтервалів числові функції	
1	2
Ритм стабільний ($T(t, n) = n \cdot T$)	Ритм змінний ($T(t, n) \neq n \cdot T$)
Функція із постійною варіацією на циклі та стабільним ритмом $f_1(t) = f_1(t + n \cdot T),$ $f_2(t) = f_2(t + n \cdot T),$ $\varepsilon(t) = \varepsilon = const, \varepsilon > 0$	Функція зі змінним ритмом та постійною варіацією на циклі $f_1(t) = f_1(t + T(t, n)),$ $f_2(t) = f_2(t + T(t, n)),$ $\varepsilon(t) = \varepsilon = const, \varepsilon > 0$
Функція із змінною варіацією на циклі та стабільним ритмом $f_1(t) = f_1(t + n \cdot T),$ $f_2(t) = f_2(t + n \cdot T),$ $\varepsilon(t) = \varepsilon(t + n \cdot T), \varepsilon(t) > 0$	Функція зі змінним ритмом та змінною варіацією на циклі $f_1(t) = f_1(t + T(t, n)),$ $f_2(t) = f_2(t + T(t, n)),$ $\varepsilon(t) = \varepsilon(t + T(t, n)), \varepsilon(t) > 0$

Додаток И

Приклади результатів сегментації різних циклічних сигналів розробленими методами

На рисунках И.1–И.14, наведено результати сегментації різних циклічних сигналів.

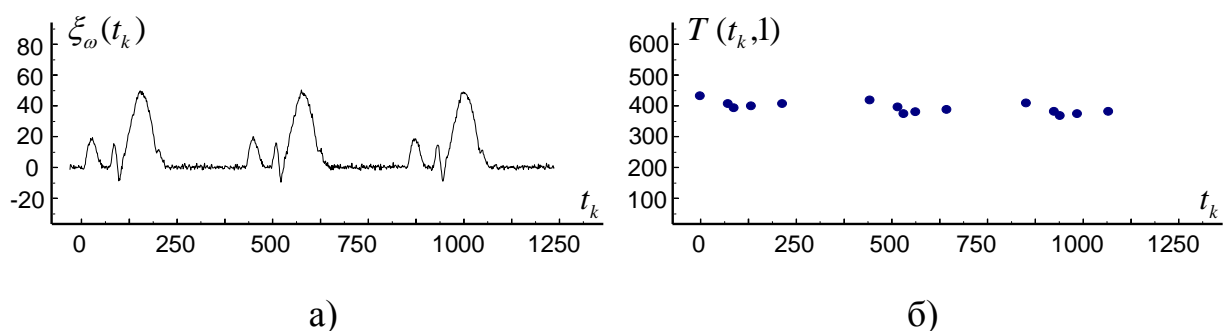


Рис. И.1. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура: а) електрокардіосигнал, ознака патології – мала амплітуда сегмента-R; б) сегментна структура

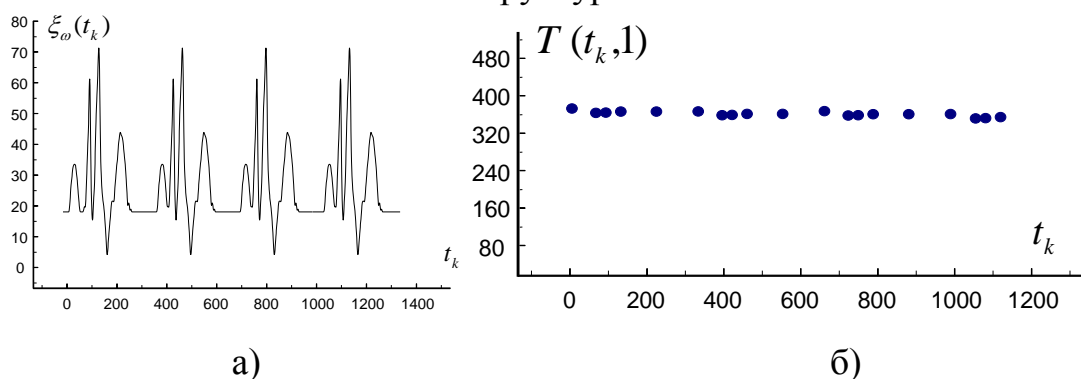


Рис. И.2. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура: а) електрокардіосигнал, ознака патології – роздвоєння сегмента-R; б) сегментна структура

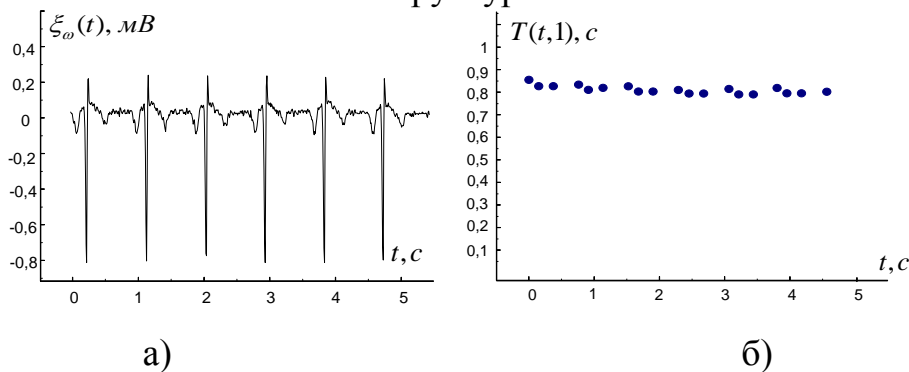


Рис. И.3. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура: а) електрокардіосигнал в aVR відведенні, діагноз – умовно здорова людина; б) сегментна структура

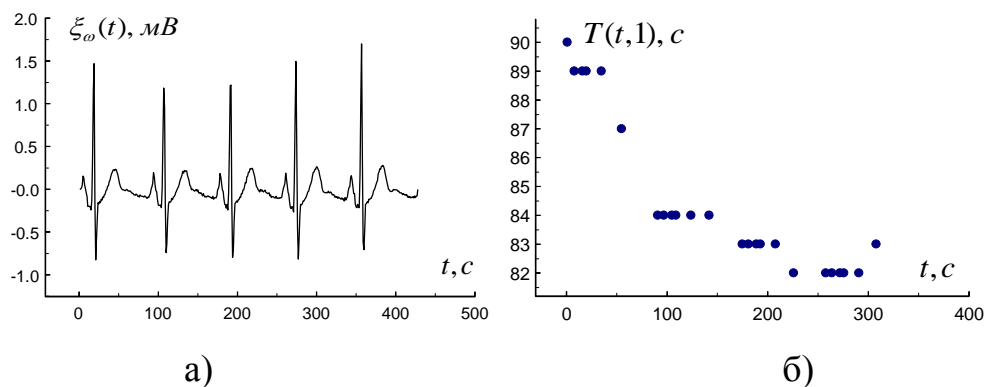


Рис. И.4. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура: а) електрокардіосигнал в II відведенні діагноз – умовно здорова людина; б) сегментна структура

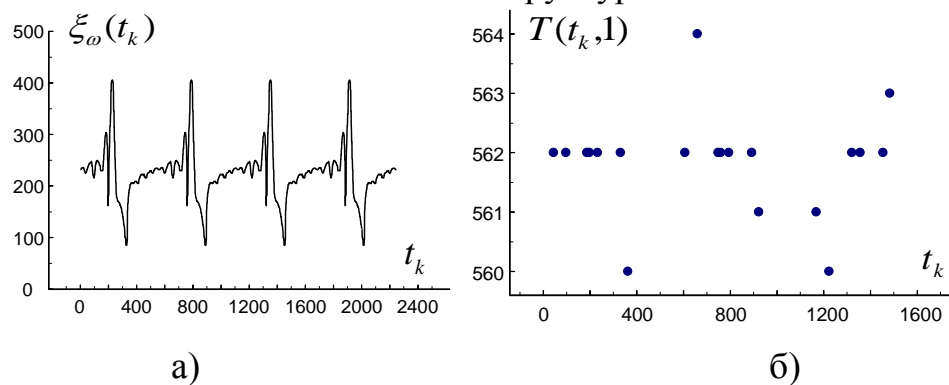


Рис. И.5. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура: а) магнітокардіосигнал, діагноз – умовно здорова людина; б) сегментна структура

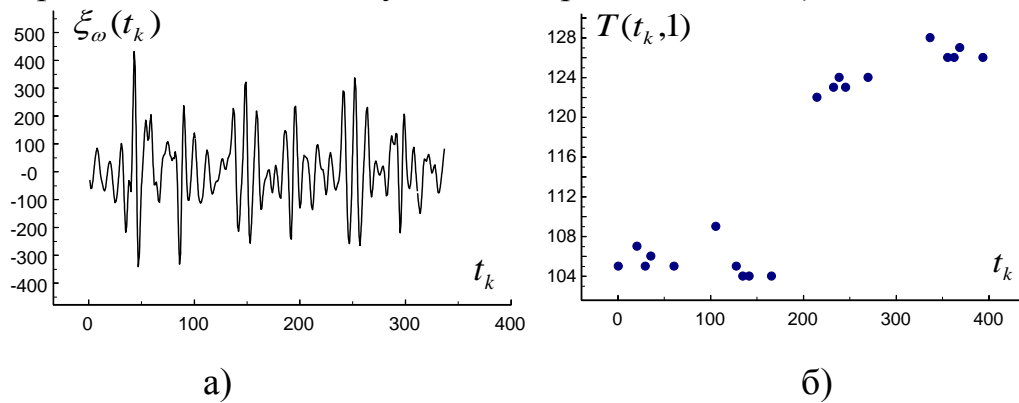


Рис. И.6. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура: а) фонокардіосигнал, діагноз – умовно здорова людина; б) сегментна структура

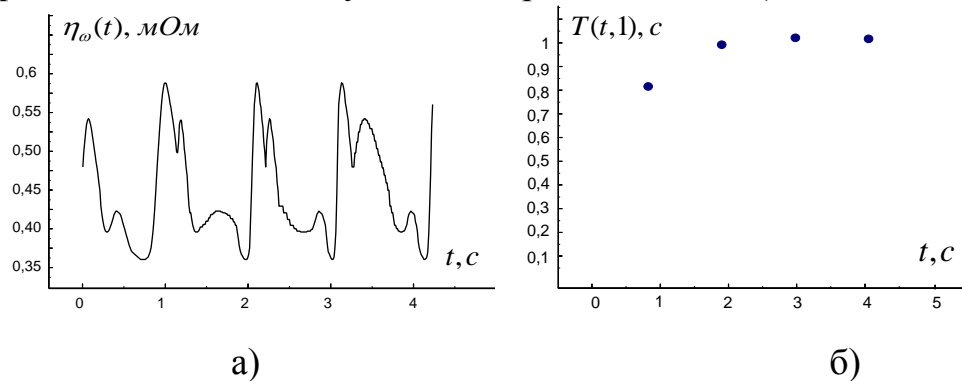


Рис. И.7. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура: а) реокардіосигнал; б) сегментна структура

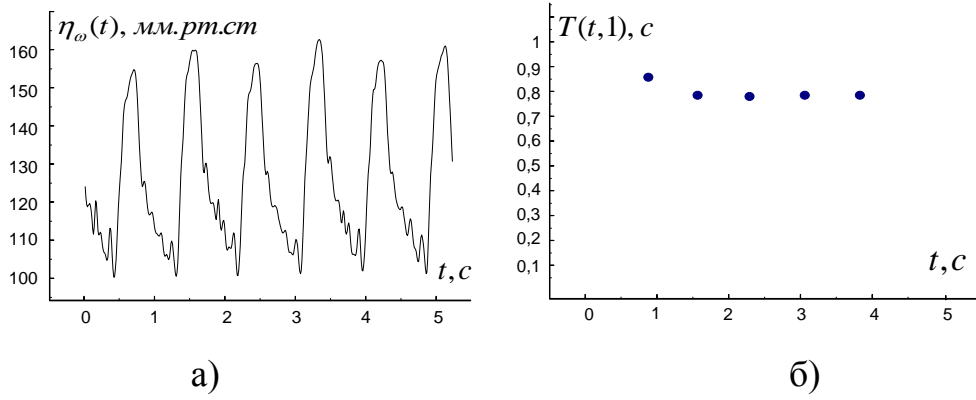


Рис. И.8. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура: а) крива артеріального тиску; б) сегментна структура

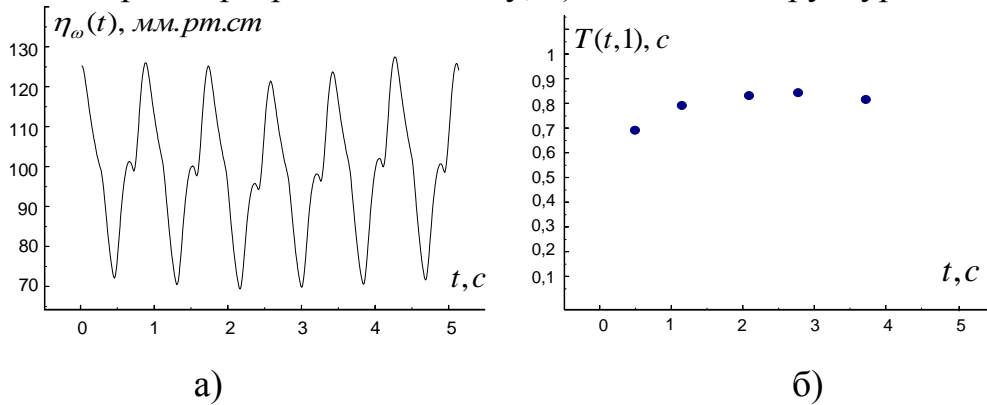


Рис. И.9. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура: а) крива артеріального тиску; б) сегментна структура

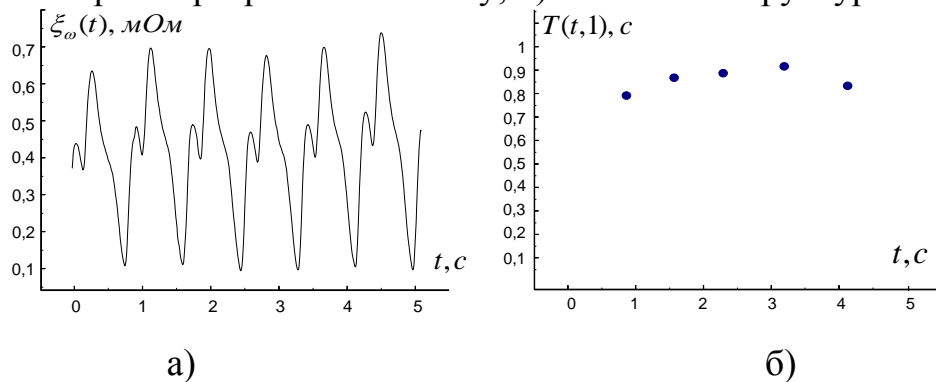


Рис. И.10. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура: а) плетизмограми; б) сегментна структура

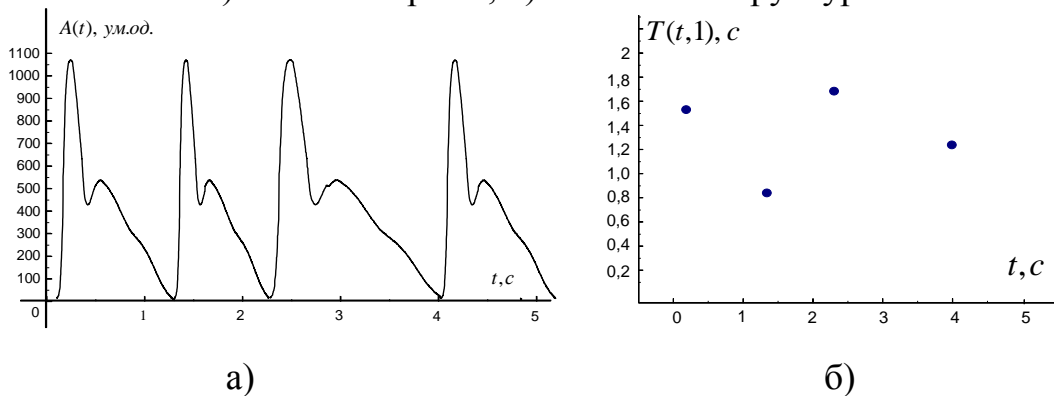


Рис. И.11. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура: а) сфігмокардіосигнал; б) сегментна структура

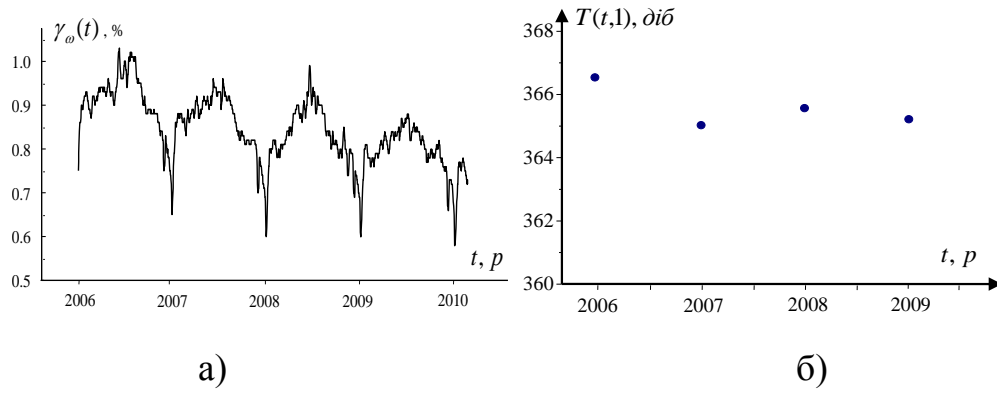


Рис. И.12. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура:
 а) циклічний економічний процес – індекс активності автомеханічної галузі США;
 б) сегментна структура

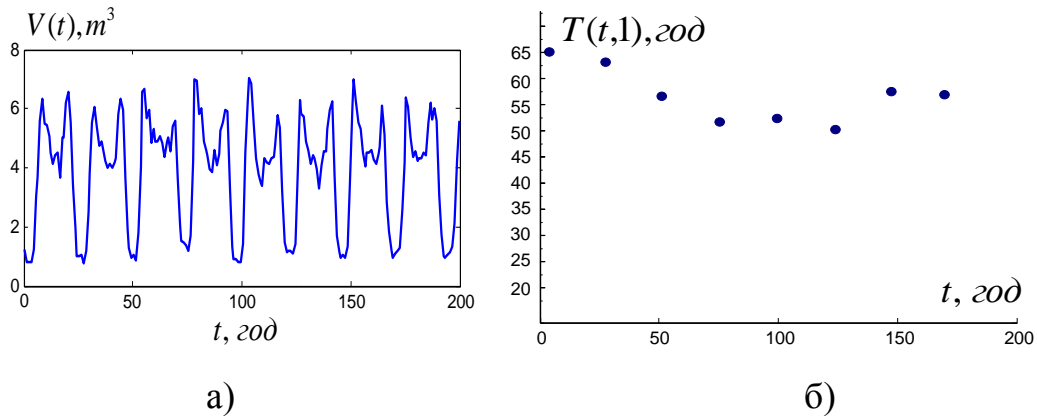


Рис. И.13. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура:
 а) процес водонавантаження; б) сегментна структура

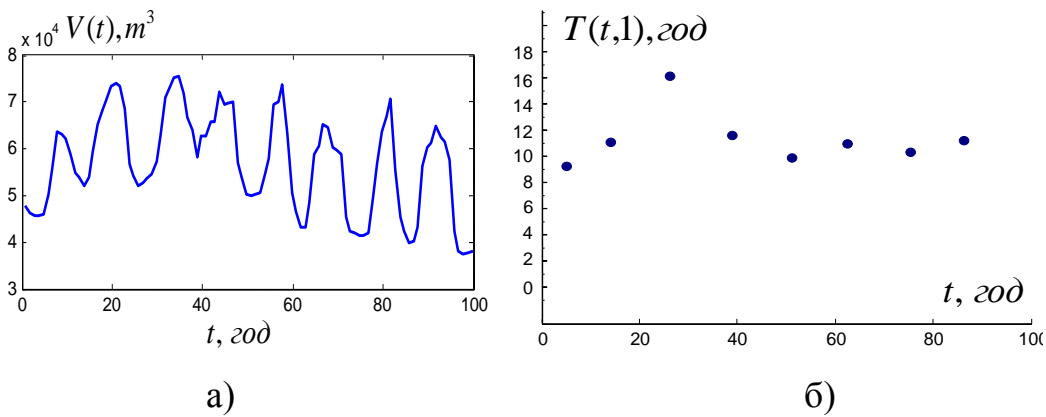


Рис. И.14. Реалізація циклічного сигналу та визначена його сегментна структура:
 а) процес газонавантаження; б) сегментна структура

Додаток К

Аналітичні залежності для визначення коефіцієнтів у методі квадратичної інтерполяції на сегментах

Розглянемо випадок визначення коефіцієнтів інтерполяційного полінома для відліків сегментної циклічної структури $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$.

Запишемо систему рівнянь для трьох точок із координатами $(t_i; \hat{T}(t_i, 1))$, $(t_{i+1}; \hat{T}(t_{i+1}, 1))$ та $(t_{i+2}; \hat{T}(t_{i+2}, 1))$

$$\begin{cases} \hat{T}(t_i, 1) = a_i \cdot t_i^2 + b_i \cdot t_i + c_i, \\ \hat{T}(t_{i+1}, 1) = a_i \cdot t_{i+1}^2 + b_i \cdot t_{i+1} + c_i, \\ \hat{T}(t_{i+2}, 1) = a_i \cdot t_{i+2}^2 + b_i \cdot t_{i+2} + c_i, \end{cases} \quad (\text{K.1})$$

$$i = \overline{1, C}, t_i \in \mathbf{W}.$$

Визначимо коефіцієнти $\{c_i, i = \overline{1, C}\}$ з першого рівняння

$$c_i = \hat{T}(t_i, 1) - a_i \cdot t_i^2 - b_i \cdot t_i, \quad i = \overline{1, C}, t_i \in \mathbf{W}. \quad (\text{K.2})$$

Визначимо коефіцієнти $\{b_i, i = \overline{1, C}\}$ з першого і другого рівнянь.

Враховуючи (K.2),

$$\hat{T}(t_{i+1}, 1) = a_i \cdot t_{i+1}^2 + b_i \cdot t_{i+1} + \hat{T}(t_i, 1) - a_i \cdot t_i^2 - b_i \cdot t_i, \quad (\text{K.3})$$

$$\hat{T}(t_{i+1}, 1) - \hat{T}(t_i, 1) = a_i \cdot t_{i+1}^2 - a_i \cdot t_i^2 + b_i \cdot t_{i+1} - b_i \cdot t_i, \quad (\text{K.4})$$

$$\hat{T}(t_{i+1}, 1) - \hat{T}(t_i, 1) = a_i \cdot (t_{i+1}^2 - t_i^2) + b_i \cdot (t_{i+1} - t_i), \quad (\text{K.5})$$

$$b_i = \frac{\hat{T}(t_{i+1},1) - \hat{T}(t_i,1) - a_i \cdot (t_{i+1}^2 - t_i^2)}{t_{i+1} - t_i}, \quad i = \overline{1, C}, \quad t_i \in \mathbf{W}. \quad (\text{K.6})$$

Визначимо коефіцієнти $\{a_i, i = \overline{1, C}\}$ через коефіцієнти $\{b_i, i = \overline{1, C}\}$, визначених з першого і другого та першого і третього рівнянь.

$$b_i = \frac{\hat{T}(t_{i+1},1) - \hat{T}(t_i,1) - a_i \cdot (t_{i+1}^2 - t_i^2)}{t_{i+1} - t_i}, \quad (\text{K.7})$$

$$b_i = \frac{\hat{T}(t_{i+2},1) - \hat{T}(t_i,1) - a_i \cdot (t_{i+2}^2 - t_i^2)}{t_{i+2} - t_i}, \quad (\text{K.8})$$

$$\frac{\hat{T}(t_{i+1},1) - \hat{T}(t_i,1) - a_i \cdot (t_{i+1}^2 - t_i^2)}{t_{i+1} - t_i} = \frac{\hat{T}(t_{i+2},1) - \hat{T}(t_i,1) - a_i \cdot (t_{i+2}^2 - t_i^2)}{t_{i+2} - t_i}, \quad (\text{K.9})$$

$$\frac{\hat{T}(t_{i+1},1) - \hat{T}(t_i,1)}{t_{i+1} - t_i} - a_i \cdot (t_{i+1} + t_i) = \frac{\hat{T}(t_{i+2},1) - \hat{T}(t_i,1)}{t_{i+2} - t_i} - a_i \cdot (t_{i+2} + t_i), \quad (\text{K.10})$$

$$\frac{\hat{T}(t_{i+1},1) - \hat{T}(t_i,1)}{t_{i+1} - t_i} - \frac{\hat{T}(t_{i+2},1) - \hat{T}(t_i,1)}{t_{i+2} - t_i} = a_i \cdot (t_{i+1} + t_i) - a_i \cdot (t_{i+2} + t_i), \quad (\text{K.11})$$

$$\frac{\hat{T}(t_{i+1},1) - \hat{T}(t_i,1)}{t_{i+1} - t_i} - \frac{\hat{T}(t_{i+2},1) - \hat{T}(t_i,1)}{t_{i+2} - t_i} = a_i \cdot (t_{i+1} + t_i - t_{i+2} - t_i), \quad (\text{K.12})$$

$$a_i = \frac{\hat{T}(t_{i+1},1) - \hat{T}(t_i,1)}{(t_{i+1} - t_i) \cdot (t_{i+1} - t_{i+2})} - \frac{\hat{T}(t_{i+2},1) - \hat{T}(t_i,1)}{(t_{i+2} - t_i) \cdot (t_{i+1} - t_{i+2})}, \quad i = \overline{1, C}, \quad t_i \in \mathbf{W}. \quad (\text{K.13})$$

Або можна навести у такій формі:

$$a_i = \frac{1}{t_{i+1} - t_{i+2}} \cdot \left(\frac{\hat{T}(t_{i+1}, 1) - \hat{T}(t_i, 1)}{(t_{i+1} - t_i)} - \frac{\hat{T}(t_{i+2}, 1) - \hat{T}(t_i, 1)}{(t_{i+2} - t_i)} \right), \quad i = \overline{1, C}, \quad t_i \in \mathbf{W}.$$

Таким чином, ми отримали аналітичні залежності для визначення коефіцієнтів $\{a_i, i = \overline{1, C}\}$, $\{b_i, i = \overline{1, C}\}$ та $\{c_i, i = \overline{1, C}\}$ інтерполяційного полінома для відліків сегментної циклічної структури $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$.

Аналогічним чином можна записати аналітичні залежності для визначення коефіцієнтів $\{a_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, $\{b_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ та $\{c_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ інтерполяційного полінома для відліків сегментної зонної структури $\mathbf{D}_z = \{t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$.

$$c_{ij} = \hat{T}(t_{ij}, 1) - a_{ij} \cdot t_{ij}^2 - b_{ij} \cdot t_{ij}, \quad (\text{K.14})$$

$$b_{ij} = \frac{\hat{T}(t_{i, j+1}, 1) - \hat{T}(t_{ij}, 1) - a_{ij} \cdot (t_{i, j+1}^2 - t_{ij}^2)}{t_{i, j+1} - t_{ij}}, \quad (\text{K.15})$$

$$a_{ij} = \frac{\hat{T}(t_{i, j+2}, 1) - \hat{T}(t_{ij}, 1)}{(t_{i, j+2} - t_{ij}) \cdot (t_{i, j+2} - t_{i, j+1})} - \frac{\hat{T}(t_{i, j+1}, 1) - \hat{T}(t_{ij}, 1)}{(t_{i, j+1} - t_{ij}) \cdot (t_{i, j+2} - t_{i, j+1})}, \quad (\text{K.16})$$

де $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z - 2}$, $t_{ij} \in \mathbf{W}$.

Додаток Л

Основні відомості про передискретизацію циклічних сигналів

Існує два підходи щодо дискретизації неперервного сигналу. Перший підхід полягає у отриманні циклічного сигналу з рівномірним, постійним кроком його дискретизації, при цьому отримуються еквідистантні відліки сигналу. Другий підхід полягає у отриманні циклічного сигналу зі змінним кроком його дискретизації, при цьому, крок дискретизації змінюється для нашого випадку залежно від особливостей ритмічної структури циклічного сигналу. У другому випадку, коли крок дискретизації є змінним, дискретні відліки є деякою функцією дискретної множини часу, що є областю визначення продискретизованого циклічного сигналу й дорівнює відстані між сусідніми відліками продискретизованого сигналу.

Основна вимога, яка ставиться до методів дискретизації циклічних сигналів полягає у тому, що крок їх дискретизації має змінюватися таким чином, щоб із циклічного сигналу неперервного аргументу утворити вкладений у нього дискретний циклічний сигнал [201, 205]. Такий сигнал, у свою чергу, є циклічним, тому що на кожному циклі дискретного сигналу буде однакова кількість її відліків, причому кожному такому відліку будуть відповідати однофазні відліки із цими відліками в усіх зареєстрованих сегментах-циклах чи сегментах-зонах циклічного сигналу [201, 205]. Значення, які відповідають цим відлікам, рівні за атрибутом (атрибутами). Така вимога є важливою при дискретизації циклічних випадкових процесів. При її виконанні можлива статистична обробка з використанням φ -серії, зазначено у роботі [201].

При такому підході крок дискретизації циклічного сигналу $F(t) \in \Psi$, $t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$ неперервного аргументу може визначений, у тому випадку якщо відома дискретна область визначення $\mathbf{D} = \mathbf{D}_c = \{t_{i,l}, i = \overline{1, C}, l = \overline{1, L}, L \geq 2\}$ для ідентифікованої сегментної циклічної структури або $\mathbf{D} = \mathbf{D}_z = \{t_{j,l}, j = \overline{1, C}, l = \overline{1, L_j}\}$ для ідентифікованої сегментної зонної

структури її дискретного аналогу $f(t_{i,l}), t_{i,l} \in \mathbf{D}$ або $f(t_{i,j,l}), t_{i,j,l} \in \mathbf{D}$ відповідно:

$$\begin{aligned} \Delta T(t_{i,l}) &= t_{i,l+1} - t_{i,l}, i \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, \\ \Delta T(t_{i,j,l}) &= t_{i,j,l+1} - t_{i,j,l}, i \in \mathbf{Z}, j = \overline{1, Z}, l = \overline{1, L_j}. \end{aligned} \quad (\text{Л.1})$$

Для знаходження дискретної області \mathbf{D} , необхідна неперервна функція ритму $T(t, n)$ або її оцінка $\hat{T}(t, n)$ циклічного сигналу $F(t) \in \Psi$, $t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$. Якщо відома неперервна функція ритму циклічного сигналу $F(t)$, $t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$ визначається область визначення для сегментної циклічної структури $\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1})$ її довільного i -го сегмента-циклу або для сегментної зонної структури $\mathbf{W}_j = [t_j, t_{j+1})$ її довільного сегмента-зони на циклі.

Задавшись деяким t_i , визначаємо момент $t_{i+1} = T(t_i, 1)$ на множині $\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1})$, вибираємо підмножину $\{t_{i,l}, i = \text{const}, l = \overline{1, L}\}$ із $L \geq 2$ елементів, які відповідають відлікам $\{f(t_{i,l}), i = \text{const}, l = \overline{1, L}\}$ циклічного сигналу з ідентифікованою сегментною циклічною структурою $F(t) \in \Psi$, $t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$. Знаходимо дискретну область визначення $\mathbf{D} = \mathbf{D}_c = \{t_{i,l}, i \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2\}$ для вкладеного дискретного циклічного сигналу $f(t_{i,l}), t_{i,l} \in \mathbf{D}$ через неперервну функцію ритму $T(t, n)$ та множину $\{t_{i,l}, i = \text{const}, l = \overline{1, L}\}$, а саме:

$$t_{i+n,l} = t_{i,l} + T(t_{i,l}, n), i = \text{const}, n \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}. \quad (\text{Л.2})$$

За умови якщо n прийме усі цілі числа, а l набиратиме значення від одиниці до L , то отримаємо шукану множину \mathbf{D} .

Аналогічним чином задавшись деяким t_j , визначаємо момент $t_{j+1} = T(t_j, 1)$ на множині $\mathbf{W}_j = [t_j, t_{j+1})$ вибираємо підмножину $\{t_{i,j,l}, i, j = \text{const}, l = \overline{1, L_j}\}$ із

елементів, які відповідають відлікам $\left\{ f(t_{j,l}^{i}), i, j = \text{const}, l = \overline{1, L_j} \right\}$ циклічного сигналу з ідентифікованою сегментною зонною структурою $F(t) \in \Psi, t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$. Знаходимо дискретну область визначення $\mathbf{D} = \mathbf{D}_z = \left\{ t_{j,l}^{i}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, l = \overline{1, L_j} \right\}$ для вкладеного дискретного циклічного сигналу $f(t_{j,l}^{i}), t_{j,l}^{i} \in \mathbf{D}$ через функцію ритму $T(t, n)$ та множину $\left\{ t_{j,l}^{i}, i, j = \text{const}, l = \overline{1, L_j} \right\}$, а саме:

$$t_{j,l}^{i+n} = t_{j,l}^{i} + T(t_{j,l}^{i}, n), i, j = \text{const}, n \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L_j}. \quad (\text{ЛЗ})$$

За умови якщо n прийме усі цілі числа, а l набуватиме значення від одиниці до $L_j, j = \overline{1, Z}$, то отримаємо шукану множину \mathbf{D} .

Наведена вище процедура дискретизації передбачає знання кількості відліків L , з яких складається кожен сегмент-цикл дискретного циклічного сигналу $f(t_{i,l}), t_{i,l} \in \mathbf{D}$ та способу формування множини $\left\{ t_{i,l}, i = \text{const}, l = \overline{1, L} \right\}$. Аналогічно це стосується невизначеності стосовно вибору кількості відліків L_j на j -й зоні, що припадатиме на кожен сегмент у циклах дискретного циклічного сигналу $f(t_{j,l}^{i}), t_{j,l}^{i} \in \mathbf{D}$ та способу формування множини $\left\{ t_{j,l}^{i}, i, j = \text{const}, l = \overline{1, L_j} \right\}$.

При цьому вибір величини L ґрунтується на необхідному рівні репрезентативності й точності відображення інформації дискретним циклічним сигналом (циклічною функцією) $f(t_{i,l}), t_{i,l} \in \mathbf{D}$, зазначено у роботах [199, 202], або $f(t_{j,l}^{i}), t_{j,l}^{i} \in \mathbf{D}$, які містяться у структурі циклічного сигналу $F(t) \in \Psi, t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$. Якщо величина L , буде достатньо великою то спотворення структури циклічного сигналу будуть меншими у випадку неперервного аргументу при його відновленні за дискретним аналогом $f(t_{i,l}), t_{i,l} \in \mathbf{D}$ або $f(t_{j,l}^{i}), t_{j,l}^{i} \in \mathbf{D}$. Однак вибір надмірно

великого значення L спричиняє необґрунтоване зростання вимог до продуктивності систем цифрового опрацювання циклічних сигналів, а саме, збільшення швидкодії та об'єму пам'яті цифрової обчислювальної системи опрацювання циклічних сигналів [201].

За такого підходу для представлення циклічного сигналу у дискретній формі необхідно вибрати оптимальне значення величини L (не більше допустимого рівня). У працях [201, 205] зазначено, що для абстрактної циклічної функції, зокрема для циклічної числової функції та циклічного випадкового процесу, вибір кількості відліків L на сегменті-циклі може бути обґрунтовано за умови обмеженості їх спектра, що дає змогу вибрати таку кількість відліків L , яка більша або дорівнює базі досліджуваного сигналу й шляхом відповідної інтерполяції дискретної функції $f(t_{i,l}), t_{i,l} \in \mathbf{D}$ або $f(t_{j,l}), t_{j,l} \in \mathbf{D}$ уможливує відновлення циклічного сигналу неперервного аргументу,

У роботах [201, 205, 212] наведено два способи дискретизації циклічного сигналу, тобто отримання відліків циклічного сигналу $F(t) \in \Psi$, $t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$ на множині $\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1})$. Перший спосіб полягає у тому, що досліджуваний півінтервал \mathbf{W}_i розбивається на рівні L частин, що означає дискретизацію i -го циклу із постійним кроком дискретизації $\Delta T = \frac{t_{i+1} - t_i}{L}$, у результаті чого утвориться множина моментів часу $\{t_{i,1} = t_i, t_{i,2} = t_i + \Delta T, \dots, t_{i,L} = t_i + (L-1) \cdot \Delta T\}$, на якій задано продискретизований i -ий цикл $\{f(t_{i,l}), t_{i,l} \in \mathbf{R}, i = \text{const}, l = \overline{1, L}\}$.

Другий спосіб отримання відліків циклічного сигналу $F(t) \in \Psi$, $t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$ на множині $\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1})$ є спосіб, що враховує її сегментну зонну структуру $\mathbf{W}_{i_j} = [t_{j_j}, t_{j_{j+1}})$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$ на i -му циклі. Якщо припустити, що є відома множина початків зон $\{t_{j,l}, l = \overline{1, L_j}\}$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$ на i -му циклі, тоді ідея визначення множини $\mathbf{W}_{i_j} = \{t_{j,l}, l = \overline{1, L_j}\}$ полягає у наступному: на j -ту зону

дискретного циклічного сигналу $f(t_{i,j,l}), t_{i,j,l} \in \mathbf{D}$ повинна припадати однакова кількість дискретних відліків у всіх її циклах. Наприклад, на j -ту зону припадатиме L_j відліків, тоді на цикл припадатиме $L = \sum_{j=1}^Z L_j$ відліків, де Z - кількість зон. У рамках кожної зони відліки можуть бути отримані з постійним кроком дискретизації, як це було за першим способом дискретизації. Однак загалом на всьому циклі крок дискретизації буде змінним, зазначено у працях [201, 205].

Відомий аналітичний взаємозв'язок між змінним кроком дискретизації $\Delta T(t_{i,l})$ та дискретною ритмічною структурою (дискретною функцією ритму) $T(t_{i,l}, n)$ наведено у роботах [201, 205]. Для цього, скориставшись формулою (Л.1), запишемо такі співвідношення:

$$\Delta T(t_{i+n,l}) = \Delta T(t_{i,l}) + (T(t_{i,l+1}, n) - T(t_{i,l}, n)), n \in \mathbf{Z}, i = \text{const}, l = \overline{1, L}. \quad (\text{Л.4})$$

Або, що аналогічно

$$\Delta T(t_{i+n,l}) - \Delta T(t_{i,l}) = T(t_{i,l+1}, n) - T(t_{i,l}, n), n \in \mathbf{Z}, i = \text{const}, l = \overline{1, L}. \quad (\text{Л.5})$$

Якщо врахувати, що крок дискретизації i -го циклу вибраний постійним та таким, що дорівнює $\Delta T = \frac{t_{i+1} - t_i}{L}$, то формула (Л.5) набуде вигляду

$$\Delta T(t_{i+n,l}) = \frac{t_{i+1} - t_i}{L} + (T(t_{i,l+1}, n) - T(t_{i,l}, n)), n \in \mathbf{Z}, i = \text{const}, l = \overline{1, L}. \quad (\text{Л.6})$$

Аналогічно можна записати взаємозв'язок між змінним кроком дискретизації $\Delta T(t_{i,j,l})$ та дискретною функцією ритму $T(t_{i,j,l}, n)$ при врахуванні відліків ідентифікованої сегментної зонної структури

$$\Delta T(t_{i+n}^{j,l}) = \frac{t_{i+1}^{j,l+1} - t_i^{j,l}}{L_j} + \left(T(t_{i+1}^{j,l+1}, n) - T(t_i^{j,l}, n) \right), n \in \mathbf{Z}, i, j = \text{const}, l = \overline{1, L_j}. \quad (\text{Л.7})$$

Для циклічних функцій зі стабільним ритмом, тобто коли $T(t, n) = n \cdot T$, формули (Л.6) та (Л.7) будуть мати вигляд

$$\begin{aligned} \Delta T(t_{i+n,l}) &= \frac{t_{i+1} - t_i}{L} = \Delta T = \text{const}, n \in \mathbf{Z}, i = \text{const}, l = \overline{1, L} \\ \Delta T(t_{i+n}^{j,l}) &= \frac{t_{i+1}^{j,l+1} - t_i^{j,l}}{L_j} = \Delta T = \text{const}, n \in \mathbf{Z}, i, j = \text{const}, l = \overline{1, L_j}, \end{aligned} \quad (\text{Л.8})$$

оскільки $T(t_{i,l+1}, n) = T(t_{i,l}, n), i, n \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}$ та $T(t_{i+1}^{j,l+1}, n) = T(t_i^{j,l}, n), i, j, n \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L_j}$.

Такий підхід до дискретизації циклічного сигналу базується на відомостях про неперервну функцію ритму циклічного сигналу. У тих випадках коли функція ритму $T(t, n)$ є априорі невідомою, як це переважно буває на практиці, то необхідно розробити метод визначення дискретної множини \mathbf{D} , що використовує відомості не про неперервну функцію ритму, а про її оцінку, яка може бути отримана за рахунок використання методів, наведених у четвертому розділі даної роботи.

Додаток М

Основні відомості про статистичне опрацювання циклічних сигналів

М.1. Статистичне оцінювання імовірнісних характеристик вектора циклічних сигналів з врахуванням оціненої ритмічної структури

З праць [201, 205] відомо, що для циклічного випадкового процесу неперервного аргументу $\xi(\omega, t) \in \Psi$, $\omega \in \Omega$, $t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$ характерно те, що з нього можна виділити континуальну множину вкладених у нього дискретних циклічних випадкових процесів $\{\xi_d(\omega, t_{i,l}) \in \Psi, \omega \in \Omega, t_{i,l} \in \mathbf{W} = \mathbf{D}\}$ або

$\{\xi_d(\omega, t_{j,l}) \in \Psi, \omega \in \Omega, t_{j,l} \in \mathbf{W} = \mathbf{D}\}$, де \mathbf{D} - дискретна область визначення

$\mathbf{D} = \mathbf{D}_c = \{t_{i,l}, i = \overline{1, C}, l = \overline{1, L}, L \geq 2\}$ або $\mathbf{D} = \mathbf{D}_z = \{t_{j,l}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, l = \overline{1, L_j}\}$;

$d \in \mathbf{R}$ - континуальний параметр, який визначає конкретний дискретний циклічний випадковий процес $\xi(\omega, t_{i,l})$ або $\xi(\omega, t_{j,l})$ із множини можливих

$\{\xi_d(\omega, t_{i,l}) \in \Psi, \omega \in \Omega, t_{i,l} \in \mathbf{W} = \mathbf{D}, d \in \mathbf{R}\}$, або $\{\xi_d(\omega, t_{j,l}) \in \Psi, \omega \in \Omega, t_{j,l} \in \mathbf{W} = \mathbf{D}, d \in \mathbf{R}\}$ і

може бути проінтерпретований, наприклад, як момент часу, що відповідає першому відліку випадкового процесу $\xi(\omega, t) \in \Psi$, $\omega \in \Omega$, $t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$ у його нульовому циклі [201], тобто $d = t_{0,1} \in \mathbf{W}_1 \subset \mathbf{R}$. Нагадаємо, що для циклічних

сигналів кількість відліків на сегменті-циклі вкладеного дискретного циклічного процесу є однаковою і дорівнює L . А для всіх сегментів-зон L_j , і для будь-якого

відліку процесу $\xi(\omega, t_{i,l})$ у момент часу t_i існує лише один однофазний йому відлік в усіх циклах даного дискретного процесу. Для $\xi(\omega, t_{j,l})$ відповідно для

моменту часу $t_{j,l}$ існує лише один однофазний йому відлік в усіх циклах даного

дискретного процесу.

Обмежимося викладенням матеріалу, розглядаючи циклічні сигнали, для яких ідентифікована сегментна циклічна структура $\mathbf{D} = \mathbf{D}_c = \{t_{i,l}, i = \overline{1, C}, l = \overline{1, L}\}$.

Проте легко можна перейти до сегментної зонної структури, яка є вкладеною в сегментну циклічну $\mathbf{D} = \mathbf{D}_z = \left\{ t_{j,l}^i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, l = \overline{1, L_j} \right\}$.

У роботі [201] зазначено, що з кожним вкладеним циклічним дискретним випадковим процесом $\xi(\omega, t_{i,l})$ пов'язано вектор L стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей $\{\varphi_l(\omega, i) = \xi(\omega, t_{i,l}), i \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}\}$, де i має зміст номера члена l -ї послідовності, а L - кількість усіх стаціонарних послідовностей, що пов'язані з вкладеним дискретним процесом $\xi(\omega, t_{i,l})$. Стаціонарність та стаціонарна пов'язаність цих послідовностей є наслідком стохастичної еквівалентності однофазних відліків (як поодинці, так і для їх сукупності) циклічного випадкового процесу $\xi(\omega, t) \in \Psi$, $\omega \in \Omega, t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$. Такі стаціонарні послідовності для стохастично періодичного процесу називають φ -серіями. Факт стаціонарності й стаціонарної пов'язаності, а також припущення ергодичності та ергодичної пов'язаності φ -серій дає змогу застосувати методи опрацювання векторних стаціонарних ергодичних випадкових послідовностей до циклічних випадкових процесів, якщо відома їх функція ритму $T(t, n)$, зазначається у роботах [201, 205].

Розглянемо метод статистичного опрацювання циклічного сигналу, моделлю якого є циклічний випадковий процес. Якщо маємо циклічний випадковий процес $\xi(\omega, t) \in \Psi$, $\omega \in \Omega, t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$ із оціненою функцією ритму $T(t, n)$. Якщо маємо моменти часу t_i та t_{i+1} , що відповідають початку та закінченню деякого i -го циклу цього процесу, тобто задано область визначення $\mathbf{W}_i = [\tilde{t}_i, \tilde{t}_{i+1})$ i -го циклу. Статистичне опрацювання такого циклічного сигналу, моделлю якого є циклічний випадковий процес $\xi(\omega, t) \in \Psi$, $\omega \in \Omega, t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$ зводиться до оцінювання його ймовірнісних характеристик L стаціонарних та стаціонарно пов'язаних, ергодичних та ергодично пов'язаних випадкових послідовностей, що є відповідними φ -серіями, наведено у роботах [201, 205]:

$$\{\varphi_l(\omega, n) = \xi((\omega, t_{i,l} + T(t_{i,l}, n))), n \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}\}, t_{i,1}, \dots, t_{i,L} \in \mathbf{W}_i. \quad (\text{M.1})$$

У роботах [163, 201, 205] показано збіжність статистичних оцінок, які збігаються до математичного сподівання, дисперсії, початкової моментної функції k -го порядку до центральної моментної функції k -го порядку, до початкової моментної функції порядку $p = \sum_{i=1}^k R_i$, до змішаної центральної моментної функції порядку $p = \sum_{i=1}^k R_i$. Показано збіжність у середньоквадратичному сенсі до функції розподілу $F_{k_\xi}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k)$ циклічного випадкового процесу.

Наведені у роботах [163, 201, 205] властивості статистик зумовлені властивістю відомих статистичних оцінок, які розроблені для статистичного оцінювання стаціонарних ергодичних випадкових послідовностей. Оскільки доведена збіжність у середньоквадратичному сенсі статистичних оцінок до відповідних імовірнісних характеристик, то дані статистичні оцінки є слухними, зазначено у роботі [201].

У роботах [201, 205] показано, що достатньо знати одновимірні ймовірнісні характеристики чи їх оцінки циклічного випадкового процесу на якомусь одному із його циклів, а для всіх решта циклів їх можна обчислити, знаючи функцію ритму $T(t, n)$. Наприклад, якщо початкова чи центральна моментні функції k -го порядку або їх відповідні статистичні оцінки відомі для i -го циклу, який заданий на області $\mathbf{W}_i = [\tilde{t}_i, \tilde{t}_{i+1})$, де $\tilde{t}_i, \tilde{t}_{i+1}$ - межі i -го циклу циклічного сигналу. При цьому відома функція ритму $T(t, n)$ циклічного випадкового процесу $\xi(\omega, t) \in \Psi$, $\omega \in \Omega, t \in \mathbf{W} = \mathbf{R}$, то ці моментні функції можна обчислювати на всій області визначення \mathbf{R} циклічного випадкового процесу. Математичне сподівання для $i + n$ -го циклу ($i \in \mathbf{Z}$) наведено у роботах [163, 201, 205]

$$m_\xi(t + T(t, n)) = m_\xi(t), t \in \mathbf{W}_i, n \in \mathbf{Z}. \quad (\text{M.2})$$

Область визначення $i + n$ -го циклу відповідно дорівнює

$$\mathbf{W}_{i+n} = [t_i + T(t_i, n), t_{i+1} + T(t_{i+1}, n)], i = \text{const}, n \in \mathbf{Z}. \quad (\text{M.3})$$

У випадку коли n приймає всі цілі числа, а $t \in \mathbf{W}_i$, то отримуємо математичне сподівання циклічного випадкового процесу на всій дійсній осі.

В системах цифрового опрацювання циклічних сигналів завжди реєструється скінченна кількість циклів циклічного сигналу. Цей факт необхідно враховувати при його статистичному опрацюванні. Як було зазначено раніше, в загальному випадку циклічний сигнал, моделлю якого є циклічний випадковий процес $\xi(\omega, t), t \in \widehat{\mathbf{W}} \subset \mathbf{R}$ заданий на скінченній області $\widehat{\mathbf{W}}$, причому область $\widehat{\mathbf{W}}$ не завжди є об'єднанням цілого числа областей визначення циклів (2.8). На практиці формулу (2.8) замінюють (2.9), $\widehat{\mathbf{W}} = \bigcup_{i=1}^C \mathbf{W}_i$ і враховують ціле число циклів - C зареєстрованої реалізації.

Запишемо відомі формули [163, 201, 205] для обчислення реалізацій відповідних статистичних оцінок імовірнісних характеристик циклічного випадкового процесу у випадку, коли задана деяка тривала його реалізація $\xi_\omega(t) \in \Psi, t \in \widehat{\mathbf{W}}$.

У роботах [163, 168, 175, 192, 201, 205] наведено визначення реалізацій статистичних оцінок. Статистична оцінка математичного сподівання визначається

$$\hat{m}_\xi(t) = \frac{1}{C} \cdot \sum_{n=0}^{C-1} \xi_\omega(t + T(t, n)), t \in \mathbf{W}_1 = [\tilde{t}_1, \tilde{t}_2), \quad (\text{M.4})$$

де \tilde{t}_1, \tilde{t}_2 - межі першого циклу циклічного сигналу.

Реалізація статистичної оцінки дисперсії визначається

$$\hat{d}_{\xi}(t) = \frac{1}{C-1} \cdot \sum_{n=0}^{C-1} (\xi_{\omega}(t+T(t,n)) - \hat{m}_{\xi}(t+T(t,n)))^2, t \in \mathbf{W}_1 = [\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]. \quad (\text{M.5})$$

Реалізація статистичної оцінки початкової моментної функції k -го порядку визначається

$$\hat{m}_{\xi}^k(t) = \frac{1}{C} \cdot \sum_{n=0}^{C-1} \xi_{\omega}^k(t+T(t,n)), t \in \mathbf{W}_1 = [\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]. \quad (\text{M.6})$$

Реалізація статистичної оцінки центральної моментної функції k -го порядку визначається

$$\hat{d}_{\xi}^k(t) = \frac{1}{C-1} \cdot \sum_{n=0}^{C-1} (\xi_{\omega}(t+T(t,n)) - \hat{m}_{\xi}(t+T(t,n)))^k, t \in \mathbf{W}_1 = [\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]. \quad (\text{M.7})$$

Реалізація статистичної оцінки змішаної початкової моментної функції порядку $p = \sum_{i=1}^k R_i$ визначається

$$\hat{c}_{p_{\xi}}(t_1, \dots, t_k) = \frac{1}{C - C_1 + 1} \cdot \sum_{n=0}^{C-C_1} (\xi_{\omega}^{R_1}(t_1 + T(t_1, n)) \cdot \dots \cdot \xi_{\omega}^{R_k}(t_k + T(t_k, n))),$$

$$t_1 \in \mathbf{W}_1, t_2, \dots, t_k \in \bigcup_{i=1}^{C_1} \mathbf{W}_i, n \in \mathbf{Z}, \quad (\text{M.8})$$

де C_1 ($C_1 \ll C$) - кількість циклів, у рамках яких набувають свої значення аргументи t_2, \dots, t_k .

Реалізація статистичної оцінки змішаної центральної моментної функції порядку $p = \sum_{i=1}^k R_i$ визначається

$$\hat{r}_{p_\xi}(t_1, \dots, t_k) = \frac{1}{C - C_1} \cdot \sum_{n=0}^{C-C_1} \left((\xi_\omega(t_1 + T(t_1, n)) - \hat{m}_\xi(t_1 + T(t_1, n)))^{R_1} \cdot \dots \cdot (\xi_\omega(t_k + T(t_k, n)) - \hat{m}_\xi(t_k + T(t_k, n)))^{R_k} \right),$$

$$t_1 \in \mathbf{W}_1, t_2, \dots, t_k \in \bigcup_{i=1}^{C_1} \mathbf{W}_i, n \in \mathbf{Z}. \quad (\text{M.9})$$

Реалізація статистичної оцінки функції розподілу $F_{k_\xi}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k)$ циклічного випадкового процесу визначається

$$\hat{F}_{k_\xi}(x_1, \dots, x_k; t_1, \dots, t_k) = \frac{1}{C - C_1 + 1} \cdot \sum_{n=0}^{C-C_1} \prod_{i=1}^k H(x_i - \xi_\omega(t_i + T(t_i, n))),$$

$$t_1 \in \mathbf{W}_1, t_2, \dots, t_k \in \bigcup_{i=1}^{C_1} \mathbf{W}_i, n \in \mathbf{Z}. \quad (\text{M.10})$$

У роботах [201, 205] зазначено, що наведені статистичні оцінки, які записано для циклічного випадкового процесу неперервного аргументу $\xi(\omega, t) \in \Psi, \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}$, можуть бути легко адаптовані для статистичного оцінювання дискретного циклічного випадкового процесу $\{\xi(\omega, t_{i,l}), \omega \in \Omega, t_{i,l} \in \mathbf{D}\}$. Його можна розглядати як вкладений у неперервний, якщо припустити, що область визначення циклічного процесу є дискретна область \mathbf{D} , а функція ритму також є дискретною, тобто, $T(t_{i,l}, n), n, i \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}$. У такому разі область визначення i -го циклу дискретного циклічного процесу буде область $\mathbf{W}_i = \{t_{i,l}, l = \overline{1, L}\}$. Замість оцінювання ймовірнісних характеристик на всій дійсній множині \mathbf{R} його визначення, як це було для неперервного випадку. Достатньо провести таке оцінювання лише на дискретній множині \mathbf{D} , що є частинним випадком розглянутих вище методів статистичного оцінювання.

М.2. Статистичне оцінювання сумісних імовірнісних характеристик вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів з врахуванням

оціненої ритмічної структури

В роботі [207] наведено методи статистичного оцінювання сумісних ймовірнісних характеристик вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів, що розширює сферу застосування стохастичного підходу до сумісного аналізу синхронно зареєстрованих циклічних сигналів із однаковою ритмічною структурою.

Якщо маємо вектор $\Theta_N(\omega, t)$ циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів $\{\xi_i(\omega, t), i = \overline{1, N}, \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}\}$ із функцією ритму $T(t, n)$, а також відомо моменти часу t_i та t_{i+1} , які відповідають початку та закінченню i -го циклу випадкового вектора $\Theta_N(\omega, t)$, тобто маємо область визначення $\mathbf{W}_i = [\tilde{t}_i, \tilde{t}_{i+1})$ i -го циклу, таку інформацію дозволяють отримати розроблені методи сегментації. Статистичне оцінювання ймовірнісних характеристик вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів $\Theta_N(\omega, t)$ зводиться до оцінювання ймовірнісних характеристик L стаціонарних та стаціонарно пов'язаних, ергодичних та ергодично пов'язаних випадкових послідовностей, зазначено у роботі [201],

$$\left\{ \varphi_l(\omega, n) = \xi_{i_l} \left((\omega, t_{i,l} + T(t_{i,l}, n)) \right), l = \overline{1, L}, i_l = \overline{1, N}, \omega \in \Omega, t_{i,l} \in \mathbf{D}, n \in \mathbf{Z} \right\},$$

$$t_{i,1}, \dots, t_{i,L} \in \mathbf{W}_i, \quad (\text{M.11})$$

за реалізаціями яких можна отримати реалізації статистичних оцінок сумісних багатовимірних функцій розподілу, щільностей розподілу, характеристичних та моментних функцій вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів.

У роботах [175, 201, 205, 292] наведено вирази, що вказують на збіжність у середньоквадратичному сенсі статистичних оцінок до оцінюваних сумісних ймовірнісних характеристик вектора $\Theta_N(\omega, t)$ і які лежать в основі методів статистичного оцінювання його сумісних ймовірнісних характеристик. Відзначимо, що сенс збіжності статистичних оцінок ймовірнісних характеристик вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів визначається сенсом

збіжності відповідних статистик, які побудовані для k стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей (М.11), для яких припускається властивість ергодичності та ергодичної пов'язаності.

На практиці, як зазначалося вище, завжди реєструється кілька циклів реалізації вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. Тому розглянемо відомі методи статистичного оцінювання для такого випадку. Аналогічно до випадку статистичного опрацювання одного циклічного випадкового процесу, нехай зареєстрована реалізація $\Theta_{N\omega}(t) = \{\xi_{i\omega}(t), i = \overline{1, N}, t \in \mathbf{W} \subset \mathbf{R}\}$ вектора $\Theta_N(\omega, t)$ циклічних випадкових процесів задана на скінченній області $\widehat{\mathbf{W}}$, причому область $\widehat{\mathbf{W}}$ не завжди є об'єднанням цілого числа областей визначення циклів (2.8). Тому перед проведенням статистичного опрацювання необхідно залишити лише ті ділянки реалізацій $\{\xi_{i\omega}(t), i = \overline{1, N}, t \in \widehat{\mathbf{W}} \subset \mathbf{R}\}$, які складаються із області $\widehat{\mathbf{W}}$ і є об'єднанням цілого числа областей визначення C циклів, тобто $\widehat{\mathbf{W}} = \bigcup_{i=1}^C \mathbf{W}_i$ (2.9).

Отже, методи статистичного оцінювання сумісних імовірнісних характеристик вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів зведуться до таких статистик наведених у роботах [163, 201, 205].

Реалізація статистичної оцінки змішаної початкової моментної функції порядку $p = \sum_{j=1}^k R_j$

$$\hat{c}_{p_{\xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}}(t_1, \dots, t_k) = \frac{1}{C - C_1 + 1} \cdot \sum_{n=0}^{C-C_1} \left(\xi_{i_1\omega}^{R_1}(t_1 + T(t_1, n)) \cdot \dots \cdot \xi_{i_k\omega}^{R_k}(t_k + T(t_k, n)) \right),$$

$$t_1 \in \mathbf{W}_1, t_2, \dots, t_k \in \bigcup_{i=1}^{C_1} \mathbf{W}_i, n \in \mathbf{Z}, i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}. \quad (\text{М.12})$$

Реалізація статистичної оцінки змішаної центральної моментної функції порядку $p = \sum_{j=1}^k R_j$:

$$\hat{r}_{p_{\xi_{i_1} \dots \xi_{i_k}}} (t_1, \dots, t_k) = \frac{1}{C - C_1} \cdot \sum_{n=0}^{C-C_1} \left[\left(\xi_{i_1 \omega}^{R_1} (t_1 + T(t_1, n)) - \hat{m}_{\xi_{i_1}} (t_1 + T(t_1, n)) \right)^{R_1} \cdot \dots \cdot \left(\xi_{i_k \omega}^{R_k} (t_k + T(t_k, n)) - \hat{m}_{\xi_{i_k}} (t_k + T(t_k, n)) \right)^{R_k} \right],$$

$$t_1 \in \mathbf{W}_1, t_2, \dots, t_k \in \bigcup_{i=1}^{C_1} \mathbf{W}_i, n \in \mathbf{Z}, i_1, \dots, i_k = \overline{1, N}. \quad (\text{M.13})$$

Відзначимо, що наведені статистичні оцінки [163, 195, 201, 205], які записано для вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів неперервного аргументу $\{\xi_i(\omega, t), i = \overline{1, N}, \omega \in \mathbf{\Omega}, t \in \mathbf{R}\}$, можуть бути адаптовані для статистичного оцінювання вектора дискретних циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів $\{\xi_i(\omega, t_{i,l}), i = \overline{1, N}, \omega \in \mathbf{\Omega}, t_{i,l} \in \mathbf{D}\}$, який можна розглядати як вкладений у неперервний, якщо припустити, що область визначення вектора є дискретна область \mathbf{D} , а його функція ритму також є дискретною, тобто $T(t_{i,l}, n), i, n \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}$ або $T(t_{j,l}, n), i, j, n \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L_j}$. У такому разі областю визначення i -го циклу буде множина $\mathbf{W}_i = \{t_{i,l}, l = \overline{1, L}\}$ або $\mathbf{W}_j = \{t_{j,l}, l = \overline{1, L_j}\}$. Тобто, замість оцінювання ймовірнісних характеристик на всій дійсній множині \mathbf{R} , як це було для неперервного випадку, достатньо провести таке оцінювання лише на дискретній множині \mathbf{D} , що є частинним випадком розглянутих вище методів статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів [201, 204].

Застосовані відомі методи статистичного опрацювання сумісних ймовірнісних характеристик циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів дають змогу проводити їх сумісний статистичний аналіз у рамках змішаних моментних функцій та в рамках багатовимірних сумісних функцій розподілу [201].

За умови, що оцінений ритм є постійним, будемо мати ритмічну структуру $T(t, n) = n \cdot T, T = const > 0$. Це – частинний випадок відомих статистичних

методів, який дає змогу проводити статистичне оцінювання ймовірнісних характеристик стохастично періодичних та періодично пов'язаних випадкових процесів зазначено у роботі [201]. Наведені вище математичні співвідношення дозволяють проводити статистичне опрацювання взаємопов'язаних циклічних сигналів, математичною моделлю яких є вектор ритмічно пов'язаних випадкових процесів.

Додаток Н

Застосування коефіцієнтів розкладу в різних базисах, як діагностичних ознак. Відомості про поліноми дискретного аргументу Чебишева, Кравчука та Лагера

Н.1. Застосування коефіцієнтів розкладу в різних базисах, як діагностичних ознак.

Розглянемо випадок [185], коли задана деяка система ортонормованих дискретних функцій $\left\{ \psi_n(t), n \in \mathbf{Z}, t = \overline{0, T} \right\}$, тоді дискретна функція $e(t), t = \overline{0, T}$ може бути наведена у вигляді ряду

$$e(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cdot \psi_n(t), \quad c_n = \sum_t e(t) \cdot \psi_n(t) \cdot \rho(t), \quad (\text{Н.1})$$

де T - тривалість функції $e(t)$, на якій вона задана; c_n - коефіцієнти ряду; $\rho(t)$ - вагова функція, вибір якої пов'язаний із видом апроксимованої функції: вагова функція повинна досягати максимуму на ділянці, де необхідна найкраща апроксимація.

Множину коефіцієнтів $\{c_n, n \in \mathbf{Z}\}$ називають спектром функції $e(t), t = \overline{0, T}$ в ортонормованому базисі функцій $\left\{ \psi_n(t), n \in \mathbf{Z}, t = \overline{0, T} \right\}$.

Відомо [185], що одну і ту ж функцію можна розкласти у ряд по різних ортонормованих базисах. Наведемо функцію $e(t), t = \overline{0, T}$ у вигляді ряду (Н.2) та у вигляді ряду в базисі інших ортонормованих функцій $\left\{ \phi_k(t), k \in \mathbf{Z}, t = \overline{0, T} \right\}$, тоді

$$e(t) = \sum_{k=0}^{\infty} v_k \cdot \phi_k(t), \quad (\text{Н.2})$$

де v_k - коефіцієнти ряду.

Помножимо обидві частини (Н.1) на $\phi_k(t)$ і просумуємо по t , де задана функція $e(t), t = \overline{0, T}$

$$\sum_t e(t) \cdot \phi_k(t) = \sum_t \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cdot \psi_n(t) \cdot \phi_k(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \sum_t \psi_n(t) \cdot \phi_k(t). \quad (\text{Н.3})$$

Для функції $e(t), t = \overline{0, T}$ ліва частина виразу (Н.3) є k -м коефіцієнтом нормованого ряду v_k , а сума в правій частині, що позначена – Φ_{nk} є коефіцієнтом того ж ряду для базисної функції $\psi_n(t)$. Звідси

$$v_k = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cdot \Phi_{nk}. \quad (\text{Н.4})$$

Оскільки коефіцієнти Φ_{nk} не залежать від $e(t), t = \overline{0, T}$, тому вираз (Н.4) дозволяє встановити зв'язок між спектрами коефіцієнтів розкладів у ряди функції $e(t), t = \overline{0, T}$ по різних ортогональних базисах.

При розкладі базисних функції $\{\psi_n(t), n \in \mathbf{Z}\}$ у ряд за системою інших ортогональних функцій $\{\phi_k(t), k \in \mathbf{Z}\}$ вони можуть мати досить складний спектр. Такий підхід дає можливість апроксимувати функцію $e(t), t = \overline{0, T}$ з однаковою точністю найменшим числом коефіцієнтів у порівнянні із усіма іншими базисними функціями серед деякої множини базисних функцій, які входять у цю множину. Подібний підхід був використаний в роботі [185] для задачі розпізнавання виділених діагностичних сегментів електрокардіосигналу.

Н.2. Відомості про поліноми дискретного аргументу Чебишева, Кравчука та Лагера

Поліноми Чебишева. У загальному поліноми Чебишева задаються на дискретній множині точок $x \in \overline{0, N-1}$ або $x \in \overline{0, N}$.

Поліноми Чебишева, які задані на проміжку $x \in [0, N]$ з вільним (нульовим) членом, що дорівнює 1, обчислюються за формулою [231]

$$t_k(x, N) = \sum_{j=0}^k (-1)^j \binom{k}{j} \binom{k+j}{j} \frac{x^{[k]}}{N^{[j]}} = \sum_{j=0}^k (-1)^j a_{kj} \frac{x^{[j]}}{N^{[j]}}. \quad (\text{H.5})$$

Запишемо перші п'ять поліномів Чебишева у явному вигляді так:

$$\begin{aligned} t_0(x, N) &= 1, \\ t_1(x, N) &= 1 - 2 \frac{x}{N}, \\ t_2(x, N) &= 1 - 6 \frac{x}{N} + 6 \frac{x(x-1)}{N(N-1)}, \\ t_3(x, N) &= 1 - 12 \frac{x}{N} + 30 \frac{x^{[2]}}{N^{[2]}} - 20 \frac{x^{[3]}}{N^{[3]}}, \\ t_4(x, N) &= 1 - 20 \frac{x}{N} + 90 \frac{x^{[2]}}{N^{[2]}} - 140 \frac{x^{[3]}}{N^{[3]}} + 70 \frac{x^{[4]}}{N^{[4]}}. \end{aligned} \quad (\text{H.6})$$

Коефіцієнти ортогонального розкладу деякої функції $f(x)$, $x \in [0, N]$ у ряд Чебишева мають вигляд

$$a_k = \frac{2k+1}{N(N^2-1)\dots(N^2-n^2)} \cdot \sum_{x=0}^{N-1} f(x) t_k(x), \quad n \in [0, N-1]. \quad (\text{H.7})$$

Наведемо рекурентні співвідношення, які дозволяють послідовно обчислити значення поліномів Чебишева

$$\begin{aligned} (n+1)t_{n+1}(x) - (2n+1)(2x-N+1)t_n(x) + n(N^2-n^2)t_{n-1}(x) &= 0, \\ n &\in [1, N-2]. \end{aligned} \quad (\text{H.8})$$

Графіки перших п'яти поліномів Чебишева наведено на рисунку Н.1.

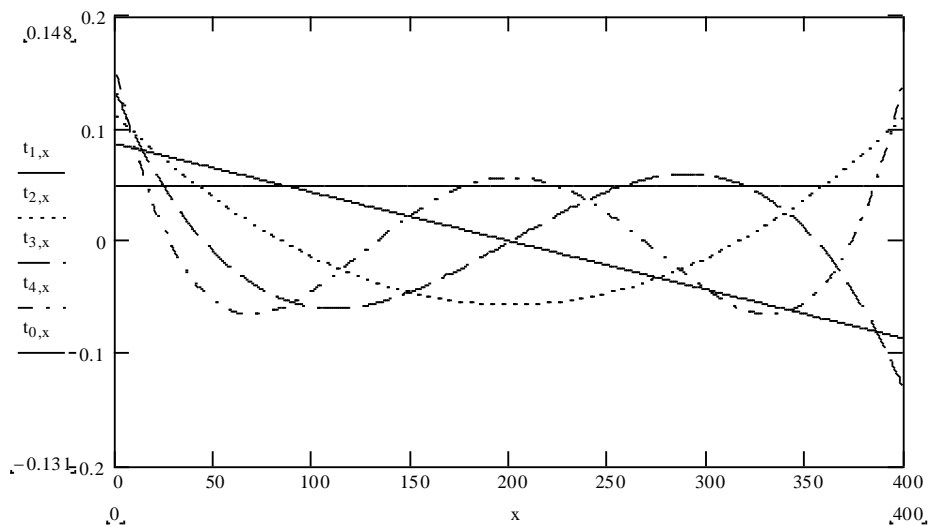


Рис. Н.1. Графіки перших п'яти поліномів Чебишева

Поліноми Кравчука. Поліноми Кравчука задані на дискретній множині точок $x \in [0, N]$.

Вагова функція $j(x)$ поліномів має вигляд

$$j(x) = \binom{N}{x} p^x q^{N-x}, \quad x \in [0, N], \quad p > 0, q > 0, p + q = 1. \quad (\text{H.9})$$

Поліноми Кравчука можна визначити за виразом [231]

$$\begin{aligned} k_n(x, p, N) = k_n(x) &= \sum_{k=0}^n (-1)^{n-k} \binom{N-x}{n-x} \binom{x}{k} p^{n-k} q^k = \\ &= \frac{1}{n!} \sum_{k=0}^n (-1)^{n-k} \binom{n}{k} p^{n-k} (N-k)^{[n-k]} x^{[k]}, \quad n \in [0, N] \end{aligned} \quad (\text{H.10})$$

Перші чотири поліноми Кравчука записуємо так [227]:

$$\begin{aligned}
 k_0(x) &= 1, \\
 k_1(x) &= x - pN, \\
 k_2(x) &= \frac{1}{2} \left[x^2 + (p - q - 2pN)x + p^2 N(N - 1) \right], \\
 k_3(x) &= \frac{1}{6} \left\{ x^3 - 3p(q + N)x^2 + \left[3p^2(N - 1)(N - 2) + 3p(N - 2) + 2 \right] x - \right. \\
 &\quad \left. - p^3 N(N - 1)(N - 2) \right\}
 \end{aligned} \tag{H.11}$$

Графіки перших чотирьох поліномів Кравчука наведено на рисунку Н.2.

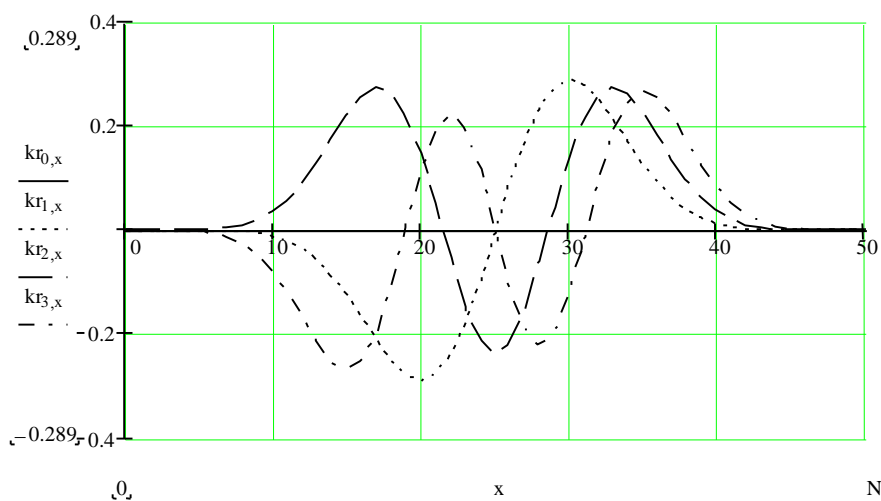


Рис. Н.2. Графіки перших чотирьох поліномів Кравчука

Коефіцієнти ортогонального розкладу в ряд Кравчука функції $f(x)$, $x = \overline{0, N}$ обчислюємо за співвідношенням

$$a_n = \left[\binom{N}{n} (pq)^n \right]^{-1} \sum_{x=0}^N j(x) f(x) k_n(x). \tag{H.12}$$

Рекурентне співвідношення для поліномів Кравчука має вигляд

$$\begin{aligned}
 (n + 1)k_{n+1}(x) &= [x - n(1 - 2p) - pN]k_n(x) - pq(N - n + 1)k_{n-1}(x), \\
 n &\in [1, N - 1]
 \end{aligned} \tag{H.13}$$

Поліноми Лагера. Поліноми Лагера задані на дискретній множині точок $x \in \overline{[0, \infty)}$. Вагова функція для даних поліномів має вигляд

$$j(x) = e^{-\lambda x}, \lambda > 0, x \in \overline{[0, \infty)}. \quad (\text{H.14})$$

Поліноми Лагера можна обчислити за формулою

$$\begin{aligned} l_n(x) &= (-1)^n \sum_{k=0}^n (-1)^k \binom{n}{k} \frac{(x+k)^{[n]}}{n!} \exp(-\lambda k) = \\ &= \frac{a^n}{(a+1)^n} \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \frac{(-1)^k x^{[k]}}{a^k k!}, \quad x, n \in \overline{[0, \infty)}, \end{aligned} \quad (\text{H.15})$$

де $a = (e^{-\lambda} - 1)^{-1}$.

Запишемо перші чотири поліноми Лагера [231]

$$\begin{aligned} l_0(x) &= 1, \\ l_1(x) &= e^{-\lambda x} [1 + x(1 - e^\lambda)], \\ l_2(x) &= e^{-2\lambda x} [1 + 2x(1 - e^\lambda)] + \frac{1}{2}(1 - e^\lambda)^2 x^{[2]}, \\ l_3(x) &= e^{-3\lambda x} [1 + 3x(1 - e^\lambda)] + \frac{3}{2}(1 - e^\lambda)^2 x^{[2]} + \frac{1}{6}(1 - e^\lambda)^3 x^{[3]}. \end{aligned} \quad (\text{H.16})$$

На рисунку Н.3 наведено графіки перших п'яти поліномів Лагера.

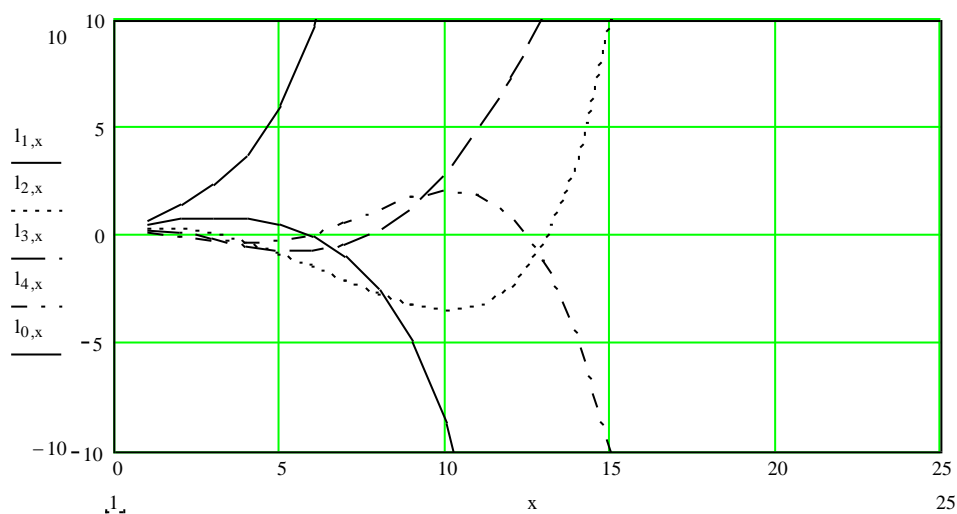


Рис. Н.3. Графіки перших п'яти поліномів Лагера

Додаток П

Розклади одновимірних та двовимірних оцінок статистичних характеристик циклічних сигналів

П.1. Приклад використання розкладів у ряд Чебишева сегментів циклічних електрокардіосигналів

Для прикладу наведемо розклади діагностичної зони R (сегмент R) циклічних електрокардіосигналів.

M := 20

N := 20

q := READPRN("F:\Rozklad\Segment R.prn")

x := 0..N

$q_x := q_x$

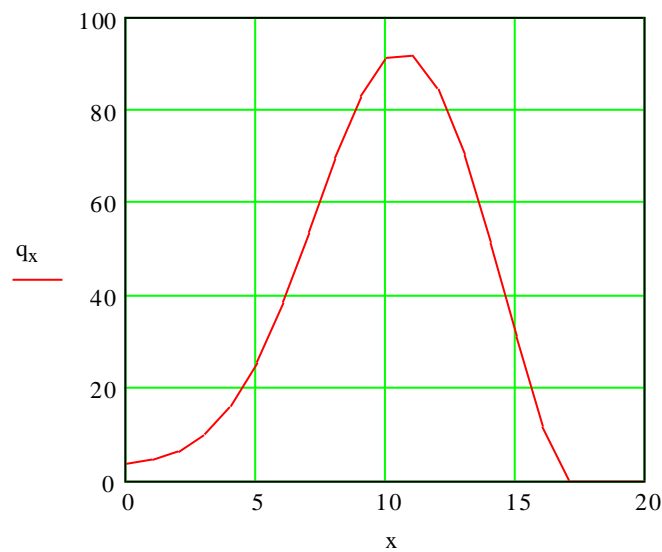


Рис. П.1. Сегмент-зона R (діагностична зона R)

f := q

$t_{0,x} := 1$

$t_{1,x} := 1 - 2 \cdot \frac{x}{N}$

k := 2..M

$t_{k,x} := \frac{(2 \cdot k - 1) \cdot (N - 2 \cdot x) \cdot t_{k-1,x} - (k - 1) \cdot (N + k) \cdot t_{k-2,x}}{k \cdot (N - k + 1)}$

k := 0..M

$$e_k := \sqrt{\sum_{x=0}^{N-1} (t_{k,x})^2}$$

$$t_{k,x} := \frac{t_{k,x}}{e_k}$$

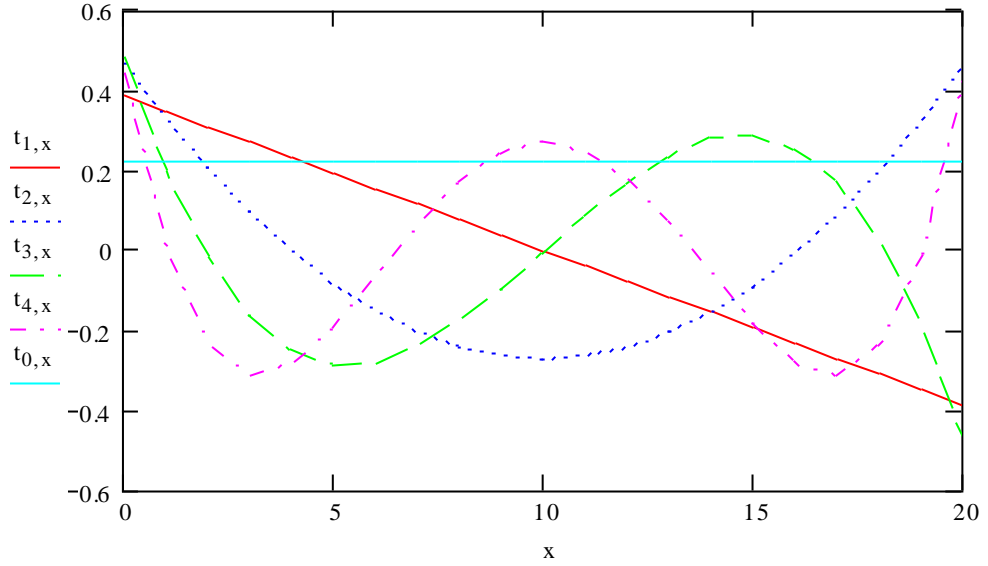


Рис. П.2. Поліноми Чебишева

x:=0..N
k:=0..M

$$c_k := \left(\sum_{x=0}^{N-1} f_x \cdot t_{k,x} \right)$$

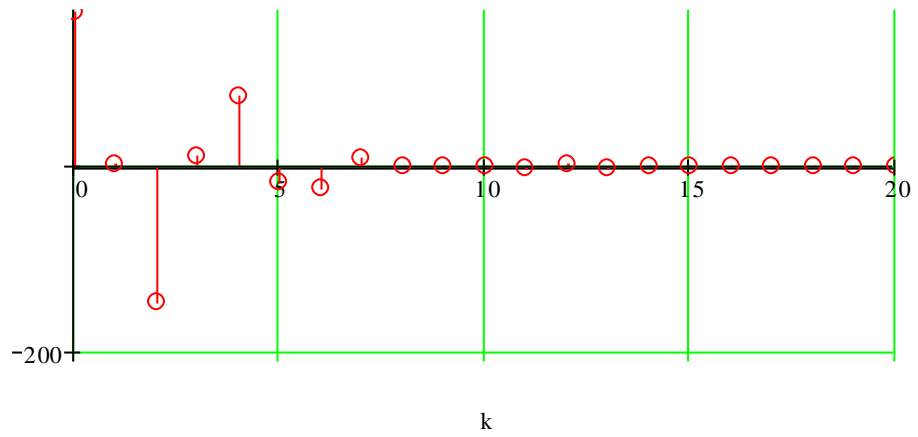


Рис. П.3. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

$$cE_k := \left(\sum_{x=0}^{N-1} f_x \cdot t_{k,x} \right)^2$$

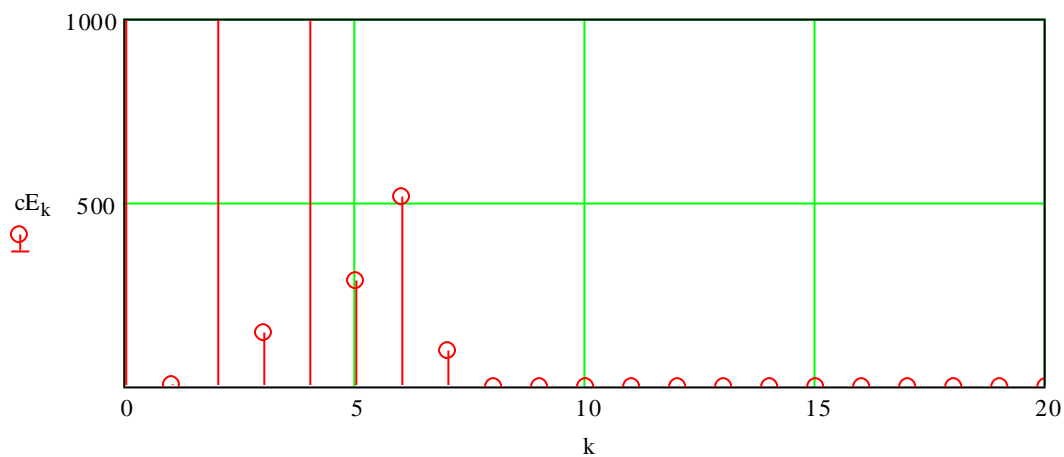


Рис. П.4. Енергетичний спектр

$$g_x := \sum_{k=0}^M c_k \cdot t_{k,x}$$

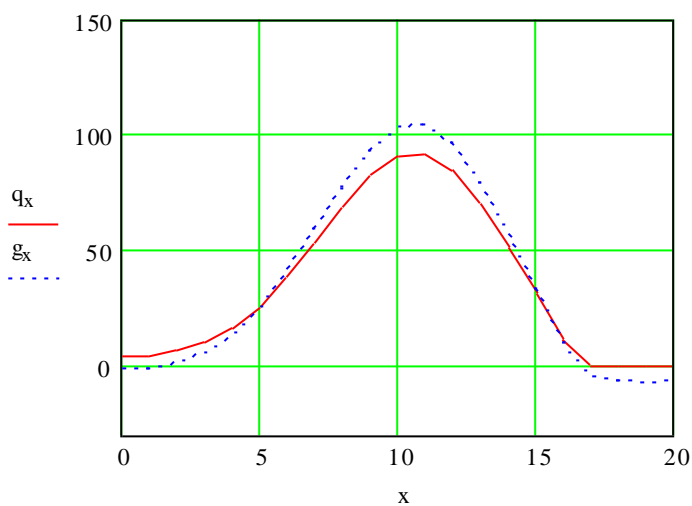


Рис. П.5. Сегмент-зона R (діагностична зона R)

Енергетичний критерій

$$fE := \sum_{x=0}^N (f_x)^2$$

$$gE := \sum_{k=0}^2 (c_k)^2$$

$$pro := \frac{gE \cdot 100}{fE}$$

$$pro = 95.413$$

П.1.1. Приклади використання розкладів у ряд Чебишева сегментів циклічних електрокардіосигналів для їх розпізнавання

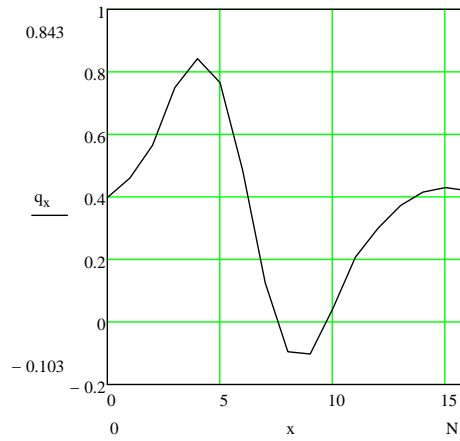


Рис. П.6. Сегмент-зона (діагностична зона RS)

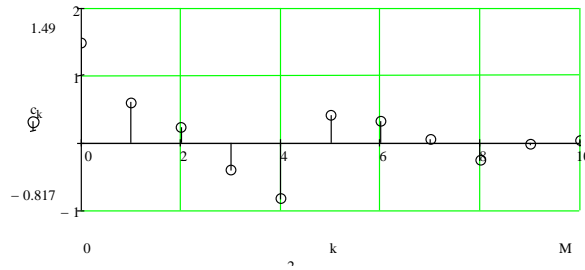


Рис. П.7. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

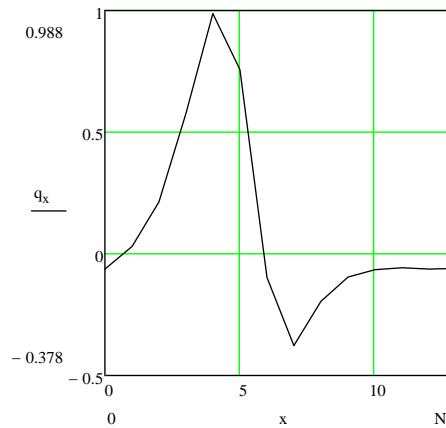


Рис. П.8. Сегмент-зона (діагностична зона RS)

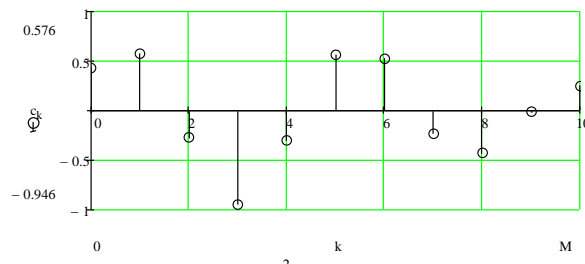


Рис. П.9. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

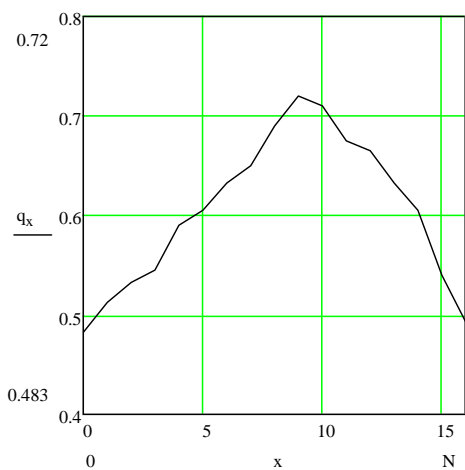


Рис. П.10. Сегмент-зона (діагностична зона Р)

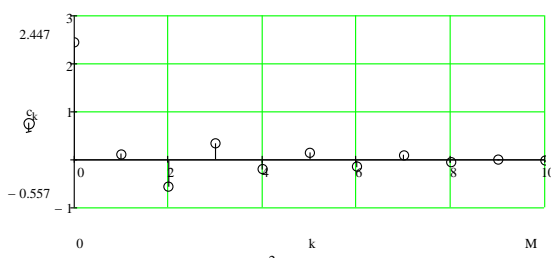


Рис. П.11. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

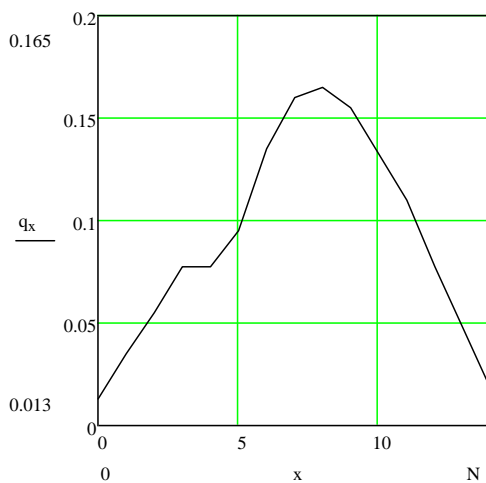


Рис. П.12. Сегмент-зона (діагностична зона Р)

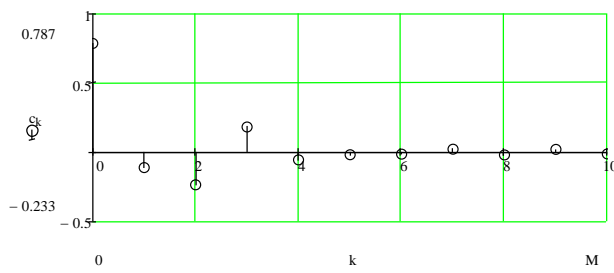


Рис. П.13. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

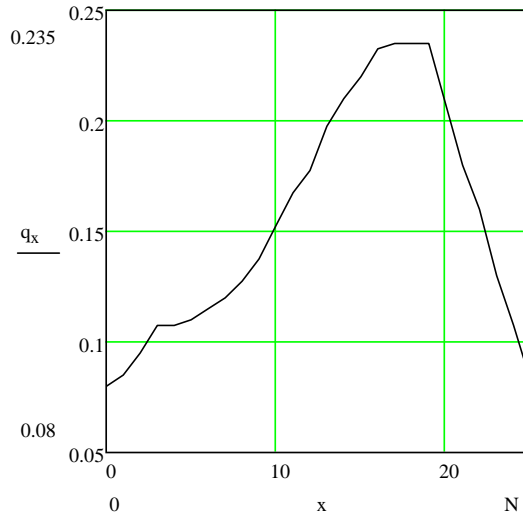


Рис. П.14. Сегмент-зона (діагностична зона Т)

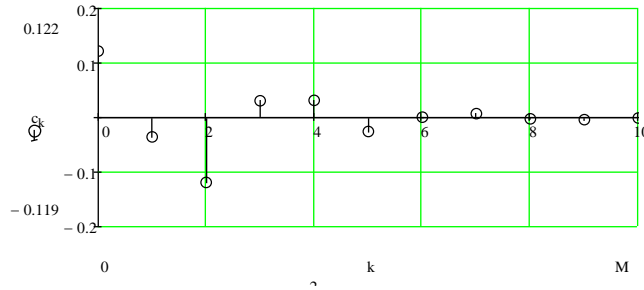


Рис. П.15. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

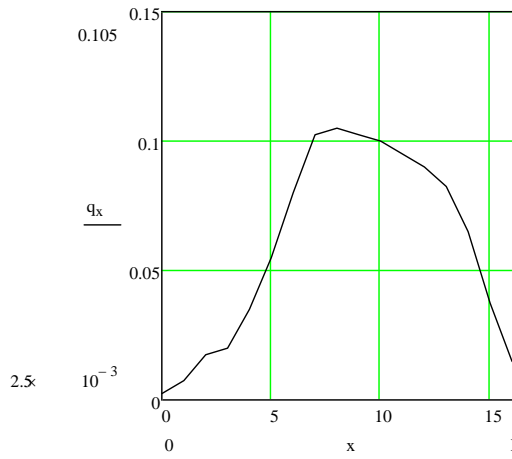


Рис. П.16. Сегмент-зона (діагностична зона Т)

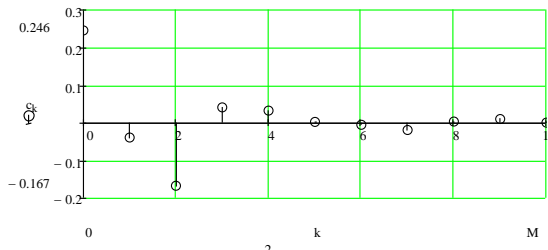


Рис. П.17. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

П.2.1. Приклади результатів розкладів одновимірних статистичних оцінок імовірнісних характеристик (математичного сподівання) кардіосигналів у ряд Чебишева та ряд тригонометричних функцій

Типові сегменти-цикли циклічних кардіосигналів (статистичні оцінки математичного сподівання) та спектри коефіцієнтів їх розкладу у базисі Чебишева й базисі тригонометричних функцій наведено на рисунках П.18–П.30.

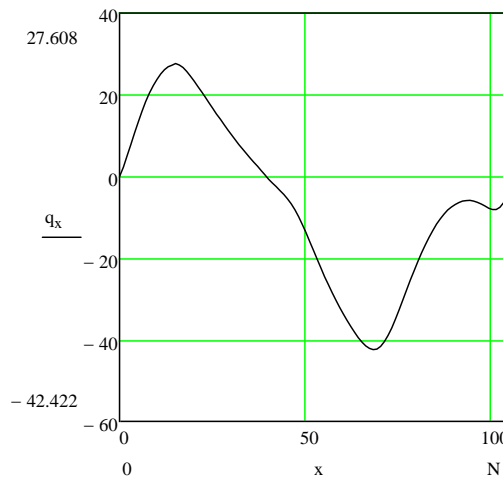


Рис. П.18. Оцінка математичного сподівання циклічного сигналу артеріального тиску

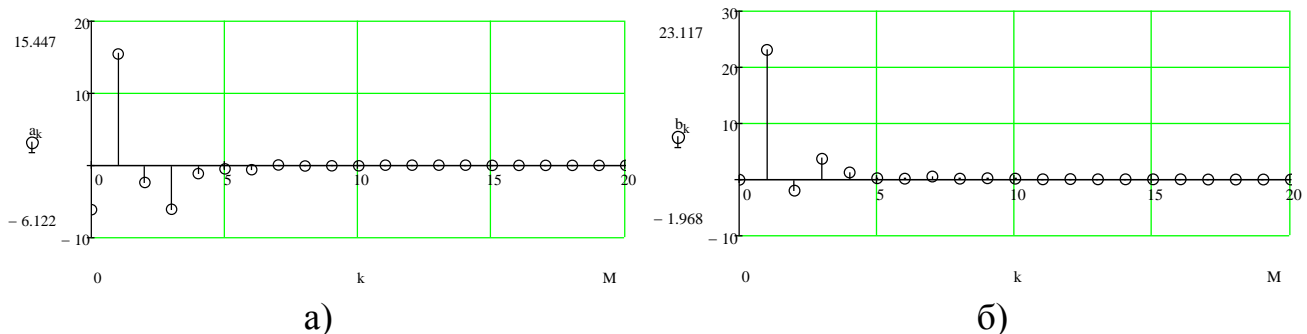


Рис. П.19. Спектр коефіцієнтів у базисі тригонометричних функцій: а) косинусний спектр; б) синусний спектр

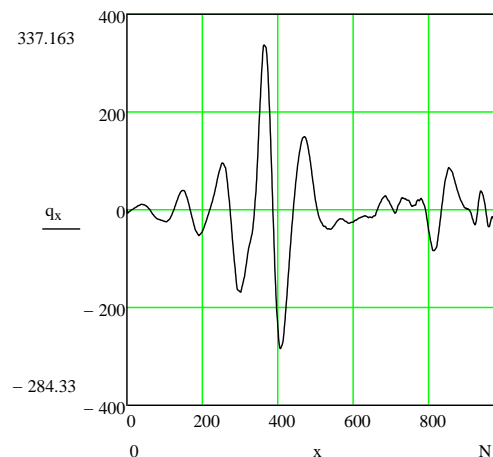


Рис. П.20. Оцінка математичного сподівання циклічного фонокардіосигналу

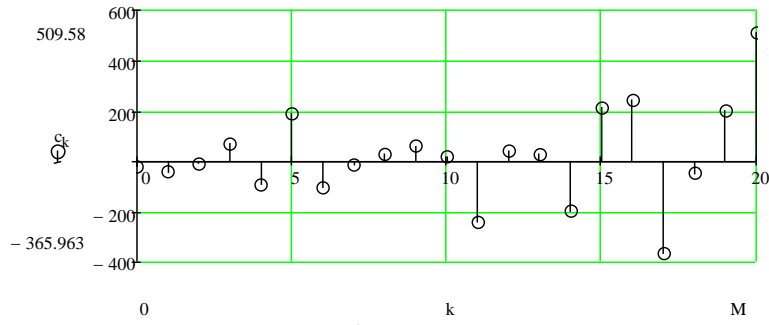


Рис. П.21. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

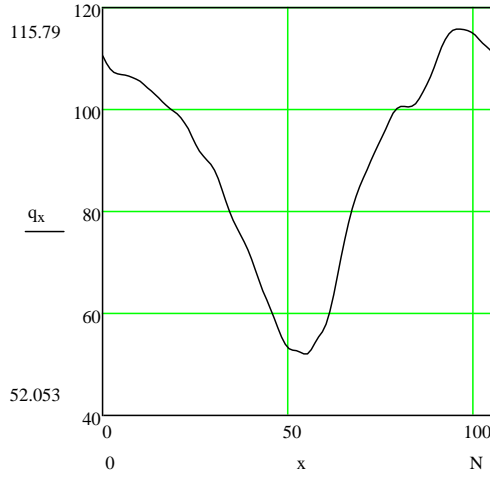


Рис. П.22. Оцінка математичного сподівання сфігмокардіосигналу

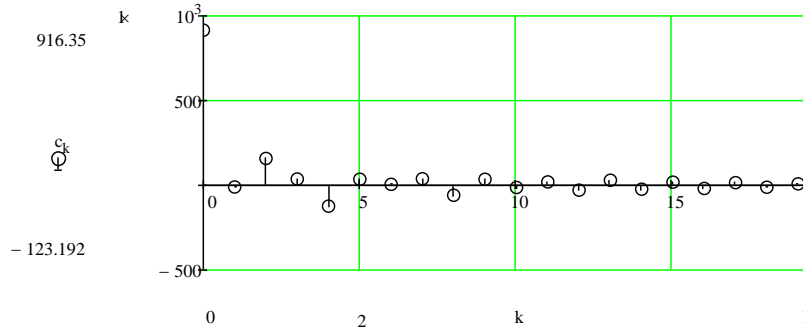
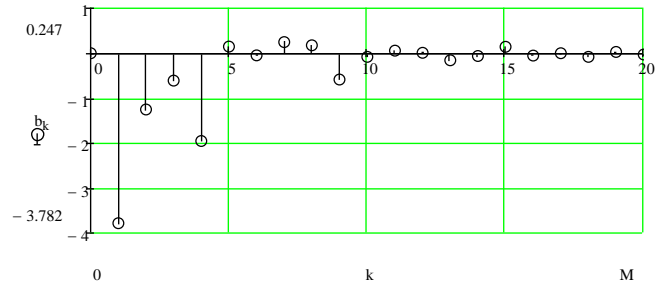
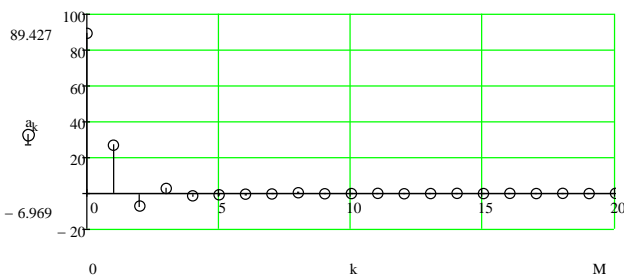


Рис. П.23. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева



а)

б)

Рис. П.24. Спектр коефіцієнтів у базисі тригонометричних функцій: а) косинусний спектр; б) синусний спектр

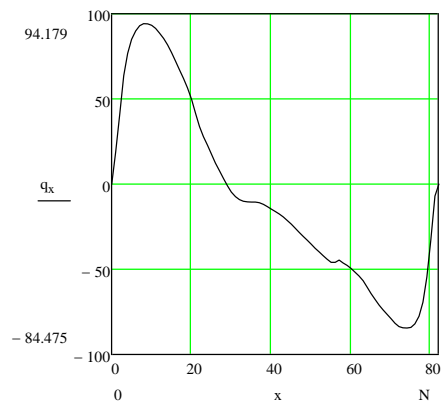


Рис. П.25. Оцінка математичного сподівання реокардіосигналу

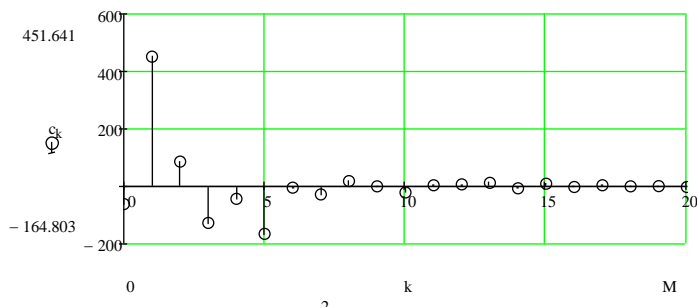
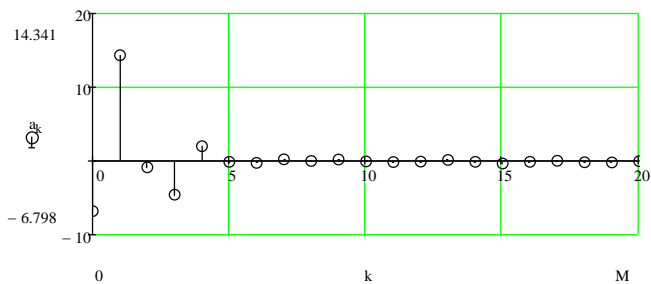
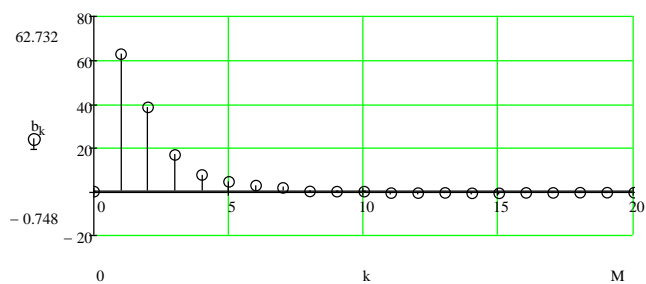


Рис. П.26. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева



а)



б)

Рис. П.27. Спектр коефіцієнтів у базисі тригонометричних функцій: а) косинусний спектр; б) синусний спектр

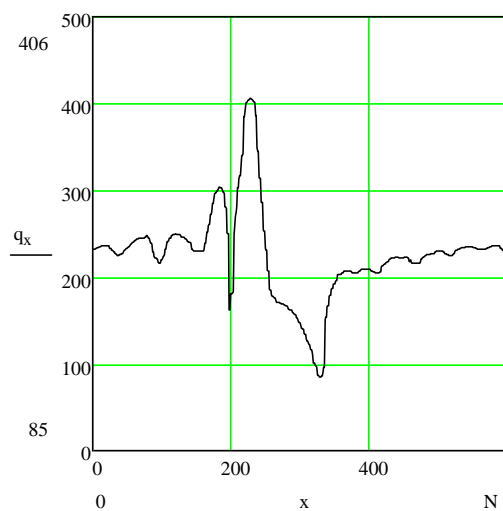


Рис. П.28. Оцінка математичного сподівання магнітокардіосигналу

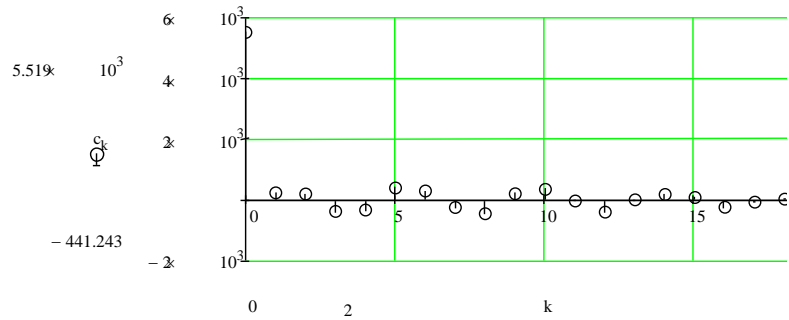
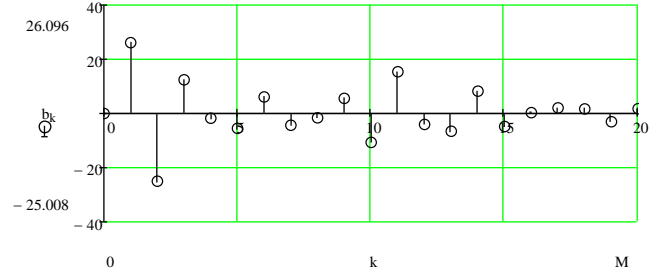
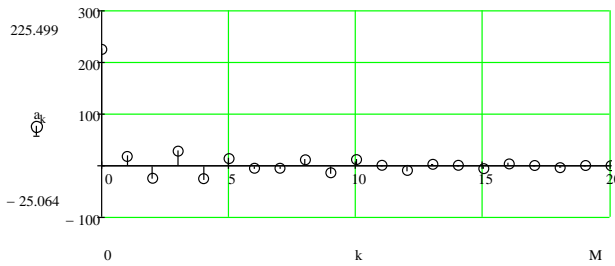


Рис. П.29. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева



а)

б)

Рис. П.30. Спектр коефіцієнтів у базисі тригонометричних функцій: а) косинусний спектр; б) синусний спектр

П.2.2. Приклади результатів розкладів одновимірних статистичних оцінок імовірнісних характеристик (математичного сподівання) процесів рельєфних утворень у ряд Чебишева

Статистичні оцінки математичного сподівання (див. рис. 6.7) та спектри коефіцієнтів їх розкладу у базисі Чебишева наведено на рисунках П.31 та П.32.

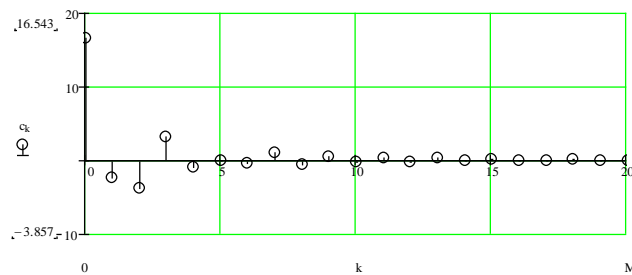


Рис. П.31. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

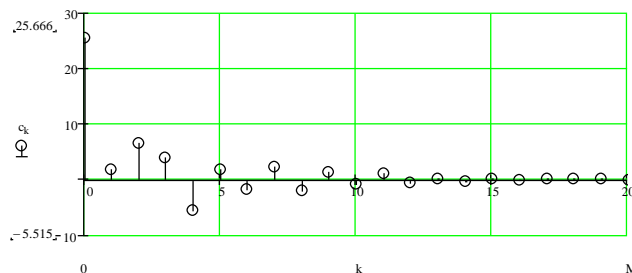


Рис. П.32. Спектр коефіцієнтів у базисі Чебишева

П.3.1. Приклад використання розкладів двовимірних статистичних оцінок імовірнісних характеристик циклічних кардіосигналів

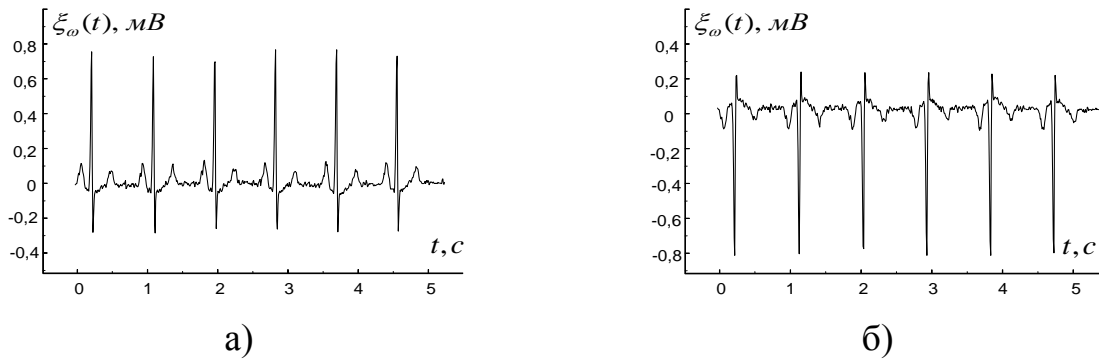


Рис. П.33. Реалізації циклічних ЕКС: а) ЕКС в II відведенні; б) ЕКС в aVR відведенні, діагноз – умовно здорова людина

На рисунку П.34 та П.35 бачимо, що значення сумісної кореляційної функції та спектральні коефіцієнти її розкладу, які відповідають ЕКС з діагнозом умовно здорової людини, локалізовані на частині двовимірної області частот – ознака циклічного сигналу в нормі.

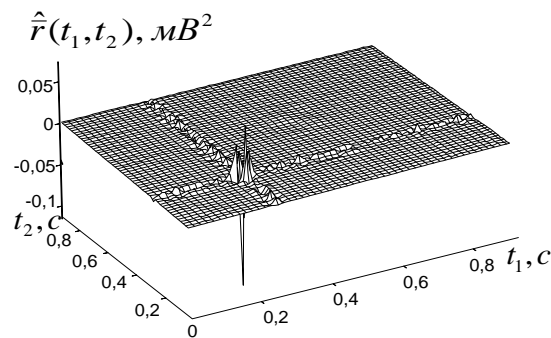


Рис. П.34. Реалізація статистичної оцінки сумісної кореляційної функції ЕКС (див. рис. П.33), діагноз – умовно здорова людина

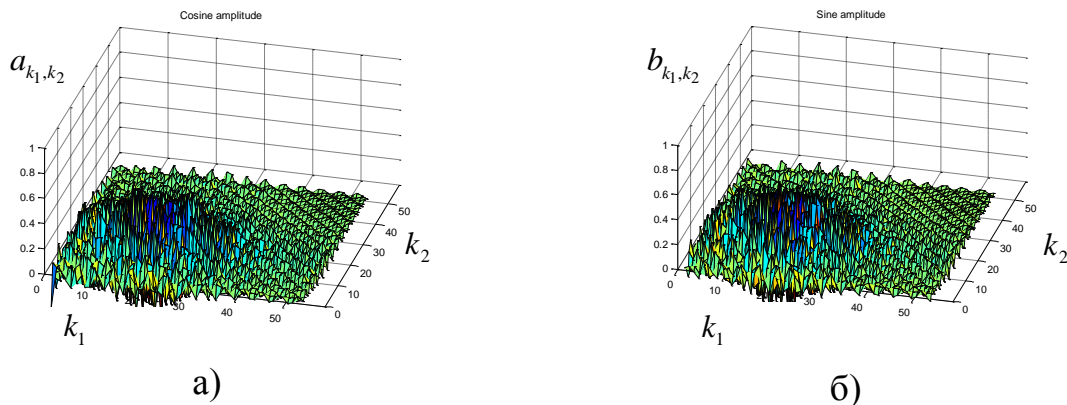


Рис. П.35. Спектри коефіцієнтів статистичної оцінки сумісної кореляційної функції в базисі тригонометричних функцій: а) косинусний спектр; б) синусний спектр, діагноз – умовно здорова людина

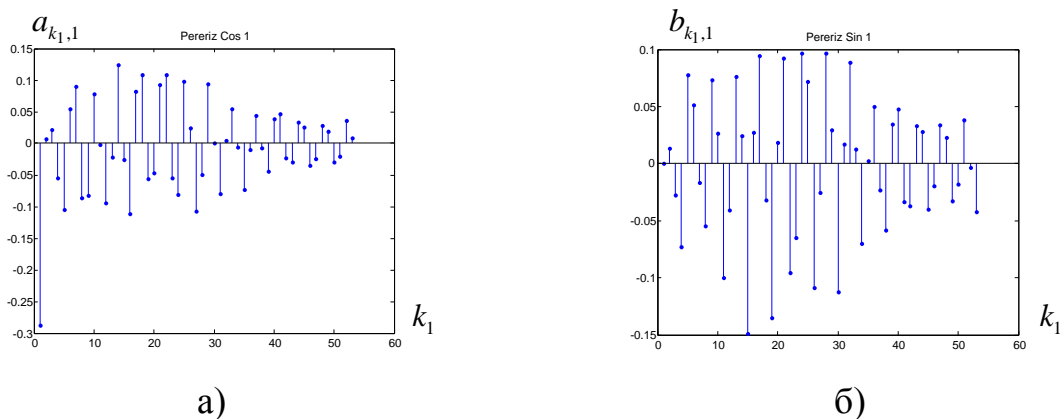


Рис. П.36. Перерізи спектрів коефіцієнтів оцінки сумісної кореляційної функції в базисі тригонометричних функцій: а) косинусний спектр; б) синусний спектр, діагноз – умовно здорова людина

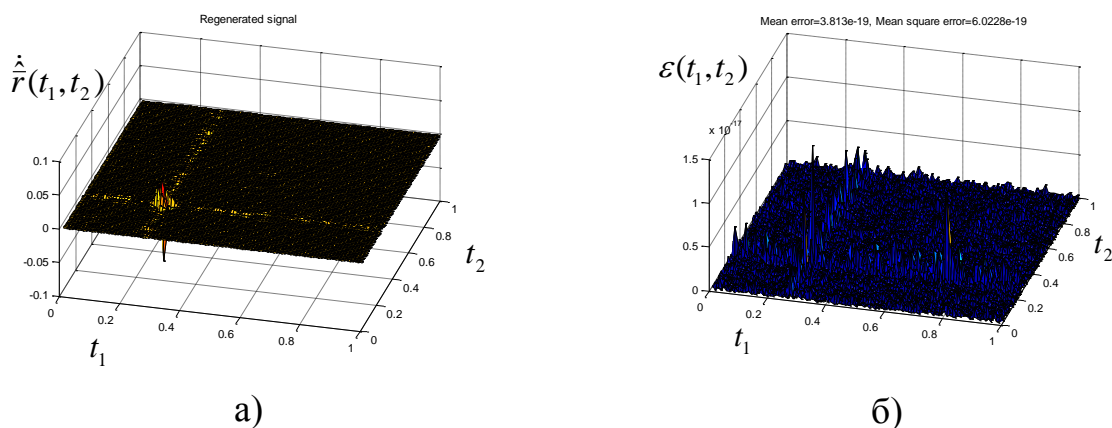


Рис. П.37. Апроксимація статистичної оцінки сумісної кореляційної функції на основі врахування спектра коефіцієнтів у базисі тригонометричних функцій та похибка апроксимації: а) апроксимація; б) похибка апроксимації, діагноз – умовно здорова людина

Проводячи аналіз графіка, наведеного на рисунку П.37, можна стверджувати про достатню точність апроксимації оцінки сумісної кореляційної функції, якщо враховувати перші 50 спектральних коефіцієнтів двовимірного ряду тригонометричних функцій. Відзначимо, що ці 50 коефіцієнтів ряду тригонометричних функцій вносять вклад енергії не менше 95% в оцінку сумісної кореляційної функції ЕКС.

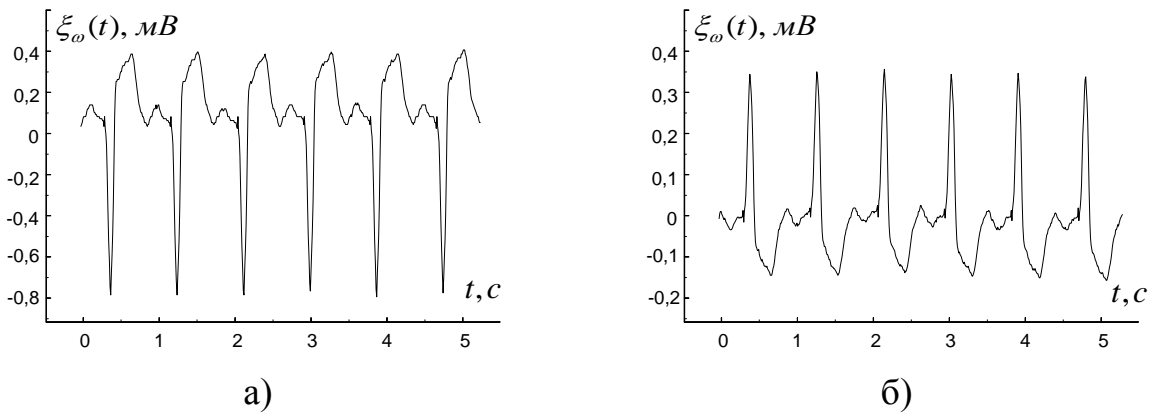


Рис. П.38. Реалізації циклічних ЕКС: а) ЕКС в II відведенні; б) ЕКС в aVR відведенні, діагноз – нижній інфаркт міокарда

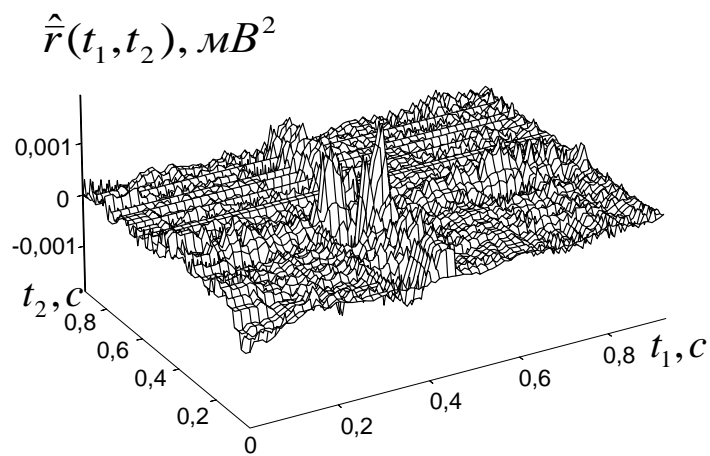


Рис. П.39. Реалізація статистичної оцінки сумісної кореляційної функції ЕКС (див. рис. П.38), діагноз – нижній інфаркт міокарда

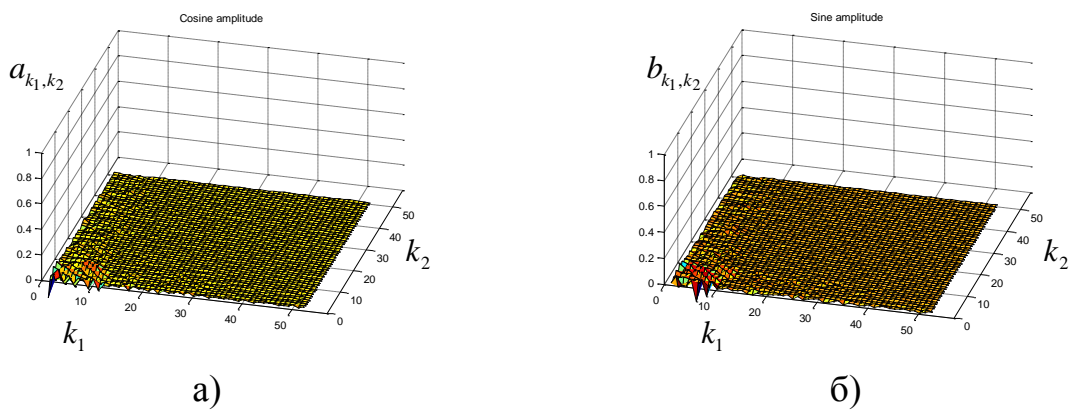


Рис. П.40. Спектри коефіцієнтів статистичної оцінки сумісної кореляційної функції в базисі тригонометричних функцій: а) косинусний спектр; б) синусний спектр, діагноз – нижній інфаркт міокарда

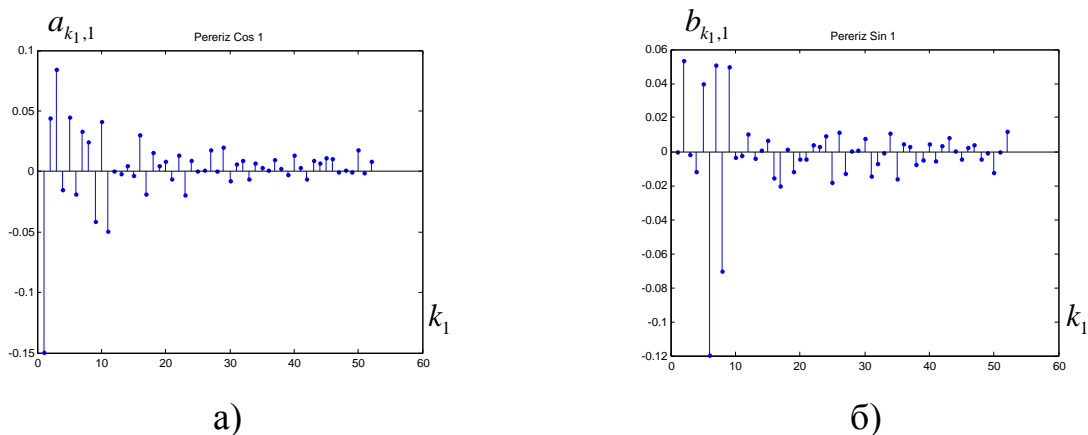


Рис. П.41. Перерізи спектрів коефіцієнтів оцінки сумісної кореляційної функції в базисі тригонометричних функцій: а) косинусний спектр; б) синусний спектр, діагноз – нижній інфаркт міокарда

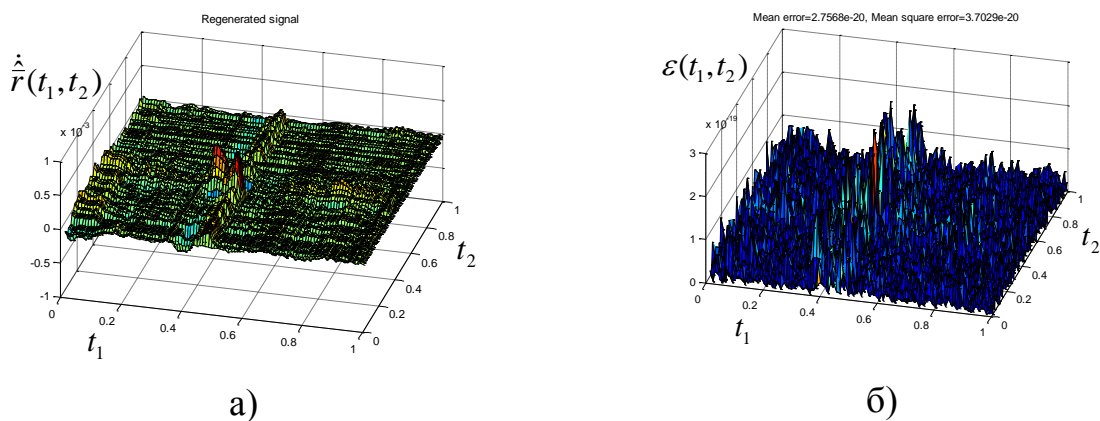


Рис. П.42. Апроксимація статистичної оцінки сумісної кореляційної функції на основі врахування спектра коефіцієнтів у базисі тригонометричних функцій та похибка апроксимації: а) апроксимація; б) похибка апроксимації, діагноз – нижній інфаркт міокарда

На рисунках П.38–П.42 наведено результати спектрального аналізу та апроксимації оцінки сумісної кореляційної функції ЕКС в II та aVR відведеннях, що відповідають патології – інфаркту міокарда. З рисунків П.39 та П.42 бачимо, що значення сумісної кореляційної функції та спектральні коефіцієнти розкладу, які відповідають патології, на відміну від коефіцієнтів, які відповідають ЕКС у нормі, локалізовані на незначній частині двовимірної області частот, а саме, на області низьких частот. Даний факт вказує на чутливість спектральних компонент

до зміни стану серцево-судинної системи, що дозволяє використовувати отримані коефіцієнти для розпізнавання станів серцево-судинної системи при використанні такого підходу в цифрових автоматизованих кардіодіагностичних комплексах.

На рисунках П.41 та П.42 наведено результати спектрального аналізу та апроксимації оцінки взаємної кореляційної оцінки ЕКС в II та aVR відведеннях. Для порівняння, якщо використовувати реалізації статистичних оцінок взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих циклічних сигналів, як діагностичних ознак, розмірність діагностичного простору буде перевищувати 3000 відділів (див. рис. П.34 та П.39). У випадку використання спектральних коефіцієнтів розкладу у ряди тригонометричних функцій, як діагностичних ознак, розмірність діагностичного простору буде дорівнювати лише 50 відділкам, що суттєво знижує вимоги до продуктивності й складності автоматизованих комп'ютерних діагностичних систем, дослідження діагностичних ознак у вигляді коефіцієнтів розкладів різних двовимірних статистичних оцінок ЕКС [292]. У роботі [168] наведено результати досліджень одновимірних статистичних оцінок, а у роботах [177, 199, 226] – двовимірних статистичних оцінок та показано підходи при побудові комп'ютерного програмного комплексу їх опрацювання.

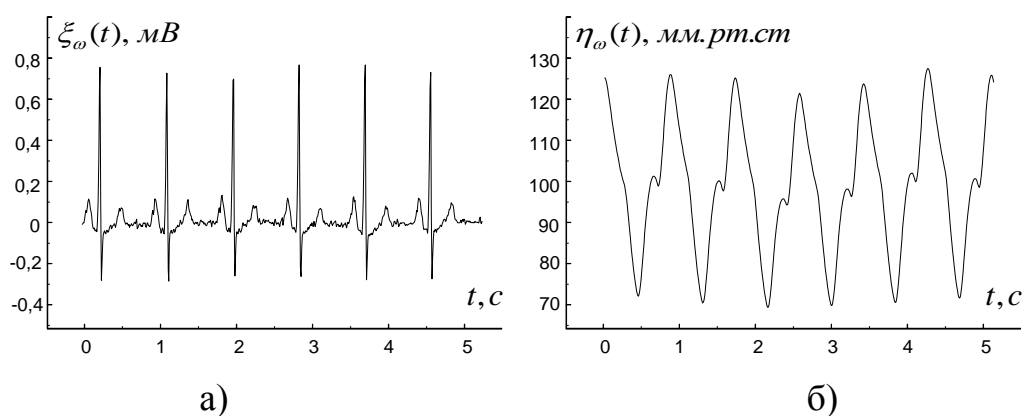


Рис. П.43. Реалізації циклічних ЕКС та сигналу артеріального тиску: а) ЕКС в II відведенні; б) сигналу артеріального тиску, діагноз – умовно здорова людина

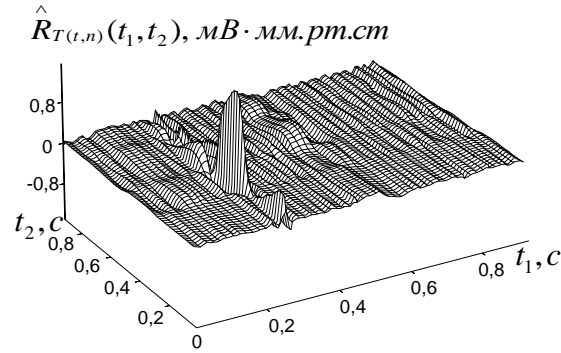


Рис. П.44. Реалізація статистичної оцінки сумісної кореляційної функції ЕКС та сигналу артеріального тиску (див. рис. П.43), діагноз – умовно здорова людина

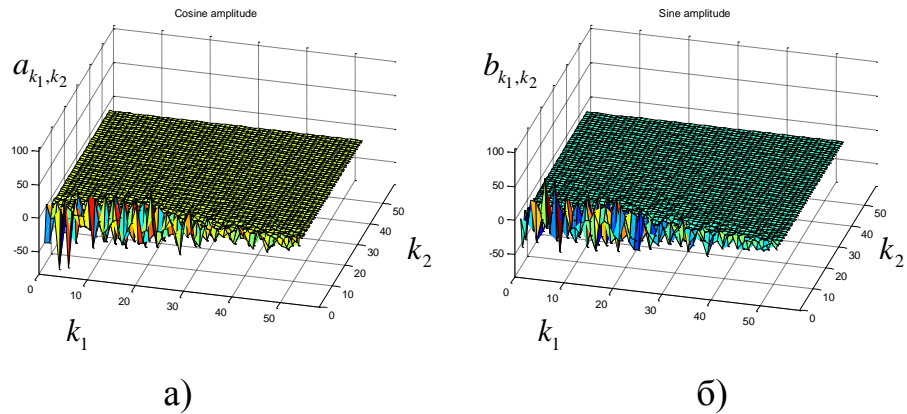


Рис. П.45. Спектри статистичної оцінки сумісної кореляційної функції в базисі тригонометричних функцій: а) косинусний спектр; б) синусний спектр, діагноз – умовно здорова людина

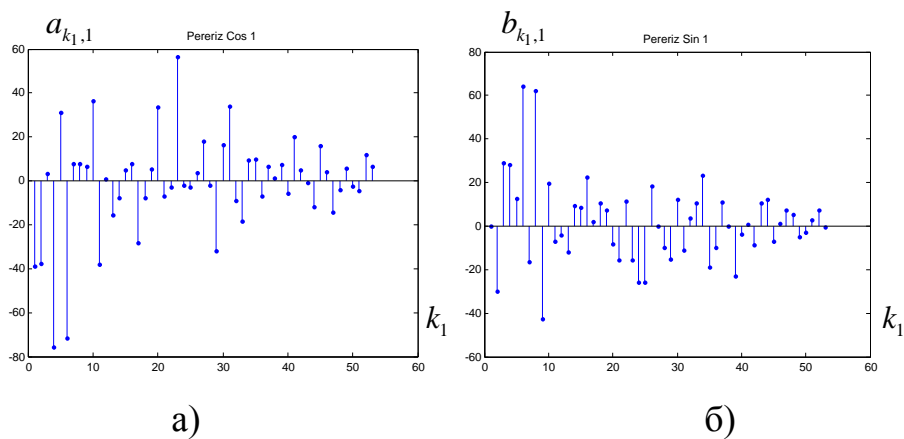


Рис. П.46. Перерізи спектрів статистичної оцінки сумісної кореляційної функції в базисі тригонометричних функцій: а) косинусний спектр; б) синусний спектр, діагноз – умовно здорова людина

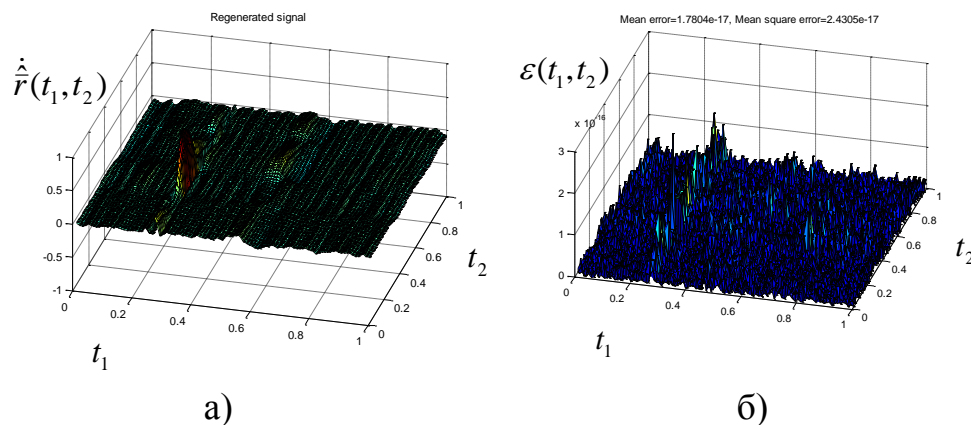


Рис. П.47. Апроксимація спектрів статистичної оцінки сумісної кореляційної функції в базисі тригонометричних функцій та похибка апроксимації: а) апроксимація; б) похибка апроксимації, діагноз – умовно здорова людина

На рисунках П.43–П.47 наведено результати спектрального аналізу та апроксимації оцінки сумісної кореляційної функції синхронно зареєстрованих ЕКС у II відведенні та сигналу артеріального тиску [177].

Додаток Р

Фрагмент програми для сегментації детермінованих циклічних сигналів

```

...
//Showmessage('Кількість відліків сегментної структури=
'+inttostr(StringGrid7.RowCount-1));
//----- формуємо масив сегментної структури для визначення циклів
for nI:=1 to StringGrid7.RowCount-1 do
  begin
    iMtmpN[nI]:=strtoint(StringGrid7.Cells[1,nI]); //номера
    rMtmpV[nI]:=strtofloat(StringGrid7.Cells[2,nI]); //відліки
    rMtmpZ[nI]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[2,iMtmpN[nI]]); //значення
  end;
//----- функція вибору відліків циклів за атрибутом //рівність значень
  CicleStr:=VidlikiCicle(rMtmpZ, rMtmpV, iMtmpN, StringGrid7.RowCount-1,
RadioGroup1.ItemIndex);
//----- формуємо масив циклічної структури
  iMtmpN:=CicleStr.NomerCicle;
  rMtmpV:=CicleStr.VidlikiCicle;
  rMtmpZ:=CicleStr.ZnachennaCicle;
//---відображення циклічної структури
//showmessage('К.-сть відліків циклів = '+ inttostr(CicleStr.CountVidlikCicle));
//showmessage('К.-сть циклів = '+ inttostr(CicleStr.CountVidlikCicle-1));
//-----
//---функція оцінки цикл структури відліки наступні мають = якщо ні то
відкидаємо відлік теж атрибут
for nI:=1 to StringGrid1.RowCount-1 do
  rMtmpZ1[nI]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[2,nI]); //значення в масив
  CicleStr:=OcinkaVidlikivCicle(rMtmpZ, rMtmpV, iMtmpN,
CicleStr.CountVidlikCicle, rMtmpZ1, StringGrid1.RowCount-1,
RadioGroup1.ItemIndex); //уточнення циклічної структури за атрибутом і порядком
//----- формуємо масив циклічної структури
  iMtmpN:=CicleStr.NomerCicle;
  rMtmpV:=CicleStr.VidlikiCicle;////
// rMtmpN:=CicleStr.NomerCicle; ///
  rMtmpZ:=CicleStr.ZnachennaCicle;
showmessage('К.-сть відліків циклів = '+ inttostr(CicleStr.CountVidlikCicle));
showmessage('К.-сть циклів = '+ inttostr(CicleStr.CountVidlikCicle-1));
//-----
Edit14.Text:=inttostr(CicleStr.CountVidlikCicle-1);
//-----
//---- вивід перевірка
// For nI:=1 to CicleStr.CountVidlikCicle do //кількість відліків циклів

```

```

//showmessage('Цикли. Відлік №= '+ inttostr(iMТmpN[nI])+' відлік=
'+floattostr(rMТmpV[nI])+' Значення= '+floattostr(rMТmpZ[nI]));
//-----
//--- формуємо масив зон по циклах із сегментної структури
// nJ:=1;
for nI:=1 to CicleStr.CountVidlikCicle-1 do
begin
nJ:=0;//01 бо зон nibi nemaе
for nK:=2 to StringGrid7.RowCount-1 do //від 2 бо 1 це відлік циклу
begin
VidlikZone1:=strtofloat(StringGrid7.Cells[2,nK]);//2-й відлік після 1 відліку
циклу
VidlikZone1N:=strtoint(StringGrid7.Cells[1,nK]);//2-й номер після 1 номера
відліку циклу
//showmessage('цикл= '+inttostr(nI)+' відліків зон = '+floattostr(VidlikZone1)+' vidl1
'+floattostr(rMТmpV[nI])+' vidl2 '+floattostr(rMТmpV[nI+1]) );
if (VidlikZone1>rMТmpV[nI])and(VidlikZone1<rMТmpV[nI+1]) then //в циклі
begin
rMMТmpV1[nI,nJ]:=VidlikZone1;//відліки
iMMТmpN1[nI,nJ]:=VidlikZone1N;//номера
//showmessage('Цикл = '+inttostr(nI)+' № відлік зони =
'+inttostr(iMMТmpN1[nI,nJ]));
rMMТmpZ1[nI,nJ]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[2,VidlikZone1N]); //значення
nJ:=nJ+1;//kilk vidlikiv zon
// showmessage('цикл= '+inttostr(nI)+' відліків зон = '+floattostr(rMMТmpZ1[nI,nJ-
1])+' vidl1 '+floattostr(rMТmpV[nI])+' vidl2 '+floattostr(rMТmpV[nI+1]) );
end
else
begin //за циклом
if nI<>CicleStr.CountVidlikCicle-1 then
begin
iMТmpZ[nI]:=nJ; //к.-сть відліків зон на nI циклі
// showmessage('цикл= '+inttostr(nI)+' відліків зон = '+inttostr(iMТmpZ[nI]));
end
else iMТmpZ[nI]:=nJ-1;// коли відлік циклу = відліку циклу останньому то
nJ=nJ+1
// nJ:=1;
end;
end;//nK
showmessage('цикл= '+inttostr(nI)+' відліків зон = '+inttostr(iMТmpZ[nI]));
end;
sТmp:=";
for nI:=1 to CicleStr.CountVidlikCicle-1 do //циклів =-1 4 цикла
begin
//showmessage(' відлік зони = '+inttostr(iMТmpZ[nI]));

```

```

for nJ:=1 to iMtmpZ[nI] do //кількість відліків зон
begin
  sTmp:=sTmp+floattostr(rMMtmpV1[nI,nJ])+ ' ';
end;
//showmessage('Цикл = '+inttostr(nI)+' відлік зони = '+sTmp+#10#13);
//sTmp:=sTmp+#10#13;
end;
//-----
//----- оцінка кількості зон-----
Edit15.Text:=inttostr(iMtmpZ[1]+1);//якщо рівно відліків а зон+1
// iMMtmpN1 номерра
//-----
//----- Оцінка OcinkaVidlikivZone структури -----
MatrixSpivNeSpiv:=Atribut2(rMMtmpZ1, iMMtmpN1, iMtmpZ,
CicleStr.CountVidlikCicle-
1,RadioGroup1.ItemIndex);//:TMySegmentZoneSpivNeSpiv;//foemuvannastructuri
matrix-s
sTmp:="";
For nK:=1 to CicleStr.CountVidlikCicle-1 do //кількість циклів
begin
  For nJ:=1 to iMtmpZ[nK] do //кількість відліків зон
begin
  For nI:=1 to CicleStr.CountVidlikCicle-1 do //кількість циклів
begin
//      sTmp:=inttostr(MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneSpivpalo[nI,nJ]);
sTmp:=inttostr(MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]);
//      showmessage('Matrix spivpadinna/nspivpadinna cicl = '+inttostr(nI)+' spivpali
зони = '+sTmp+#10#13);
end;
//      sTmp:=sTmp+#10#13;
sTmp:="";
end;//nJ
end;//nK
//-----
//----- формуємо таблицю для СС і уточнених відліків -----
for nJ:=1 to StringGrid7.RowCount-1 do
begin
//showmessage('відлік= '+StringGrid7.Cells[1,nJ]+' значення=
'+StringGrid1.Cells[2,strtoint(StringGrid7.Cells[1,nJ]));
StringGrid4.Cells[0,nJ]:=StringGrid7.Cells[0,nJ]; //№
StringGrid4.Cells[1,nJ]:=StringGrid7.Cells[1,nJ]; //№ відліка
StringGrid4.Cells[2,nJ]:=StringGrid1.Cells[1,strtoint(StringGrid7.Cells[1,nJ])]; //відлік
StringGrid4.Cells[3,nJ]:=StringGrid1.Cells[2,strtoint(StringGrid7.Cells[1,nJ])];
//значення
StringGrid4.RowCount:=StringGrid4.RowCount+1;

```

```

end;
StringGrid4.RowCount:=StringGrid4.RowCount-1;
//-----
//----- уточнюємо і пишемо в таблицю уточнення -----
for nI:=1 to CicleStr.CountVidlikCicle-1 do //циклів =-1 4 цикла
begin
for nJ:=1 to iMtmpZ[nI] do //кількість відліків зон
begin
if MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]<>0 then
//уточнюємо відлік
begin
//-----формуємо масив відліків для уточнення
//----- відлік перший
if
MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]=CicleStr.VidlikiCicle[1]
then//1-й відлік 1 циклу |->
begin
for nK:=1 to strtoint(Edit3.Text) do
begin
iMtmpZ[nK]:=MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]+nK;
Vidlik1:=MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]+nK;
//showmessage('|-> = '+floattostr(Vidlik1)); //417--- 418 419 420 //чи брати 417
rMtmpZ[nK]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[2,Vidlik1]);
end;
kilkTochok:=strtoint(Edit3.Text);
end
else //----- відлік останній
if
MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]=CicleStr.VidlikiCicle[Ci
cleStr.CountVidlikCicle]then //останній відлік останнього циклу
begin
for nK:=1 to strtoint(Edit3.Text) do
begin
iMtmpZ[nK]:=MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]-nK;
Vidlik1:=MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]-nK;
//showmessage('<-| = '+floattostr(Vidlik1)); //417--- 416 415 414
rMtmpZ[nK]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[2,Vidlik1]);
end;
kilkTochok:=strtoint(Edit3.Text);
end
else
begin
for nK:=1 to strtoint(Edit3.Text) do
begin
iMtmpZ[nK]:=MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]-nK;

```



```

    Vidlik1:=MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]-nK;
//showmessage('+=' +floattostr(Vidlik1)); //417--- 416 415 414
    rMTmpZ[nK]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[2,Vidlik1]);
    end;
    nTmpK:=strtoint(Edit3.Text);
    for nK:=1 to strtoint(Edit3.Text) do
        begin
iMTmpZ[nTmpK+nK]:=MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]
+nK;
Vidlik1:=MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ]+nK;
//showmessage('-=' +floattostr(Vidlik1)); //417--- 418 419 420
            rMTmpZ[nTmpK+nK]:=strtofloat(StringGrid1.Cells[2,Vidlik1]);
            end;
            kilkTochok:=nTmpK+nTmpK;//+1;
// showmessage('Точок уточнення '+floattostr(kilkTochok)); //3+3
        end;//begin
VidlikdlaUtoch:=MatrixSpivNeSpiv.ZnachennaVidlikyZoneNESpivpalo[nI,nJ];
    end;//if
    end; //nJ
    Vidlik:=UtochnennaVidlika(rMTmpZ, iMTmpZ, kilkTochok,
RadioGroup2.ItemIndex, rMMTmpZ1[nI,1]);
    for nL:=1 to StringGrid4.RowCount-1 do
        if VidlikdlaUtoch=strtoint(StringGrid4.Cells[1,nL]) then
            begin
                StringGrid4.Cells[4,nL]:=inttostr(Vidlik);///№ відліка уточн
                StringGrid4.Cells[5,nL]:=StringGrid1.Cells[1,Vidlik]; //відлік уточн
                StringGrid4.Cells[6,nL]:=StringGrid1.Cells[2,Vidlik]; //значення уточн
            end;
        end;//nL
//----- побудова циклічної структури -----
if CheckBox11.Checked then //будувати циклічну структуру
    for nJ:=1 to CicleStr.CountVidlikCicle do
        begin
            MySeries1:=TLineSeries.Create( Self );
            if CheckBox6.Checked then
                begin
                    //№
                    MySeries1.AddXY(CicleStr.NomerCicle[nJ],0,",clMaroon);
MySeries1.AddXY(CicleStr.NomerCicle[nJ],strtoint(Edit12.Text),"clMaroon);
                    MySeries1.AddXY(CicleStr.NomerCicle[nJ],-strtoint(Edit12.Text),"clMaroon);
                    MySeries1.AddXY(CicleStr.NomerCicle[nJ],0,"clMaroon);
                end
            end
        end
    end
    ...

```

Додаток С

Фрагмент програми для сегментації стохастичних циклічних сигналів

Основна програма

```

...
for nJ:=MaxInd[nI] to MaxInd[nI+1] do
begin
//   Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[1,nJ]);
   Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[0,nJ]);
   Znachenna_[nK]:=strtofloat(StringGrid10.Cells[2,nJ]);
   nK:=nK+1;
end;
//Showmessage('kilk -2 '+floattostr(nK-2));
//Showmessage('kilk 2-1 '+floattostr(MaxInd[nI+1]-MaxInd[nI]));
   MinTmp:=MinValueIndex(Znachenna_, Index_, nK-2);
   MinZnach:=MinTmp.ZnachMin;//masiv //znachenna min
   MinNum:=MinTmp.CountMin;//nomer index=>t
   MinInd[nI+1]:=MinZnach;//ytocneniq min
//Showmessage('min № '+inttostr(nI+1)+' min '+floattostr(MinInd[nI+1]));
end;//nI
//-----
for nI:=1 to nNMinInd-1 do
begin
   nK:=1;
//Showmessage('min1 '+floattostr(MinInd[nI])+' min2 '+floattostr(MinInd[nI+1]));
for nJ:=MinInd[nI] to MinInd[nI+1] do
begin
//   Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[1,nJ]);
   Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[0,nJ]);
   Znachenna_[nK]:=strtofloat(StringGrid10.Cells[2,nJ]);
   nK:=nK+1;
end;
//Showmessage('kilk -2 '+floattostr(nK-2));
   MaxTmp:=MaxValueIndex(Znachenna_, Index_, nK-2);
   MaxZnach:=MaxTmp.ZnachMax;//masiv //znachenna min
   MaxNum:=MaxTmp.CountMax;//nomer index=>t
   MaxInd[nI]:=MaxZnach;//ytocnenna
//Showmessage('max № '+inttostr(nI)+' min '+floattostr(MaxInd[nI]));
end;//nI
//-----
   nK:=1;
//Showmessage('min   ost   '+floattostr(MinInd[nNMinInd])+'   max   kinec
'+floattostr(StringGrid10.RowCount-1));
for nJ:=MinInd[nNMinInd] to StringGrid10.RowCount-1 do

```

```

begin
//   Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[1,nJ]);
   Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[0,nJ]);
   Znachenna_[nK]:=strtofloat(StringGrid10.Cells[2,nJ]);
   nK:=nK+1;
end;
//Showmessage('kilk '+floattostr(nK-1));
   MaxTmp:=MaxValueIndex(Znachenna_, Index_, nK-1);
   MaxZnach:=MaxTmp.ZnachMax;//masiv //znachenna min
   MaxNum:=MaxTmp.CountMax;//nomer index=>t
   MaxInd[nNMaxInd]:=MaxZnach;//ytcnenna max
//Showmessage('max      ostan      '+inttostr(nNMaxInd)+'      max
'+floattostr(MaxInd[nNMaxInd]));
//-----
   end
   else // MaxInd[1]<MinInd[1] pershiq max
   begin
//-----
       for nI:=1 to nNMaxInd-1 do
       begin
           nK:=1;
//Showmessage('max1 '+floattostr(MaxInd[nI])+ ' max2 '+floattostr(MaxInd[nI+1]));
           for nJ:=MaxInd[nI] to MaxInd[nI+1] do
           begin
//           Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[1,nJ]);
               Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[0,nJ]);
               Znachenna_[nK]:=strtofloat(StringGrid10.Cells[2,nJ]);
               nK:=nK+1;
           end;
//Showmessage('kilk '+floattostr(nK-2));
               MinTmp:=MinValueIndex(Znachenna_, Index_, nK-2);
               MinZnach:=MinTmp.ZnachMin;//masiv //znachenna min
               MinNum:=MinTmp.CountMin;//nomer index=>t
               MinInd[nI]:=MinZnach;//ytcneniq min
           end;//nI
//-----
               nK:=1;
//Showmessage('max      ost      '+floattostr(MaxInd[nNMaxInd])+ '      max      kinec
'+floattostr(StringGrid10.RowCount-1));
               for nJ:=MaxInd[nNMaxInd] to StringGrid10.RowCount-1 do
               begin
//           Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[1,nJ]);
                   Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[0,nJ]);
                   Znachenna_[nK]:=strtofloat(StringGrid10.Cells[2,nJ]);
                   nK:=nK+1;

```

```

    end;
//Showmessage('kilk '+floattostr(nK-1));
    MinTmp:=MinValueIndex(Znachenna_, Index_, nK-1);
    MinZnach:=MinTmp.ZnachMin;//masiv //znachenna min
    MinNum:=MinTmp.CountMin;//nomer index=>t
    MinInd[nNMinInd]:=MinZnach;//ytocnenna min
//-----
    nK:=1;
//Showmessage('vid 1 do min 1 '+floattostr(MinInd[1]));
    for nJ:=1 to MinInd[1] do
        begin
//      Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[1,nJ]);
//      Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[0,nJ]);
//      Znachenna_[nK]:=strtofloat(StringGrid10.Cells[2,nJ]);
//      nK:=nK+1;
        end;
//Showmessage('kilk '+floattostr(nK-1));
    MaxTmp:=MaxValueIndex(Znachenna_, Index_, nK-1);
    MaxZnach:=MaxTmp.ZnachMax;//masiv //znachenna min
    MaxNum:=MaxTmp.CountMax;//nomer index=>t
    MaxInd[1]:=MaxZnach;//ytocnenna max
//-----
    for nI:=1 to nNMinInd-1 do //ytocnenna maximumivv koli ytochneni minimumi
        begin
            nK:=1;
//Showmessage('min1 '+floattostr(MinInd[nI])+' min2 '+floattostr(MinInd[nI+1]));
            for nJ:=MinInd[nI] to MinInd[nI+1] do
                begin
//      Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[1,nJ]);
//      Index_[nK]:=strtoint(StringGrid10.Cells[0,nJ]);
//      Znachenna_[nK]:=strtofloat(StringGrid10.Cells[2,nJ]);
//      nK:=nK+1;
                end;
//Showmessage('kilk '+floattostr(nK-2));
            MaxTmp:=MaxValueIndex(Znachenna_, Index_, nK-2);
            MaxZnach:=MaxTmp.ZnachMax;//masiv //znachenna min
            MaxNum:=MaxTmp.CountMax;//nomer index=>t
            MaxInd[nI+1]:=MaxZnach;//ytocnenna max
            end;//nI
//-----
        end;//else
    end;//if checkbox
//-----
if CheckBox30.Checked then
    begin

```

```

//showmessage('vidobragenna ytochnenna');
//Showmessage('kilk min'+floattostr(nNMinInd)+' kilk max '+floattostr(nNMaxInd));
  for nJ:=1 to nNMinInd do
    begin
      MySeries2:=TLineSeries.Create( Self);
      MySeries2.linepen.width:=2;
//    MySeries2.LinePen.Style:=psDashDotDot;
{    Pointer.
      LinePen.
{    0: Canvas.Pen.Style := psSolid;
LinePen.Style:=:= psDot;
      1: Canvas.Pen.Style := psDash;
      2: Canvas.Pen.Style := psDot;
      3: Canvas.Pen.Style := psDashDot;
      4: Canvas.Pen.Style := psDashDotDot;
      HorizSize:=3; //діаметр точок
      MySeries2.Pointer.VertSize:=3; } //діаметр точок
      if checkbox16.checked then
        begin
          MySeries2.AddXY(MinInd[nJ],0,",clPurple  );
          MySeries2.AddXY(MinInd[nJ],strtoint(Edit18.Text)+45,",clPurple  );
          MySeries2.AddXY(MinInd[nJ],-strtoint(Edit18.Text)+45,",clPurple  );
          MySeries2.AddXY(MinInd[nJ],0,",clPurple  );
        end
      else
        begin
          //тут по відліках
          MySeries2.AddXY(strtofloat(StringGrid10.Cells[1,MinInd[nJ]]),0,",clPurple  );
          MySeries2.AddXY(strtofloat(StringGrid10.Cells[1,MinInd[nJ]]),strtoint(Edit18.Text)+
          45,",clPurple  );
          MySeries2.AddXY(strtofloat(StringGrid10.Cells[1,MinInd[nJ]]),-
          strtoint(Edit18.Text)+45,",clPurple  );
          MySeries2.AddXY(strtofloat(StringGrid10.Cells[1,MinInd[nJ]]),0,",clPurple  );
        end;
      MySeries2.ParentChart:=Chart1;
    end;
  for nJ:=1 to nNMaxInd do
    begin
      MySeries2:=TLineSeries.Create( Self );
      MySeries2.linepen.width:=2;
//    MySeries2.LinePen.Style:=psDot;
      begin
        if checkbox16.checked then
          begin
            MySeries2.AddXY(MaxInd[nJ],0,",clLime);
            MySeries2.AddXY(MaxInd[nJ],strtoint(Edit18.Text)+45,",clLime);
          end
        else
          begin
            MySeries2.AddXY(MaxInd[nJ],0,",clLime);
            MySeries2.AddXY(MaxInd[nJ],strtoint(Edit18.Text)+45,",clLime);
          end
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

    MySeries2.AddXY(MaxInd[nJ],-strtoint(Edit18.Text)+45,"clLime);
    MySeries2.AddXY(MaxInd[nJ],0,"clLime);
end
else
begin
    MySeries2.AddXY(strtfloat(StringGrid10.Cells[1,MaxInd[nJ]]),0,"clLime);
MySeries2.AddXY(strtfloat(StringGrid10.Cells[1,MaxInd[nJ]]),strtoint(Edit18.Text)+
45,"clLime);
    MySeries2.AddXY(strtfloat(StringGrid10.Cells[1,MaxInd[nJ]]),-
strtoint(Edit18.Text)+45,"clLime);
    MySeries2.AddXY(strtfloat(StringGrid10.Cells[1,MaxInd[nJ]]),0,"clLime);
end;
end;
MySeries2.ParentChart:=Chart1;
end;
end;
//-----
//===== сегментна структура
//=== сортування отриманих min та max === об'єднання (кінцевий)
//===== очистка =====
for nJ:=0 to 2 do //к.-сть стовбців
    StringGrid11.Cols[nJ].Clear;
StringGrid11.RowCount:=2;
//=====
StringGrid11.Cells[0,0]:='№';
StringGrid11.Cells[1,0]:='Відлік №';
StringGrid11.Cells[2,0]:='Відлік Відлік';
//=====
nI:=1;
nL:=1;
nK:=1;
for nJ:=1 to StringGrid10.RowCount-1 do
begin
    If MaxInd[nI]=nJ then
begin
    StringGrid11.Cells[0,nK]:=floattostr(nK);

    {if CheckBox31.Checked then StringGrid11.Cells[1,nK]:=floattostr(MaxInd[nI])
else StringGrid11.Cells[1,nK]:=StringGrid10.Cells[1, MaxInd[nI]];
}
StringGrid11.Cells[1,nK]:=floattostr(MaxInd[nI]);//Відлік №
StringGrid11.Cells[2,nK]:=StringGrid10.Cells[1,MaxInd[nI]];//Відлік Відлік
StringGrid11.RowCount:=StringGrid11.RowCount+1;
nI:=nI+1;
nK:=nK+1;

```

```

end;
If MinInd[nL]=nJ then
begin
StringGrid11.Cells[0,nK]:=floattostr(nK);
{if CheckBox31.Checked then StringGrid11.Cells[1,nK]:=floattostr(MinInd[nL])
else StringGrid11.Cells[1,nK]:=StringGrid10.Cells[1, MinInd[nL]];
}
StringGrid11.Cells[1,nK]:=floattostr(MinInd[nL]);
StringGrid11.Cells[2,nK]:=StringGrid10.Cells[1,MinInd[nL]];
StringGrid11.RowCount:=StringGrid11.RowCount+1;
nL:=nL+1;
nK:=nK+1;
end;
end;//nJ
//=====
StringGrid11.RowCount:=StringGrid11.RowCount-1;
// Showmessage('nk='+floattostr(nK-1)); //16
// Showmessage('row='+floattostr(StringGrid11.RowCount)); //17
//-----
ProgressBar1.Position:=0;
PageControl1.ActivePageIndex:=1;
end
else
begin
MessageDlg(' Немає даних ', mtInformation,
[mbOk], 0);
PageControl1.SetFocus;
PageControl1.ActivePageIndex:=3;
end;
end;
//-----
...

```

Додаток Т

Фрагмент програми для оцінювання ритмічної структури циклічного сигналу

Основна програма

```

...
procedure TMainForm.BitBtn14Click(Sender: TObject);
var nI,nJ,nTmp:integer;
rTmpZnach1,rTmpZnach2,rTmpVidlik1,rTmpVidlik2:real;
rTmp,rTmp1, yTmp,A0,A1,A2:real;
iTmp:integer;
KolZnachFR:integer;
kk,bb,poh, npohner:real;
//MySeries1: TLineSeries; //TCircledSeries;
//MySeries2:TPointSeries;
j, m: integer;
a, b, c, d, h: VECTOR; //array[1..200] of real;
AA: MATRIX; //array[1..200, 1..200] of real;
bb1: VECTOR; //array[1..200] of real;
X,Y:mas;//array[0..1000] of real;
begin
if StringGrid2.Cells[1,1]<>" then
begin
//===== очистка =====
{ for nJ:=0 to 5 do //к.-сть стовбців
StringGrid5.Cols[nJ].Clear;
// StringGrid5.RowCount:=2;
//=====}
StringGrid5.RowCount:=2;
CheckBox45.Checked
//===== очистка =====
for nJ:=0 to 2 do //к.-сть стовбців
StringGrid8.Cols[nJ].Clear;
StringGrid8.RowCount:=2;
//=====
StringGrid8.Cells[0,0]:='№';
StringGrid8.Cells[1,0]:='Відлік';
StringGrid8.Cells[2,0]:='Значення';
if CheckBox45.Checked then //формування в таблиці або номерів відліків або
номерів циклів і зон
begin
StringGrid5.Cells[0,0]:='№';
StringGrid5.Cells[1,0]:='Відліки';
for nI:=1 to StringGrid2.RowCount-1 do //Відліки

```



```

begin
  StringGrid5.Cells[0,nI]:=floattostr(nI);
  StringGrid5.Cells[1,nI]:=StringGrid2.Cells[1,nI];
  StringGrid5.RowCount:=StringGrid5.RowCount+1;
end;
end
else
begin
  StringGrid5.Cells[0,0]:='Цикли';
  StringGrid5.Cells[1,0]:='Зони';
  //===== Заповнюємо табл. Зони, Цикли 1,2,...=====
  nTmp:=0;//номер 1,2,...
  for nI:=1 to strtoint(Edit3.Text) do //Цикли
  begin
    for nJ:=1 to strtoint(Edit4.Text) do //Зони
    begin
      StringGrid5.Cells[0,nJ+nTmp]:=floattostr(nI);//номер цикла
      StringGrid5.Cells[1,nJ+nTmp]:=floattostr(nJ);//відлік/зараз номер зони
      StringGrid5.RowCount:=StringGrid5.RowCount+1;
    end;
    nTmp:=nTmp+strtoint(Edit4.Text);
  end;
  //=====
end;
StringGrid5.RowCount:=StringGrid5.RowCount-1;/
//Showmessage('кільк. знач. ФР =' + IntToStr(iKolZnachenFR)); //25 зон 5 циклів 5
(має бути 26 + одна наступна зона)
//Showmessage('кільк. знач. ФР-1 =' + IntToStr(iKolZnachenFR-1)); //24
//===== Обрахунок К В С ...=====
case ComboBox1.ItemIndex of
-1: begin
  //showmessage('liniqna');
  KolZnachFR:=iKolZnachenFR-1;
  StringGrid5.Cells[2,0]:='Коеф. К';
  StringGrid5.Cells[3,0]:='Коеф. В';
end;
0: begin
  //showmessage('liniqna');
  KolZnachFR:=iKolZnachenFR-1;//-1 бо бере i+1
  StringGrid5.Cells[2,0]:='Коеф. К';
  StringGrid5.Cells[3,0]:='Коеф. В';
end;
1: begin
  // showmessage('kvadratischna');
  KolZnachFR:=iKolZnachenFR-2; //для метода -2 бо бере i+2

```

```

StringGrid5.Cells[2,0]:='Коеф. C';
StringGrid5.Cells[3,0]:='Коеф. B';
StringGrid5.Cells[4,0]:='Коеф. A';
StringGrid5.Cells[5,0]:='T` (t,n)';
end;
2: begin
  // showmessage('kybuch spline');
  KolZnachFR:=iKolZnachenFR-1; //для метода -1 //7-1=6
  StringGrid5.Cells[2,0]:='Коеф. A';
  StringGrid5.Cells[3,0]:='Коеф. B';
  StringGrid5.Cells[4,0]:='Коеф. C';
  StringGrid5.Cells[5,0]:='Коеф. D';
  //-----визначення коефіцієнтів-----
  m:=KolZnachFR+1;//StringGrid2.RowCount-1;//7
  //-----завантаження даних-----
  for nJ:=0 to m-1 do
    begin
      X[nJ]:=StrToFloat(StringGrid2.Cells[1, nJ+1]);
      Y[nJ]:=StrToFloat(StringGrid2.Cells[2, nJ+1]);
    end;
  //-----
  for nJ:=1 to m do
    begin
      for j:=1 to m do
        AA[nJ, j]:=0;
        bb1[nJ]:=0;
        a[nJ]:=Y[nJ-1];
        StringGrid5.Cells[2,nJ]:=floattostr(a[nJ]);
        h[nJ]:=X[nJ]-X[nJ-1];
      end;//nJ
      AA[1, 1]:=1;
      AA[m, m]:=1;
      for nJ:=2 to m-1 do
        begin
          AA[nJ, nJ]:= 2*(h[nJ-1]+h[nJ]);
          AA[nJ, nJ-1]:=h[nJ-1];
          AA[nJ, nJ+1]:=h[nJ];
          bb1[nJ]:=3*((Y[nJ+1]-Y[nJ])/h[nJ]-(Y[nJ]-Y[nJ-1])/h[nJ-1]);
        end;
      //===== Побудова Графіка =====
      //MySeries1:=TLineSeries.Create( Self );
      //MySeries2:=TPointSeries.Create( Self );
      //MySeries2.Pointer.Style:=psCircle; //тип кривої
      //MySeries2.Pointer.HorizSize:=2; //діаметр точок
      //MySeries2.Pointer.VertSize:=2; //діаметр точок
    end;
  end;
end;

```

```

ProgressBar1.Max:=KolZnachFR;
iTmp:=0;
nTmp:=0;
for nI:=1 to KolZnachFR do
begin
  rTmp:=strtofloat(StringGrid2.Cells[1,nI]); //відліки
  StringGrid8.Cells[0,nI+nTmp]:=FloatToStr(nI+nTmp);//номер
  StringGrid8.Cells[1,nI+iTmp]:=FloatToStr(rTmp);//x = rTmp
  ProgressBar1.Position:=nI;
  case ComboBox1.ItemIndex of //dla pershogo znachenna
  -1: begin
    //showmessage('liniqna'); //k //b
    yTmp:=strtofloat(StringGrid5.Cells[2,nI])*rTmp+strtofloat(StringGrid5.Cells[3,nI]);
    end;
  0: begin
    //showmessage('liniqna'); //k //b
    yTmp:=strtofloat(StringGrid5.Cells[2,nI])*rTmp+strtofloat(StringGrid5.Cells[3,nI]);
    end;
  1: begin
    //showmessage('kvadraticzna');
    yTmp:=strtofloat(StringGrid5.Cells[4,nI])*sqr(rTmp)+ //a
    strtofloat(StringGrid5.Cells[3,nI])*rTmp+ //b
    strtofloat(StringGrid5.Cells[2,nI]); //c
    end;
  2: begin
    // showmessage('kybuch spline');
    rTmp1:=0; //брати відлік 0 щоб після визначення уTmp=y з таблиці (вузлова
точка)
    yTmp:=strtofloat(StringGrid5.Cells[5,nI])*(rTmp1*rTmp1*rTmp1)+ //d
    strtofloat(StringGrid5.Cells[4,nI])*(rTmp1*rTmp1)+ //c
    strtofloat(StringGrid5.Cells[3,nI])*rTmp1+ //b
    strtofloat(StringGrid5.Cells[2,nI]); //a
    end;//2
  end;//case
  StringGrid8.Cells[2,nI+iTmp]:=FloatToStr(Okrugl(yTmp)); //y = yTmp
  // MySeries1.AddXY(rTmp,yTmp,",clBlue); //вузлові точки
  repeat
  //----- округл(відлік ФР+0,1)
  rTmp:=Okrugl(rTmp+strtofloat(Edit5.Text));
  nTmp:=nTmp+1;
  case ComboBox1.ItemIndex of
  -1: begin
    //showmessage('liniqna');
    yTmp:=strtofloat(StringGrid5.Cells[2,nI])*rTmp+strtofloat(StringGrid5.Cells[3,nI]);
    end;

```

```

0: begin
  //showmessage('liniqna');
yTmp:=strtofloat(StringGrid5.Cells[2,nI])*rTmp+strtofloat(StringGrid5.Cells[3,nI]);
  end;
1: begin
  //showmessage('kvadraticzna');
  yTmp:=strtofloat(StringGrid5.Cells[4,nI])*sqr(rTmp)+
    strtofloat(StringGrid5.Cells[3,nI])*rTmp+
    strtofloat(StringGrid5.Cells[2,nI]);
  end;
2: begin
  // showmessage('kybuch spline');
  // rTmp і rTmp1 використати
poh:=3*strtofloat(StringGrid5.Cells[5,nI])*sqr(strtofloat(StringGrid2.Cells[1,nI]))+//По
хідна 3dx*x+2cx+b
2*strtofloat(StringGrid5.Cells[4,nI])*strtofloat(StringGrid2.Cells[1,nI])+strtofloat(Strin
gGrid5.Cells[3,nI]);
  if
(strtofloat(StringGrid5.Cells[5,nI])=0)and(strtofloat(StringGrid5.Cells[4,nI])=0) then
//лінійна коеф. d=c=0
  begin
    //k //b
yTmp:=strtofloat(StringGrid5.Cells[2,nI])*rTmp+strtofloat(StringGrid5.Cells[3,nI]);
  end
  else
  begin
    rTmp1:=Okrugl(rTmp-strtofloat(StringGrid2.Cells[1,nI])); //1,1-1=0,1
    yTmp:=strtofloat(StringGrid5.Cells[5,nI])*(rTmp1*rTmp1*rTmp1)+ //d
    strtofloat(StringGrid5.Cells[4,nI])*(rTmp1*rTmp1)+ //c
    strtofloat(StringGrid5.Cells[3,nI])*rTmp1+ //b
    strtofloat(StringGrid5.Cells[2,nI]); //a
  end;
  if CheckBox47.Checked then //для відображення точок (вузлові точки) в
яких не виконалась умова похідної
  begin
    if
(strtofloat(StringGrid5.Cells[5,nI])=0)and(strtofloat(StringGrid5.Cells[4,nI])=0) then
//лінійна коеф. d=c=0
  begin
    rTmp1:=Okrugl(rTmp-strtofloat(StringGrid2.Cells[1,nI])); //1,1-1=0,1
    yTmp:=strtofloat(StringGrid5.Cells[5,nI])*(rTmp1*rTmp1*rTmp1)+ //d
    strtofloat(StringGrid5.Cells[4,nI])*(rTmp1*rTmp1)+ //c
    strtofloat(StringGrid5.Cells[2,nI])*rTmp1+ //b a
    strtofloat(StringGrid5.Cells[3,nI]); //a b
  end;
  end;
end;

```

```

    { if poh>-1 then //-Похідна має бути >-1
      begin
        rTmp1:=Okruhl(rTmp-strtof(float(StringGrid2.Cells[1,nI])); //1,1-1= 0,1
yTmp:=strtof(float(StringGrid5.Cells[5,nI])*(rTmp1*rTmp1*rTmp1)+strtof(float(StringGrid5.Cells[4,nI])*(rTmp1*rTmp1)+
      strtof(float(StringGrid5.Cells[3,nI])*rTmp1+ //b
      strtof(float(StringGrid5.Cells[2,nI])); //a
      end
    else
    if poh<=-1 then //-Похідна має бути >-1
      begin
        showmessage(StringGrid2.Cells[1,nI]);
        showmessage(floattostr(rTmp));
          // k          b
yTmp:=strtof(float(StringGrid5.Cells[2,nI])*rTmp+strtof(float(StringGrid5.Cells[3,nI]));
      end;
    }
    end;//2
  end;//case
  StringGrid8.Cells[0,nI+nTmp]:=FloatToStr(nI+nTmp);//номер
  StringGrid8.Cells[1,nI+nTmp]:=FloatToStr(Okruhl(rTmp));//x
  StringGrid8.Cells[2,nI+nTmp]:=FloatToStr(Okruhl(yTmp));//y
  StringGrid8.RowCount:=StringGrid8.RowCount+1;
// MySeries1.AddXY(rTmp,yTmp,"clGreen);
// MySeries2.AddXY(rTmp,yTmp,"clRed);
  until (Okruhl(rTmp)>strtof(float(StringGrid2.Cells[1,nI+1]))or
    (Okruhl(rTmp)=strtof(float(StringGrid2.Cells[1,nI+1])));
  nTmp:=nTmp-1;
  iTmp:=iTmp+nTmp;
  end;//nI
// MySeries1.ParentChart:=Chart1;
// MySeries2.ParentChart:=Chart1;
  ProgressBar1.Position:=0;
  end
else
  begin
    MessageDlg(' Немає даних ', mtInformation,
      [mbOk], 0);
    PageControl1.SetFocus;
    PageControl1.ActivePageIndex:=0;
  end;
end;
(*=====*)
...

```

Додаток У

**Фрагмент програми для статистичного опрацювання та комп'ютерного
моделювання циклічних сигналів**

Основна програма

```

...
i:=1;
MainForm.ProgressBar1.Max:=strtoint(Edit7.Text);
for nI:=1 to strtoint(Edit7.Text) do
begin
for nJ:=1 to strtoint(Edit6.Text) do
begin
nTmp1:=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nJ]);
nTmp2:=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nJ+1]);
nTmp3:=nTmp2-nTmp1;//Tmc
//showmessage('1 ntmp1= '+inttostr(ntmp1)+' 1 ntmp2= '+inttostr(ntmp2));
nTmp1:=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nJ+(nI-1)*(strtoint(Edit6.Text))]); //znach
zoni1

if nJ+(nI-1)*(strtoint(Edit6.Text))<>strtoint(Edit6.Text)*strtoint(Edit7.Text) then
nTmp2:=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nJ+1+(nI-1)*(strtoint(Edit6.Text))])//znach
zoni 2
else nTmp2:=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nJ+(nI-1)*(strtoint(Edit6.Text))])//znach
zoni 2
// showmessage('== 2 ntmp1= '+inttostr(ntmp1)+'== 2 ntmp2= '+inttostr(ntmp2));
// showmessage('=== '+inttostr(nJ+1+nI*(strtoint(Edit6.Text))));
nTmp4:=nTmp2-nTmp1;//Ti
//showmessage('Cycl= '+inttostr(nI)+' Zone= '+inttostr(nJ)+'=Ti = '+inttostr(nTmp4));
MainForm.ProgressBar1.Position:=nI;
for nL:=1 to nTmp4 do
begin
t:=round(nL*nTmp3/nTmp4);
StringGrid13.RowCount:=StringGrid13.RowCount+1;
StringGrid13.Cells[0,i]:=floattostr(i);
StringGrid13.Cells[1,i]:=floattostr(i);//відлік
if t=0 then t:=t+1; //---?
StringGrid13.Cells[2,i]:=StringGrid14.Cells[nJ,t{+1}];
//showmessage('t= '+inttostr(t));
i:=i+1;
end;
end;
end;
MainForm.ProgressBar1.Position:=0;
StringGrid13.RowCount:=StringGrid13.RowCount-1;

```

```

end
else
begin
  MessageDlg(' Немає даних ', mtInformation,
    [mbOk], 0);
  PageControl1.SetFocus;
  PageControl1.ActivePageIndex:=0;
end;
end;
(*=====*)

(*===== VISUAL ZMODELOVANI =====*)
procedure TMainForm.BitBtn30Click(Sender: TObject);
var nJ:integer;
MySeries1:TLineSeries;
begin
  { //===== чистка =====
  //== ЧИСТИТЬ НАВІТЬ КОЛИ ВКЛ/ВИКЛ графік
  Chart1.SeriesList.Clear;
  MySeries1:=TLineSeries.Create( Self );
  MySeries1.ParentChart:=Chart1;
  //===== }
  if StringGrid13.Cells[2,1]<>" then
  begin
    MySeries1:=TLineSeries.Create( Self );
    ProgressBar1.Max:=StringGrid13.RowCount-1; //має бути
    for nJ:=1 to StringGrid13.RowCount-1 do
      begin
        if StringGrid13.Cells[2,nJ]<>" then
          MySeries1.AddXY(nJ,strtofloat(StringGrid13.Cells[2,nJ]),"clRed);
          ProgressBar1.Position:=nJ;
        end;
        MySeries1.ParentChart:=Chart1;
        ProgressBar1.Position:=0;
        PageControl1.ActivePageIndex:=1;
      end
    else
      begin
        MessageDlg(' Немає даних ', mtInformation,
          [mbOk], 0);
        PageControl1.SetFocus;
        PageControl1.ActivePageIndex:=4;
      end;
    end;
  end;
end;
(*=====*)

```

```

(*===== VISUAL 1 ЦИКЛ =====*)
procedure TMainForm.BitBtn31Click(Sender: TObject);
var nJ,nK,nZ,nL:integer;
MySeries1,MySeries2:TLineSeries;
begin
//===== чистка =====
//== ЧИСТИТЬ НАВІТЬ КОЛИ ВКЛ/ВИКЛ графік
Chart2.SeriesList.Clear;
MySeries1:=TLineSeries.Create( Self );
MySeries2:=TLineSeries.Create( Self );
MySeries1.ParentChart:=Chart2;
MySeries2.ParentChart:=Chart2;
//=====
if (StringGrid1.Cells[2,1]<>"")and(StringGrid2.Cells[2,1]<>"") then //значення сигналу
begin
//===== Завантажити в табл. =====
//===== очистка =====
for nJ:=0 to 5 do
StringGrid14.Cols[nJ].Clear;
StringGrid14.RowCount:=2;
StringGrid14.ColCount:=2;
StringGrid14.Cells[0,0]:='№';
//=====
for nK:=1 to strtoint(Edit6.Text) do // к.-сть зон
begin
nZ:=1;
if nK>1 then nL:=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nK])+1
else nL:=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nK]);
StringGrid14.Cells[nK,0]:='Зона №'+inttostr(nK);
while nL<=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nK+1]) do
begin
{if StringGrid14.RowCount<(strtoint(StringGrid2.Cells[1,nK+1])-
strtoint(StringGrid2.Cells[1,nK])) then
StringGrid14.RowCount:=StringGrid14.RowCount+2;
StringGrid14.RowCount:=nZ+2;
StringGrid14.Cells[0,nZ]:=inttostr(nZ);//номер
StringGrid14.Cells[nK,nZ]:=StringGrid1.Cells[2,nL];//значення
nZ:=nZ+1;
nL:=nL+1;
end;
StringGrid14.ColCount:=StringGrid14.ColCount+1;
end;
StringGrid14.ColCount:=StringGrid14.ColCount-1;
StringGrid14.RowCount:=StringGrid14.RowCount-1;
//===== чистка =====

```



```

//== ЧИСТИТЬ НАВІТЬ КОЛИ ВКЛ/ВИКЛ ГРАФІК
Chart2.SeriesList.Clear;
MySeries1:=TLineSeries.Create( Self );
MySeries1.ParentChart:=Chart2;
//=====
MySeries1:=TLineSeries.Create( Self );
MySeries2:=TLineSeries.Create( Self );
nJ:=1;
for nK:=1 to strtoint(Edit6.Text) do
begin
nZ:=1;
if nK>1 then nL:=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nK])+1
else nL:=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nK]);
while nL<=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nK+1]) do
begin
MySeries1.AddXY(nJ,strtfloat(StringGrid14.Cells[nK,nZ]),"clGreen);
//МАЛЮЄМО
if
(nL=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nK+1]))or(nL=strtoint(StringGrid2.Cells[1,nK])) then
begin
MySeries2.AddXY(nL,0,"clBlue);
MySeries2.AddXY(nL,-strtoint(Edit14.Text),"clBlue);
MySeries2.AddXY(nL,strtoint(Edit14.Text),"clBlue);
MySeries2.AddXY(nL,0,"clBlue);
end;
nJ:=nJ+1;
nZ:=nZ+1;
nL:=nL+1;
end;
//showmessage(inttostr(nL-1));
end;
MySeries1.ParentChart:=Chart2;
MySeries2.ParentChart:=Chart2;
ProgressBar1.Position:=0;
PageControl3.ActivePageIndex:=1;
end
else
begin
MessageDlg(' Немає даних ', mtInformation,
[mbOk], 0);
PageControl1.SetFocus;
PageControl1.ActivePageIndex:=0;
end;
end;
(*=====*)

```

```

(*===== Save змодельований сигнал =====*)
procedure TMainForm.BitBtn32Click(Sender: TObject);
var nJ:integer;
s1,s2:string;
begin
if StringGrid13.Cells[1,1]<>" then
begin
If SaveDialog1.Execute then
begin
try
SaveDialog1.FileName:=ExtractFilePath(SaveDialog1.FileName)+'Sign_model_'+Extra
ctFileName(SaveDialog1.FileName);
AssignFile(f,SaveDialog1.FileName);
Rewrite(f);
MainForm.ProgressBar1.Max:=StringGrid13.RowCount-1;
for nJ:=1 to StringGrid13.RowCount-1 do
begin
s1:=DotConvert(MainForm.StringGrid13.Cells[1,nJ]);
s2:=DotConvert(MainForm.StringGrid13.Cells[2,nJ]);
writeln(f,s1,' ',s2);
MainForm.ProgressBar1.Position:=nJ;
end;
finally
CloseFile(f);
end;
MainForm.ProgressBar1.Position:=0;
end;
end
else
begin
MessageDlg(' Немає даних ', mtInformation,
[mbOk], 0);
PageControl1.SetFocus;
PageControl1.ActivePageIndex:=4;
end;
end;
(*=====*)
...

```

Додаток Ф

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Публікації, які відображають основні наукові результати дисертації

1. Литвиненко Я., Лупенко С., Студена Ю. Методи статистичної обробки сигналів серця на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу із зонною часовою структурою. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. Тернопіль, 2006. № 4 (11). С. 189–200. (Google Scholar).

Здобувачу належить розробка програмно-алгоритмічного забезпечення методів статистичної обробки циклічних сигналів з врахуванням їх спільної ритмічної структури та проведення експериментів по їх опрацюванню.

2. Лупенко С. А., Литвиненко Я. В., Сверстюк А. С. Статистичний сумісний аналіз кардіосигналів на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. *Електроніка та системи управління. Національний авіаційний університет*. Київ, 2008. № 4 (18). С. 22–29. (Google Scholar).

Здобувачу належить розробка програмно-алгоритмічного забезпечення методів сумісної статистичної обробки синхронно зареєстрованих циклічних сигналів з врахуванням їх спільної ритмічної структури та проведення експериментів по їх опрацюванню.

3. Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Сверстюк А. С. Програмний комплекс для обробки та моделювання синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням моделей та методів теорії циклічних функціональних відношень. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2009. № 5. С. 80–87. (Google Scholar).

Здобувачу належить розробка програмно-алгоритмічних складових програмного комплексу, обґрунтування діагностичних ознак та проведення розкладів статистичних оцінок циклічних сигналів, отриманих з врахуванням функції ритму.

4. Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Дем'янчук Н. Р., Сверстюк А. С. Імітаційне моделювання синхронно зареєстрованих сигналів серця на основі

вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів у задачах кардіодіагностики. *Електроніка та системи управління. Національний авіаційний університет*. Київ, 2009. № 4 (22). С. 141–148. (Google Scholar).

Здобувачу належить розробка алгоритмічного забезпечення методів імітаційного моделювання циклічних сигналів з врахуванням їх спільної ритмічної структури кардіосигналів різної фізичної природи.

5. Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Сверстюк А. С. Діагностичні ознаки в комп'ютерних системах діагностики функціонального стану серцево-судинної системи людини. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2010. № 1. С. 182–188. (Google Scholar).

Здобувачу належить обґрунтування діагностичних ознак та проведення розкладів статистичних оцінок циклічних сигналів, отриманих з урахуванням функції ритму.

6. Загородна Н. В., Литвиненко Я. В., Фриз М. Є. Розробка методу короткотермінового прогнозу добового газоспоживання в опалювальний період на основі регресійного аналізу. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. Тернопіль, 2010. №4 (15). С. 130–140. (Google Scholar).

Здобувачу належить розробка теоретичних засад побудови методу короткотермінового прогнозування циклічних процесів.

7. Горкуненко А.Б., Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Дем'янчук Н. Р. Імітаційне моделювання взаємопов'язаних економічних процесів на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. *Електроніка та системи управління. Національний авіаційний університет*. Київ, 2011. № 2 (28). С. 133–141. (Google Scholar).

Здобувачу належить розробка алгоритмічного забезпечення методів комп'ютерного імітаційного моделювання циклічних економічних процесів з врахуванням їх спільної ритмічної структури.

8. Maruschak P.O., Panin S.V., Ignatovich S.R., Zakiev I.M., Konovalenko I.V., Lytvynenko I.V., Sergeev V.P. Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating. *Theoretical and Applied Fracture*

Mechanics, 2012. Vol. 57. P. 43–48. (Scopus).

Здобувачу належить обґрунтування математичної моделі та розробка теоретичних засад опрацювання та комп'ютерного імітаційного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень.

9. Горкуненко А., Литвиненко Я., Козак Р., Лупенко С., Нікольский Ю. Інформаційна технологія прогнозування циклічних економічних процесів. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. Тернопіль, 2012. №1 (65). С. 143–153. (Google Scholar).

Здобувачу належить розробка теоретичних та програмно-алгоритмічних засад побудови методів прогнозування циклічних економічних процесів.

10. Analysis of Multiple Cracking of Nanocoating as a Cyclic Random Process / I.V. Lytvynenko, S.A. Lupenko, and P.O. Marushchak. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2013, Vol. 49, No. 2, pp. 164-170. (Scopus).

Здобувачу належить обґрунтування математичної моделі процесу рельєфних утворень у вигляді циклічного випадкового процесу та розробка теоретичних засад його опрацювання: сегментації, статистичної обробки, проведення експериментів по його опрацюванню.

11. Processing and modeling of ordered relief at the surface of heat-resistant steels after laser irradiation as a cyclic random process / I.V. Lytvynenko, P.O. Maruschak, S.A. Lupenko. *Automatic Control and Computer Science*, 2014, Vol. 48, No. 1, pp. 1-9. (Scopus).

Здобувачу належить розробка теоретичних засад опрацювання: сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень, проведення експериментів по його комп'ютерному моделюванню та оцінювання похибок його моделювання.

12. Analysis of the State of the Modified Nanotitanium Surface with the Use of the Mathematical Model of a Cyclic Random Process / I.V. Lytvynenko, P.O. Marushchak. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, Vol. 51, No. 3, pp. 254-263. (Scopus).

Здобувачу належить розробка теоретичних засад опрацювання:

сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень, проведення експериментів по його опрацюванню.

13. Lytvynenko I., Maruschak P., Lupenko S., Panin S. Segmentation and Statistical Processing of Geometric and Spatial Data on Self-Organized Surface Relief of Statically Deformed Aluminum Alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 770, pp. 288-293. (Google Scholar).

Здобувачу належить розробка теоретичних засад опрацювання: сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень, проведення експериментів по його опрацюванню.

14. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Lupenko S.A., Popovych P.V. Modeling of the Ordered Surface Topography of Statically Deformed Aluminum Alloy *Materials Science*, 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 113-122. (Scopus).

Здобувачу належить розробка теоретичних засад опрацювання: сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень проведення експериментів по його моделюванню.

15. Луцик Н.С., Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Зозуля А.М. Програмний комплекс для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю. *Журнал Вінницького національного технічного університету «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія»*. Вінниця, 2016. №1 (35). С. 13-22. (Google Scholar).

Здобувачу належить розробка програмно-алгоритмічного забезпечення методів статистичної обробки циклічних сигналів з врахуванням їх спільної ритмічної структури, проведення статистичних експериментів по його опрацюванню.

16. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Lupenko S.A., Hats Yu. I, Menou A., Panin S.V. Software for segmentation, statistical analysis and modeling of surface ordered structures. *Proceedings of the 10th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures*. AIP Publishing, 2016, Vol. 1785, No.1, pp. 030012-1-030012-7. (Scopus).

Здобувачу належить розробка теоретичних засад опрацювання:

сегментації, статистичної обробки, обґрунтування розкладів статистичних оцінок як діагностичних ознак та проведення експериментів по комп'ютерному моделюванню циклічних процесів рельєфних утворень.

17. Lytvynenko I.V. The problem of segmentation of the cyclic random process with a segmental structure and the approaches to its solving. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing*. 2016, Vol. 3, No. 1, pp. 30-37. (Google Scholar).

18. Lytvynenko I.V. Method of the quadratic interpolation of the discrete rhythm function of the cyclical signal with a defined segment structure. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. 2016, Vol. 84, No. 4, pp. 131-138. (Index Copernicus, Google Scholar).

19. Lytvynenko I.V., Lupenko S.A., Maruschak P.O., Panin S.V., Hats Yu.I. Diagnostic features of relief formations on the nanostructured titanium VT1-0 surface after laser shock-wave treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, pp. 1-6. (Scopus).

Здобувачу належить обґрунтування діагностичних ознак та проведення розкладів статистичних оцінок циклічних сигналів, отриманих з врахуванням функції ритму.

20. Литвиненко Я.В. Метод інтерполяції кубічним сплайном дискретної функції ритму циклічного сигналу із визначеною сегментною структурою. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький, 2017. № 3. С. 105–112. (Index Copernicus, Google Scholar).

21. Lytvynenko I.V. Method of segmentation of determined cyclic signals for the problems related to their processing and modeling. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. 2017, Vol. 88, No. 4, pp. 153-169. (Index Copernicus, Google Scholar).

22. Lytvynenko I., Maruschak P., Prentkovskis O., Sorochak A. Modelling Kinetics of Dynamic Crack Propagation in a Gas Mains Pipe as Cyclic Random Process. *International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication*, 2017, Springer, pp. 262-269. (Google Scholar).

Здобувачу належить обґрунтування математичної моделі та розробка теоретичних засад опрацювання: сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень, проведення експериментів по його комп'ютерному моделюванню.

23. Lytvynenko I.V. The method of segmentation of stochastic cyclic signals for the problems of their processing and modeling. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing*. 2017, Vol. 4, No. 2, pp. 93-103. (Google Scholar).

24. Литвиненко Я.В., Марущак П.О. Застосування адитивної математичної моделі циклічного випадкового процесу і детермінованої функції тренду для аналізу руйнування газопроводу. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018, № 1 (54). С. 95-104. (Google Scholar).

Здобувачу належить розробка математичного забезпечення методу аналізу руйнування труби газопроводу з врахуванням трендової компоненти у вигляді поліноміальної функції.

25. Литвиненко Я.В. Загородна Н.В., Окіпний І.Б., Осухівська Г.М. Метод верифікації циклічності (Оцінювання досліджуваного сигналу на приналежність до циклічних сигналів). *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницький. 2018, № 4 (263). С. 214–221. (Index Copernicus, Google Scholar).

Здобувачу належить розробка математичного забезпечення – методу верифікації циклічності.

26. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Panin S.V., Sorochak A.P. Analysis of Fracture Characteristic of a Gas Main Pipe on the Basis of the Additive Mathematical Model of the Cyclic Random Process and Polynomial Function. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018, Vol. 115, No. 1, pp. 012047. (Scopus)

Здобувачу належить розробка математичного забезпечення методу аналізу руйнування труби газопроводу з врахуванням трендової компоненти у вигляді поліноміальної функції, проведення експериментів по оцінюванню трендової компоненти.

27. Lytvynenko I.V. Method of evaluating the rhythm structure of a cyclic signal

through defining the additional countdowns of the discrete function of rhythm. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing*. 2018, Vol. 5, No. 1, pp. 32-38. (Google Scholar).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

28. Литвиненко Я., Лупенко С., Студена Ю. Статистичні методи обробки кардіосигналів на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу. Матеріали десятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 17-18 травня 2006 р. Тернопіль, 2006. С. 76.

Здобувачу належить розробка програмно-алгоритмічного забезпечення методів статистичної обробки кардіосигналів з врахуванням їх спільної ритмічної структури.

29. Литвиненко Я., Лупенко С., Сверстюк А., Студена Ю. Підходи до моделювання сигналів серця на ЕОМ з використанням циклічних випадкових процесів. Матеріали одинадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 16-17 травня 2007 р. Тернопіль, 2007. С. 86.

Здобувачу належить розробка алгоритмічних засад побудови методів комп'ютерного імітаційного моделювання циклічних сигналів серця з врахуванням їх спільної ритмічної структури.

30. Лупенко С., Литвиненко Я., А. Сверстюк. Сумісна статистична обробка синхронно зареєстрованих кардіосигналів на базі їх моделі у вигляді циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. Матеріали дванадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 14-15 травня 2008 р. Тернопіль, 2008. С. 111.

Здобувачу належить розробка програмно-алгоритмічного забезпечення методів сумісної статистичної обробки кардіосигналів з врахуванням їх спільної ритмічної структури, проведення експериментів по їх опрацюванню.

31. Литвиненко Я., Лупенко С. Підходи до сегментації циклічного

випадкового процесу із зонною часовою структурою. Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 13-14 травня 2009 р. Тернопіль, 2009. С. 123.

Здобувачу належить розробка математичного забезпечення – методу сегментації випадкових циклічних сигналів із зонною часовою структурою.

32. Лупенко С., Литвиненко Я., Сверстюк А. Статистичне оцінювання взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів у системах автоматизованої кардіодіагностики. Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 13-14 травня 2009 р. Тернопіль, 2009. С. 98.

Здобувачу належить розробка програмно-алгоритмічного забезпечення методів сумісної статистичної обробки циклічних кардіосигналів з врахуванням їх спільної ритмічної структури.

33. Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Сверстюк А. С. Діагностичні ознаки в системах автоматизованої діагностики функціонального стану серцево-судинної системи за сукупністю синхронно зареєстрованих кардіосигналів. “*Kluczowe aspekty naukowej dzialalnosci – 2010*” : матеріали V міжнародної науково-практичної конференції, м. Перемишль, 7-15 січня 2010 р. Перемишль, 2010. №16. С. 11–15.

Здобувачу належить обґрунтування діагностичних ознак та проведення розкладів одновимірних статистичних оцінок циклічних сигналів, отриманих з врахуванням функції ритму.

34. Литвиненко Я.В. Сегментація циклічного випадкового процесу із зонною часовою структурою та оцінка його функції ритму. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. ТНТУ, м. Тернопіль, 19-21 травня 2010 р. Тернопіль, 2010. С. 274.

35. Литвиненко Я.В. Огляд методів пошуку «розладки» випадкових процесів. Матеріали чотирнадцятої наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 27-28 жовтня 2010 р. Тернопіль, 2010. С. 21.

36. Коваль В., Литвиненко Я., Яскілка В. Застосування методів статистичної обробки циклічних випадкових процесів в задачах аналізу циклів сонячної активності. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей першої наук.-техн. конф. м. Тернопіль, 20 травня 2011 р. Тернопіль, 2011. С. 17.

Здобувачу належить обґрунтування та застосування методів статистичної обробки циклічних сигналів сонячної активності з урахуванням їх ритмічної структури.

37. Литвиненко Я., Марущак П. Аналіз деформування розломно-блокових систем з використанням стохастичних методів обробки циклічних випадкових процесів. Збірник тез доповідей XV наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 14-15 грудня 2011 р. Тернопіль, 2011. С. 128.

Здобувачу належить розробка теоретичних засад опрацювання: сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень, проведення експериментів по їх опрацюванню.

38. Lynvynenko I. Approaches to the evaluation of the rhythm function of cyclic signals and processes. *Problems of decision making under uncertainties*, (PDMU-2012) : XIX International Conference, Mukachevo, April 23-27, 2012. Mukachevo, Ukraine 2012. P. 146.

39. Lynvynenko I., Maruschak P. Use of stochastic methods for treatment of cyclic random processes of multiple cracking. *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science*, (TCSET-2012) : XI International Conference, Lviv–Slavske, February 21-24, 2012. Lviv–Slavske, Ukraine 2012. P. 59. (Scopus)

Здобувачу належить розробка теоретичних засад опрацювання: сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень, проведення експериментів по їх опрацюванню.

40. Maruschak P., Okipnyi I., Poberezhny L., Lytvynenko I. Assessment of damageability of a surface with multiple defects. *Materials and Metallurgy*, (SHMD-2012) : 10-th International Symposium of Croatian Metallurgical Society, Shibenk,

June 17-21, 2012. Shibenk, Croatia 2012. P. 401.

Здобувачу належить розробка теоретичних засад опрацювання: сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень, обґрунтування діагностичних ознак, проведення експериментів по їх опрацюванню.

41. Lytvynenko I., Maruschak P., Menou A. Using mathematical model of cyclic random process for diagnostics of nanotitanium surface condition after high-energy treatment. Proc. of International Symposium on Operational Research and Applications, (ISORAP-2013), May 8-10. 2013. Marrakech, Morocco 2013. P. 678-684.

Здобувачу належить розробка теоретичних засад опрацювання: сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних процесів рельєфних утворень, обґрунтування діагностичних ознак, проведення експериментів по їх опрацюванню.

42. Lytvynenko I., Maruschak P. Simulation of the process of self-organization of modified nanotitan surface using a mathematical apparatus for processing cyclic functions. *Problems of decision making under uncertainties*, (PDMU-2013) : XXI International Conference, Skhidnytsia, May 13-17, 2013. Skhidnytsia, Ukraine 2013. P. 160-161.

Здобувачу належить розробка теоретичних засад методів опрацювання циклічного процесу рельєфних утворень на поверхні модифікованого нанотитану, обґрунтування діагностичних ознак.

43. Литвиненко Я., Яскілка В. Програмне забезпечення для сегментації детермінованих циклічних функцій в задачах цифрової обробки даних. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей III науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 24 квітня 2013 р. Тернопіль, 2013. С. 28.

Здобувачу належить розробка математичного та програмно-алгоритмічного забезпечення методу сегментації детермінованих циклічних сигналів.

44. Гац Ю., Литвиненко Я. Використання математичної моделі циклічного випадкового процесу в задачах аналізу поверхневих шарів сучасних матеріалів.

Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування : тези доповідей II всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 9-10 червня 2015 р. Тернопіль, 2015. С. 7-8.

Здобувачу належить обґрунтування математичної моделі циклічного випадкового процесу як моделі процесу рельєфних утворень для задачі його технічного діагностування.

45. Василик Є., Литвиненко Я. Математична модель циклів сонячної активності. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування* : тези доповідей II всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 9-10 червня 2015 р. Тернопіль, 2015. С. 5-7.

Здобувачу належить обґрунтування математичної моделі циклічного випадкового процесу, як моделі циклів сонячної активності.

46. Луцик Н., Литвиненко Я. Програмний комплекс для аналізу серцевого ритму на базі математичної моделі у вигляді умовного циклічного випадкового процесу. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування* : тези доповідей II всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 9-10 червня 2015 р. Тернопіль, 2015. С. 12-14.

Здобувачу належить розробка програмно-алгоритмічних складових програмного комплексу для аналізу серцевого ритму.

47. Lytvynenko I.V., Marushak P.O., Lupenko S.A., Hats Yu.I., Menou A. Software tools for the analysis of the self-organizing material surface after deformation for the problems of its sementation and statistical processing. Proc. of International Symposium Aircraft materials, (АСМА-2016). May 11-13. 2016. Agadir, Morocco 2016. P. 138-139.

Здобувачу належить розробка теоретичних засад опрацювання: сегментації, статистичної обробки циклічних процесів рельєфних утворень.

48. Гац Ю., Литвиненко Я. Обґрунтування вибору діагностичних ознак рельєфних утворень на поверхні нанотитану, сформованих внаслідок лазерної ударно-хвильової обробки. Матеріали XIX наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 18-19

травня 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 5-6.

Здобувачу належить обґрунтування діагностичних ознак рельєфних утворень на поверхні нанотитану.

49. Василик Є., Литвиненко Я. Математична модель циклів сонячної активності для задачі їх статистичної обробки. Матеріали ХІХ наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 18-19 травня 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 4.

Здобувачу належить розробка теоретичних засад побудови методів статистичної обробки циклів сонячної активності.

50. Литвиненко Я., Литвиненко Т. Метод вилучення тренду з електрокардіосигналу в системах автоматизованої кардіодіагностики. *Актуальні задачі сучасних технологій* : матеріали V міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 17-18 листопада 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 64.

Здобувачу належить розробка програмно-алгоритмічного забезпечення для опрацювання електрокардіосигналів.

51. Литвиненко Я., Марущак П., Лавренюк Т. Сегментація циклічних сигналів в задачах цифрової обробки даних: детермінований підхід. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування* : тези доповідей III всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 8-9 червня 2017 р. Тернопіль, 2017. С. 155-157.

Здобувачу належить розробка математичного забезпечення – методу сегментації детермінованих циклічних сигналів.

52. Литвиненко Я.В., Марущак П.О., Побережний Л.Я., Баран Д.Я. Аналіз кінетики динамічного поширення тріщини в трубі магістрального газопроводу як циклічного випадкового процесу. *Нафтогазова енергетика 2017* : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 380-382.

Здобувачу належить розробка та опис математичного забезпечення методу аналізу руйнування труби газопроводу з врахуванням трендової компоненти у вигляді поліноміальної функції.

53. Литвиненко Я.В., Марущак П. О. Застосування адитивної математичної моделі циклічного випадкового процесу і поліноміальної функції для виявлення закономірностей динамічного руйнування магістрального газопроводу. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах*, (ВКДТС-2017) : матеріали IV міжнародної наукової конференції, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, 31 жовтня-2 листопада 2017 р. Вінниця, 2017. С. 167-169.

Здобувачу належить розробка математичного забезпечення методу аналізу руйнування труби газопроводу з врахуванням трендової компоненти у вигляді поліноміальної функції.

54. Horkunenko A., Lytvynenko I., Sverstyuk A., Lupenko S. Software complex for modeling and processing of synchronously registered cardiosignals. Projekt interdyscyplarny projektem XXI wieku, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biala, 2017. Tom 2. P. 126–130.

Здобувачу належить розробка програмно-алгоритмічних складових комплексу комп'ютерних програм для опрацювання та моделювання циклічних кардіосигналів.

55. Габ'ян Л., Петришин Ю., Литвиненко Я. Використання методів попередньої обробки біомедичних даних в задачах телемедицини. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей V науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 1-2 лютого 2018 р. Тернопіль, 2018. С. 25.

Здобувачу належить розробка алгоритмічного та програмного забезпечення методів попередньої обробки циклічних сигналів.

56. Габ'ян Л., Петришин Ю., Литвиненко Я. Сучасні технології в телемедицині. *Інформаційні моделі, системи та технології* : тези доповідей V науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 1-2 лютого 2018 р. Тернопіль, 2018. С. 45.

Здобувачу належить розробка алгоритмічного та програмного забезпечення методів опрацювання циклічних сигналів в задачах телемедицини.

57. Литвиненко Я. Основи методології сегментації циклічних сигналів. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій* : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя. м. Тернопіль, 23-24 травня 2018 р. Тернопіль, 2018. С. 211-212.

Публікації, які додатково відображають результати дисертації

58. Свідоцтво № 31682 Україна. Комп'ютерна програма “Статистична обробка циклічних сигналів серця” (СОЦСС) / А. С. Сверстюк, С. А. Лупенко, Я. В. Литвиненко; заявл. 05.11.09 ; опубл. 20.01.10.

Здобувачу належить розробка математичного та програмно-алгоритмічного забезпечення для опрацювання циклічних кардіосигналів.

59. Свідоцтво № 38822 Україна. Комп'ютерна програма “Моделювання циклічних економічних процесів” (МЦЕП) / А.Б. Горкуненко, С.А. Лупенко, Я.В. Литвиненко; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11.

Здобувачу належить розробка математичного та програмно-алгоритмічного забезпечення для опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних економічних процесів.

60. Свідоцтво № 38823 Україна. Комп'ютерна програма “Статистична обробка циклічних економічних процесів” (СОЦЕП) / А.Б. Горкуненко, С.А. Лупенко, Я. В. Литвиненко; заявл. 12.04.11; опубл. 24.06.11.

Здобувачу належить розробка математичного та програмно-алгоритмічного забезпечення для опрацювання циклічних економічних процесів.

61. Свідоцтво № 59323 Україна. Комп'ютерна програма “Аналіз серцевого ритму з підвищеною інформативністю” / Я.В. Литвиненко, С.А. Лупенко, Н.С. Луцик; заявл. 19.02.2015; опубл. 16.04.2015.

Здобувачу належить розробка математичного та програмно-алгоритмічного забезпечення для статистичного опрацювання циклічних

кардіосигналів.

62. Свідоцтво № 65753 Україна. Комп'ютерна програма “Статистична обробка та моделювання циклічних сигналів рельєфоутворення, оцінка похибок моделювання” / Я.В. Литвиненко, П.О. Марущак, Є.В. Тиш; заявл. 28.03.2016; опубл. 31.05.2016.

Здобувачу належить розробка математичного та програмно-алгоритмічного забезпечення для опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів рельєфних утворень.

63. Свідоцтво № 68541 Україна. Комп'ютерна програма “Сегментація детермінованих циклічних функцій” / Я.В. Литвиненко; заявл. 8.09.2016; опубл. 8.11.2016.

64. Свідоцтво № 79103 Україна. Комп'ютерна програма “Сегментація випадкових циклічних функцій” / Я.В. Литвиненко; заявл. 8.05.2018; опубл. 16.05.2018.



УКРАЇНА
Міністерство освіти і науки України
Державний департамент інтелектуальної власності

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 31682

Комп'ютерна програма "Статистична обробка циклічних сигналів серця"
("СОЦСС")

(вид, назва твору)

Автор(и) Сверстюк Андрій Степанович, Лупенко Сергій Анатолійович,
Литвиненко Ярослав Володимирович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

20.01.2010

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності



М.В.Паладій



УКРАЇНА
Міністерство освіти і науки України
Державний департамент інтелектуальної власності

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 38823

Комп'ютерна програма "Статистична обробка циклічних економічних процесів" ("СОЦЕП")

(вид, назва твору)

Автор(и) Горкуненко Андрій Борисович, Лупенко Сергій Анатолійович,
Литвиненко Ярослав Володимирович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

24.06.2011

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М.В.Паладій





УКРАЇНА
Міністерство освіти і науки України
Державний департамент інтелектуальної власності

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 38822

Комп'ютерна програма "Моделювання циклічних економічних процесів"
("МЦЕП")

(вид, назва твору)

Автор(и) Горкуненко Андрій Борисович, Лупенко Сергій Анатолійович,
Литвиненко Ярослав Володимирович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

24.06.2011

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

М.В.Паладій





УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 65753

Комп'ютерна програма "Статистична обробка та моделювання циклічних сигналів рельєфоутворення, оцінка похибок моделювання"

(вид, назва твору)

Автор(и) Литвиненко Ярослав Володимирович, Марущак Павло Орестович, Тиш Євгенія Володимирівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

31.05.2016



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України

В.о. Голови А.А. Малиш



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 79103

Комп'ютерна програма "Сегментація випадкових циклічних функцій"

(вид, назва твору)

Автор(и) Литвиненко Ярослав Володимирович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації

16.05.2018



Державний секретар Міністерства
економічного розвитку і торгівлі
України О. Ю. Перевезенцев

„ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор Спільного Українсько-Німецького товариства
з обмеженою відповідальністю «МІДА»



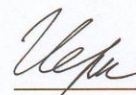
Швец Є.М.

2018 р.


Акт впровадження

1. Назва пропозиції для впровадження: Комп'ютерні програми для сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних сигналів серця (авторські свідоцтва № 31682, № 59323, №68541, №79103).
2. Ким запропоновано, виконавці, адреса: Литвиненко Я.В. доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, кафедра комп'ютерних наук, м. Тернопіль, вул. Руська 56.
3. Джерело інформації: Дисертаційна робота Литвиненка Я.В. на тему: "Методи ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів в системах цифрової обробки даних".
4. Де впроваджено: Спільне Українсько-Німецьке товариство з обмеженою відповідальністю «МІДА», м. Київ, проспект Космонавта Комарова 38-А.
5. Термін впровадження: 2018 р.
6. Загальна кількість спостережень: 114.
7. Висновок по впровадженню: Запропонований комплекс програм дозволяє проводити сегментацію та статистичну обробку циклічних сигналів серця. Що дало можливість підвищити точність автоматизованого визначення діагностичних сегментів електрокардіосигналу, а також здійснювати моделювання сигналів серця з різними видами патологій з метою навчання та тестування систем автоматизованої комп'ютерної діагностики. Запропонований пакет комп'ютерних програм використовується в діагностичному комплексі CARDIO.

Головний конструктор
комплексу CARDIO

 Чорний П.М.

Доцент кафедри
комп'ютерних наук
ТНТУ імені І. Пулюя

 Литвиненко Я.В.



Медичний центр ТОВ «МЕВІЗ»

Медична візуалізація

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Головний лікар
 медичного центру «Мевіз»
 Дросик М. М.
 14 2018 р.

Акт впровадження

1. *Назва пропозиції для впровадження:* Комп'ютерні програми для сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних сигналів серця (авторські свідоцтва № 31682, № 59323, №68541, №79103).
2. *Ким запропоновано, виконавець, адреса:* Литвиненко Я.В. доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, кафедра комп'ютерних наук, м. Тернопіль, вул. Руська 56.
3. *Джерело інформації:* Дисертаційна робота Литвиненка Я.В. на тему: "Методи ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів в системах цифрової обробки даних".
4. *Де впроваджено:* Медичний центр ТОВ «Мевіз», м. Тернопіль, вул. Купчинського 14, кабінет кардіодіагностики, комп'ютерний комплекс «CARDIO».
5. *Термін впровадження:* 2018 р.
6. *Загальна кількість спостережень:* 125.
7. *Висновок по впровадженню:* Використання запропонованих комп'ютерних програми дає змогу проводити автоматизовану обробку кардіосигналів, а саме аналіз їх ритму та морфологічний аналіз. Комп'ютерні програми дозволили підвищити точність автоматизованого визначення діагностичних сегментів електрокардіосигналу, магнітокардіосигналу, реокардіосигналу, а також здійснювати моделювання сигналів серця з різними видами патологій з метою навчання та тестування систем автоматизованої комп'ютерної обробки.

Лікар функціональної діагностики,
 кабінету кардіодіагностики

Паньків І. Б

Доцент кафедри
 комп'ютерних наук
 ТНТУ імені І. Пулюя

Литвиненко Я.В.

„ЗАТВЕРДЖУЮ”
 Проректор з наукової роботи,
 заслужений діяч науки і техніки України,
 доктор біологічних наук, професор
 Кліщ І.М.



_____ 2018 р.

Акт впровадження

1. *Назва пропозиції для впровадження:* Комп'ютерні програми для сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних сигналів серця (авторські свідоцтва № 31682, № 59323, №68541, №79103).
2. *Ким запропоновано, виконавець, адреса:* Литвиненко Я.В. доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, кафедра комп'ютерних наук, м. Тернопіль, вул. Руська 56.
3. *Джерело інформації:* Дисертаційна робота Литвиненка Я.В. на тему: "Методи ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів в системах цифрової обробки даних".
4. *Де впроваджено:* Тернопільський державний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, м. Тернопіль, вул. Дорошенка, 2, кафедра медичної фізики діагностичного та лікувального обладнання.
5. *Термін впровадження:* 2018 р.
6. *Загальна кількість спостережень:* 195.
7. *Висновок по впровадженню:* Використання запропонованих комп'ютерних програм дає змогу проводити автоматизований аналіз різних кардіосигналів для оцінювання їх морфологічних та ритмічних ознак. Рекомендуємо до включення в педагогічний процес при викладанні навчальної дисципліни «Медична фізика діагностичного та лікувального обладнання», «Медична та біологічна фізика» на відповідних практичних заняттях «Фізичні основи електрокардіографії. Електрокардіографія» та «Функціонування електромагнітного обладнання».

Завідувач кафедри медичної фізики
 діагностичного та лікувального обладнання,
 доктор технічних наук, доцент

_____ Рудяк Ю.А.

„ЗАТВЕРДЖУЮ”
 Проректор з наукової роботи,
 заслужений діяч науки і техніки України,
 доктор біологічних наук, професор
 Кліщ І.М.

_____ 2018 р.



Акт впровадження

1. *Назва пропозиції для впровадження:* Комп'ютерні програми для сегментації, статистичної обробки та імітаційного моделювання циклічних сигналів серця (авторські свідоцтва № 31682, № 59323, №68541, №79103).
2. *Ким запропоновано, виконавець, адреса:* Литвиненко Я.В. доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, кафедра комп'ютерних наук, м. Тернопіль, вул. Руська 56.
3. *Джерело інформації:* Дисертаційна робота Литвиненка Я.В. на тему: "Методи ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів в системах цифрової обробки даних".
4. *Де впроваджено:* Тернопільський державний медичний університет імені І. Я. Горбачевського, м. Тернопіль, вул. Руська, 12, кафедра медичної інформатики.
5. *Термін впровадження:* 2018 р.
6. *Загальна кількість спостережень:* 137.
7. *Висновок по впровадженню:* Використання запропонованих комп'ютерних програми дає змогу проводити автоматизовану обробку кардіосигналів для аналізу їх ритму та морфологічного аналізу. Комп'ютерні програми використовується в навчальному процесі на кафедрі медичної інформатики при вивченні дисципліни "Медична інформатика" (тема: "Методи біостатистики. Аналіз біосигналів. Методи обробки біосигналів").

Завідувач кафедри
 медичної інформатики,
 д.б.н., доцент

 Вакуленко Д.В.



„ЗАТВЕРДЖУЮ”

Перший проректор
ТНТУ імені І. Пулюя


Митник М.М.

_____ 2018

Акт впровадження

1. *Об'єкт впровадження:* Комплекс комп'ютерних програм для обробки та імітаційного моделювання циклічних сигналів (авторські свідоцтва № 31682, № 38822, № 38823, № 59323, № 68541).
2. *Ким запропоновано, виконавці, адреса:* Литвиненко Я.В. доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, кафедра комп'ютерних наук, м. Тернопіль, вул. Руська 56.
3. *Джерело інформації:* Дисертаційна робота Литвиненка Я.В. на тему: “Методи ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів в системах цифрової обробки даних”.
4. *Де впроваджено:* Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська 56, кафедра комп'ютерних наук.
5. *Термін впровадження:* 2018 р.
6. *Висновок по впровадженню:* Запропоновані програми дозволяють досліджувати різні циклічні сигнали, проводити їх сегментацію, оцінювання ритмічної структури та статистичну обробку, а також їх імітаційне моделювання. Запропонований комплекс комп'ютерних програм використовується в навчальному процесі на кафедрі комп'ютерних наук при вивченні дисциплін: “Обробка сигналів та зображень”, “Моделювання систем”.

Зав. кафедрою
комп'ютерних наук

 д.т.н., проф. Приймак М.В.

Доцент кафедри
комп'ютерних наук

 Литвиненко Я.В.



„ЗАТВЕРДЖУЮ”

Перший проректор

ТНТУ імені І. Пулюя

Митник М.М.

2018

Акт впровадження

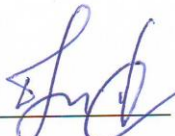
1. *Об'єкт впровадження:* Комп'ютерна програм для статистичної обробки та імітаційного моделювання сигналів рельєфних утворень (авторське свідоцтво № 65753).
2. *Ким запропоновано, виконавці, адреса:* Литвиненко Я.В. доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, кафедра комп'ютерних наук, м. Тернопіль, вул. Руська 56.
3. *Джерело інформації:* Дисертаційна робота Литвиненка Я.В. на тему: “Методи ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів в системах цифрової обробки даних”.

Де впроваджено: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська 56, кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв.

4. *Термін впровадження:* 2018 р.

Висновок по впровадженню: Запропонована програма дозволяє проводити статистичну обробку діагностичних сегментів рельєфних утворень, а також здійснювати їх імітаційне моделювання та оцінювати похибки. Запропонована програма використовується в навчальному процесі на кафедрі автоматизації технологічних процесів і виробництв при вивченні дисципліни „Автоматизовані системи технічного зору”.

Зав. кафедрою
автоматизації технологічних
процесів і виробництв

 д.т.н., проф. Марущак П.О.

Доцент кафедри
комп'ютерних наук

 Литвиненко Я.В.




„ЗАТВЕРДЖУЮ”
Перший проректор
ТНТУ імені І. Пулюя
Митник М.М.
_____ 2018

Акт впровадження

1. *Об'єкт впровадження:* Комплекс комп'ютерних програм для обробки та імітаційного моделювання циклічних економічних процесів (авторські свідоцтва № 38822, № 38823).
2. *Ким запропоновано, виконавці, адреса:* Литвиненко Я.В. доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, кафедра комп'ютерних наук, м. Тернопіль, вул. Руська 56.
3. *Джерело інформації:* Дисертаційна робота Литвиненка Я.В. на тему: “Методи ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів в системах цифрової обробки даних”.
4. *Де впроваджено:* Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська 56, кафедра менеджменту та адміністрування
5. *Термін впровадження:* 2018 р.
6. *Висновок по впровадженню:* Запропоновані програми дозволяють досліджувати циклічні економічні процеси, проводити їх статистичну обробку та імітаційне моделювання. Комп'ютерні програми впроваджені в навчальний процес на кафедрі менеджменту та адміністрування і використовуються при вивченні дисципліни “Корпоративне управління”.

Зав. кафедрою
менеджменту та адміністрування

 д.е.н., проф. Кирич Н.Б.

Доцент кафедри
комп'ютерних наук

 Литвиненко Я.В.