

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

Литвиненко Ярослав Володимирович



УДК 681.518.3+004.94+519.6

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

01.05.02 - Математичне моделювання та обчислювальні методи

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Тернопіль – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор,
Лупенко Сергій Анатолійович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя,
професор кафедри комп'ютерних систем та мереж,
м. Тернопіль.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Матвійчук Ярослав Миколайович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
професор кафедри систем штучного інтелекту,
м. Львів;

доктор технічних наук, професор,
Власюк Анатолій Павлович,
Національний університет “Острозька академія”,
завідувач кафедри економіко-математичного
моделювання та інформаційних технологій,
м. Острог;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Юзефович Роман Михайлович,
Фізико-механічний інститут імені Г.В. Карпенка
НАН України,
завідувач лабораторії вібродіагностики,
м. Львів.

Захист відбудеться *6 грудня 2019* р. о *12* годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д58.052.01 в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий «___» листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Шелестовський Б. Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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) займалися: Амосов М.М., Файнзильберг Л.С. – методи опрацювання циклічних сигналів (кардіосигналів) у фазовому просторі; Воробйов С.А. – математичні моделі у вигляді ієрархічного багаторівневого випадкового процесу; Яворський І.М., Хард Г.Л., Гарднер В.А., Драган Я.П., Яворський Б.І., Юзефович Р.М. – моделі у вигляді циклостационарних (періодично-корельованих) та майже циклостационарних (майже періодично-корельованих) випадкових процесів; Марченко Б.Г., Приймак М.В., Щербак Л.М. – моделі у вигляді лінійних періодичних випадкових процесів, процесів із незалежними періодичними приростами, періодичні білі шуми; Лупенко С.А. – моделі у вигляді абстрактних циклічних функціональних відношень; 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; Дубровін В.І., Твердохліб Ю.В., Талмон Дж. Л., Вітек М.Л., Сахамбі Дж. С. – методи з використанням вейвлет-перетворень; 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.

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 [1, 15, 28, 36, 46, 49] – розробка програмно-алгоритмічного забезпечення методів статистичного опрацювання циклічних сигналів із урахуванням їх спільної ритмічної структури; у [2, 30, 32] – програмно-алгоритмічне забезпечення методів сумісного статистичного опрацювання циклічних сигналів із урахуванням їх спільної ритмічної структури; у [3, 5, 19, 33] – 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 [4, 7, 29] – алгоритмічне забезпечення методів комп'ютерного моделювання циклічних сигналів із урахуванням їх спільної ритмічної структури; у [6, 9] – розробка теоретичних засад побудови методів прогнозування циклічних процесів; у [8, 10–14, 16, 22, 37, 39, 40–42, 44, 48] – 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 [45] – обґрунтування математичної моделі циклів сонячної активності; у [17] – формулювання постановки проблеми сегментації циклічних сигналів та обґрунтування підходів до її вирішення; у [18, 20, 27, 38] – розробка математичного забезпечення методів оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів; у [21, 43, 51] – розробка методу сегментації детермінованих циклічних сигналів; у [23, 31, 34, 35] – розробка методів сегментації випадкових циклічних сигналів; у [24, 26, 52, 53] – розробка математичного забезпечення методу аналізу руйнування труби

газопроводу із урахуванням трендової компоненти у вигляді поліноміальної функції; у [25] – розробка методу верифікації математичних моделей циклічних сигналів; у [57] – розробка основ побудови методів (методології) сегментації циклічних сигналів; у [47, 50, 54, 55, 56, 58–62] – розробка алгоритмічного та програмного забезпечення для опрацювання циклічних сигналів; у [63, 64] – 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, Morocco, 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», ACMA-2016 (с. Agadir, Morocco, 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 interdyscyplinarny 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 Scopus, 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.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, 20 додатків, списку використаних джерел із 472 найменувань, містить 151 рисунки, 18 таблиць. Повний обсяг дисертації складає 663 сторінок, основний зміст викладено на 319 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, відзначено її зв'язок із науковими темами, сформульовано мету і завдання дослідження, показано наукову новизну отриманих результатів, їх практичне значення. Також розглянуто питання особистого внеску, апробації результатів дисертації та їх висвітлення у друкованих працях.

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 й методів опрацювання, зокрема методів сегментації стосовно точності, достовірності й інформативності отриманих на їх основі діагностичних чи прогностичних ознак. Це дало змогу виявити низку недоліків та сформулювати науково-прикладну проблему дисертаційного дослідження й визначити стратегію розвитку теорії моделювання й опрацювання циклічних сигналів у напрямку створення методології сегментації циклічних сигналів та нових методів оцінювання ритмічних структур у системах цифрової обробки даних.

Враховуючи факт наявності повторюваної структури сегментів-циклів та сегментів-зон у циклічних сигналах, факт їх розгортання у часі з постійним чи змінним ритмом і можливість проведення їх опрацювання в рамках двох підходів щодо їх моделювання (детермінованого й стохастичного), обґрунтовано необхідність урахування цієї інформації для потреб побудови методів сегментації (ідентифікації сегментних структур) різних циклічних сигналів. Як узагальнену математичну модель циклічних сигналів для побудови методів сегментації обґрунтовано циклічну функцію з сегментною структурою (в рамках стохастичного та детермінованого підходів), яка описана в роботах Лупенка С.А.

До розроблених методів сегментації циклічних сигналів, що ґрунтуються на вибраному та обґрунтованому класі математичних моделей, висунуто такі вимоги: врахування як циклічної структури, так і структури, що описує сегменти в межах

циклів – зонну структуру, що дасть змогу закласти в методи сегментації – процедуру ідентифікації відповідної сегментної структури; врахування мінливості ритму та дозволі проводити оцінювання ритмічної структури, яка характеризує змінний чи постійний ритм (проводити її ідентифікацію); опрацювання циклічних сигналів у часовій або просторовій області, що уможливить інтерпретацію результатів та оперування загальноприйнятими ознаками, наприклад, у лікарській практиці при дослідженні кардіосигналів під час проведення кардіодіагностики. Крім цього, методи сегментації зможуть адаптуватися під особливості різних циклічних сигналів та враховувати їх ритм: постійний чи змінний, що дозволить певним чином усунути типові помилки діагностики, які зумовлені як дією завад технічного та біологічного походження, так і некоректністю визначення ритмічної структури при опрацюванні досліджуваного циклічного сигналу, зокрема при проведенні його статистичної обробки.

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

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

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) 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

$$\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1}), i = \overline{1, C}, \quad (2)$$

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

$$\mathbf{W}_i = \{t_{i,l}, l = \overline{1, L}\}, i = \overline{1, C}, \quad (3)$$

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) 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:

$$F(t) = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^Z f_{ij}(t), t \in \mathbf{W}, \quad (4)$$

де Z – кількість сегментів-зон на сегменті-циклі циклічного сигналу. Область значень циклічного сигналу для математичної моделі (4) буде дорівнювати аналогічно до попереднього випадку моделі (1). В конструкції (4) сегменти-зони циклічного сигналу пов'язані з сегментами-циклами й визначаються через індикаторні функції, тобто $f_{ij}(t) = F(t) \cdot I_{\mathbf{W}_{ij}}(t) = f_i(t) \cdot I_{\mathbf{W}_{ij}}(t)$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$, $t \in \mathbf{W}$. При

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

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

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

$$\mathbf{W}_{ij} = \left[t_{ij}, t_{i,j+1} \right), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, \quad (5)$$

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

$$\mathbf{W}_{ij} = \left\{ t_{ij,l}, l = \overline{1, L_j} \right\}, L = \sum_{j=1}^Z L_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, \quad (6)$$

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

Сегментна зонна структура враховується множиною відліків часу $\{t_{ij}\}$ або

$\left\{ t_{ij,l}, l = \overline{1, L_j} \right\}$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$. У такій конструкції математичної моделі (4) враховано ритм циклічного сигналу через неперервну функцію ритму $T(t, n)$, а саме, $I_{\mathbf{W}_{ij}}(t) = I_{\mathbf{W}_{ij}+n}(t + T(t, n))$, $i = \overline{1, C}$, $j = \overline{1, Z}$, $n \in \mathbf{Z}$, $t \in \mathbf{W}$.

Враховуючи, описані вище, математичні моделі (1) та (4), з метою загальної постановки проблеми ідентифікації сегментної та ритмічної структур циклічних сигналів, у роботі їх узагальнену математичну модель наведено таким чином:

$$F(t) = F(t, \mathbf{S}, \mathbf{T}), \quad (7)$$

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

$$\mathbf{S} = \begin{cases} \hat{\mathbf{D}}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}, \text{ для сегментної циклічної структури,} \\ \hat{\mathbf{D}}_z = \{t_{ij}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}, \text{ для сегментної зонної структури,} \end{cases} \quad (8)$$

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

$$\mathbf{T} = \begin{cases} \hat{\mathbf{T}}(t_i, n), i = \overline{1, C}, n \in \mathbf{Z}, \text{ для сегментної циклічної структури,} \\ \hat{\mathbf{T}}(t_{ij}, n), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, n \in \mathbf{Z}, \text{ для сегментної зонної структури.} \end{cases} \quad (9)$$

Після ідентифікації сегментної та ритмічної структур ЦС необхідно провести оцінювання неперервної функції ритму, врахованої у моделях (1) та (4) шляхом інтерполяції ідентифікованої дискретної ритмічної структури ЦС

$$\mathbf{T} \xrightarrow{\text{interpolation}} \hat{T}(t, n), n \in \mathbf{Z}, t \in \mathbf{W}. \quad (10)$$

Враховуючи узагальнене подання математичної моделі ЦС (7) з метою її конкретизації, тобто вибору моделі (1) або (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 (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 (9), що пов'язані з сегментними структурами (8). Для вирішення даної проблеми в роботі розроблено методи ідентифікації сегментних і ритмічних структур досліджуваних ЦС.

У другому розділі сформовано концептуальну модель циклічних сигналів, враховуючи означення сегмента, циклу та зони. Згідно з обґрунтованою математичною моделлю ЦС у роботі наведено дві сегментних структури: сегментна циклічна та сегментна зонна. Остання є вкладеною у сегментну циклічну структуру. Наведено основні математичні співвідношення для них. Побудовано таксономічне дерево моделей ЦС, до якого увійшли, у рамках стохастичного підходу, циклічний випадковий процес, 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, для якої розроблено методи сегментації. Враховуючи описані сегментні структури та характеристики циклічних функцій, які є математичними моделями ЦС, конкретизовано постановку завдання сегментації для двох їх типів.

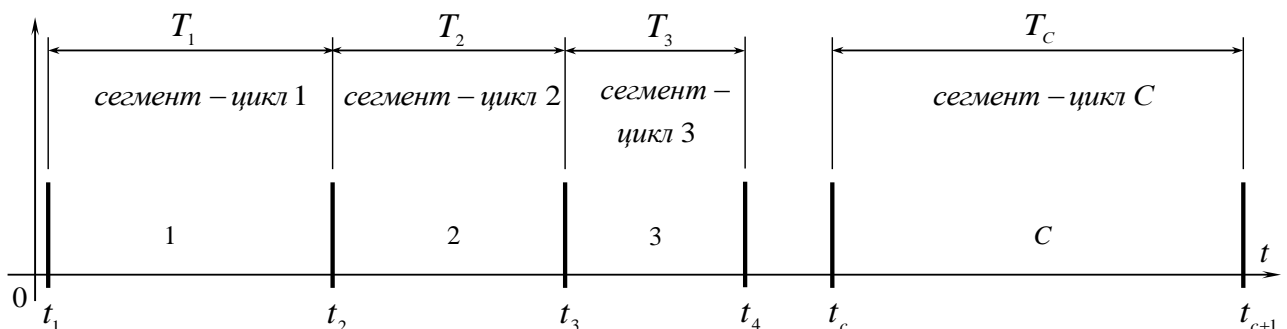


Рис. 1. Схематичне зображення сегментної циклічної структури циклічного сигналу

На рисунку 1 схематично зображено сегментну циклічну структуру циклічного сигналу при реєстрації C – циклів, а на рисунку 2 схематично зображено сегментну зонну структуру циклічного сигналу при реєстрації C – циклів та Z – зон, які спостерігаються на них. Як приклад, на рисунках 3 та 4 наведено зображення типових циклічних сигналів із позначеною відповідною сегментною циклічною та сегментною зонною структурами.

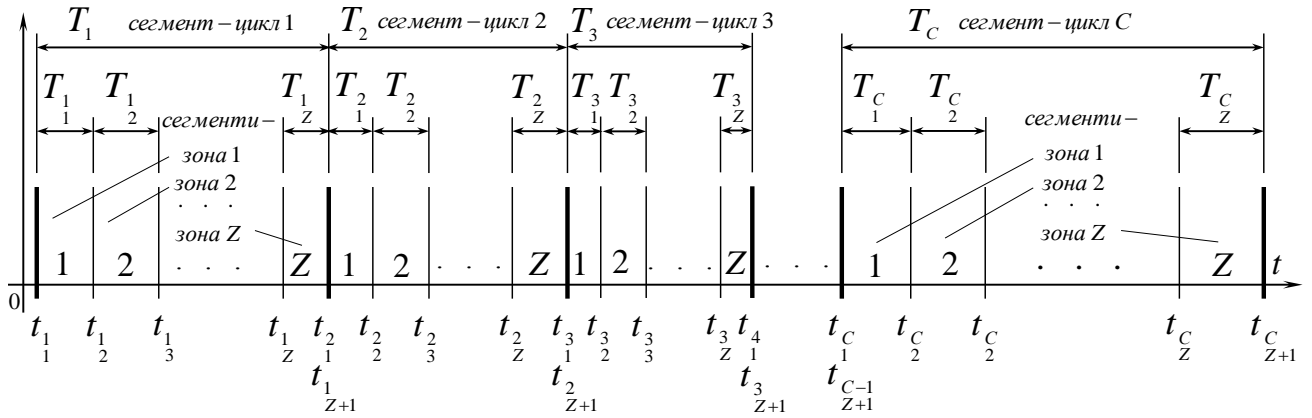


Рис. 2. Схематичне зображення сегментної зонної структури циклічного сигналу

На рисунках 1-4 показано тривалості сегментів-циклів $\{T_i, i = \overline{1, C}\}$ та тривалості сегментів-зон $\{T_{ij}, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}\}$, позначено сегменти-цикли через задання їх меж початку сегмента-циклу t_i та його закінчення t_{i+1} , позначено сегменти-зони, з яких складається кожен цикл циклічного сигналу через задання меж початку сегмента-зони t_{ij} та його закінчення t_{ij+1} у кожному циклі. Сегментна структура повністю задається множиною моментів часу або просторових відліків, які відповідають початку сегмента та його закінченню $\{t_i, i = \overline{1, C}\}$ або $\{t_{ij}, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}\}$.

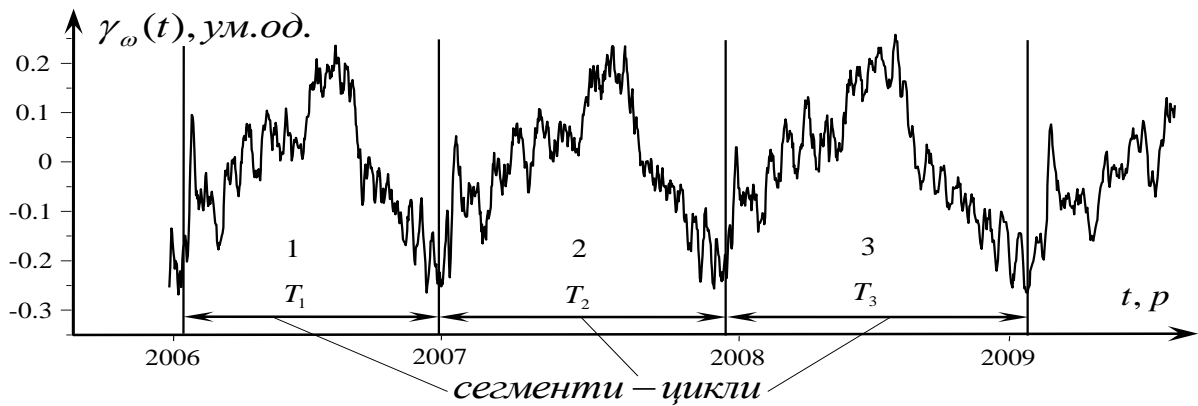


Рис. 3. Зображення циклічного сигналу з позначеною сегментною циклічною структурою, циклічний економічний процес – індекс активності автофінансування США, три цикли ($C = 3$)

Отримано основні математичні співвідношення для сегментних структур. Тривалість сегмента циклічного сигналу, що відповідає цілому циклу, визначається через часові або просторові відліки початку t_i та закінчення t_{i+1} i -го циклу циклічного сигналу

$$T_i = t_{i+1} - t_i, i = \overline{1, C}. \quad (11)$$

Момент часу або просторовий відлік, що відповідає початку i -го циклу циклічного сигналу визначається

$$t_i = t_1 + \sum_{q=1}^{i-1} T_q, i = \overline{1, C}. \quad (12)$$

Момент часу або просторовий відлік, що відповідає закінченню i -ого циклу циклічного сигналу, буде визначатися

$$t_{i+1} = t_1 + \sum_{q=1}^{i-1} T_q + T_i, i = \overline{1, C}. \quad (13)$$

Для випадку аналогового сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, область визначення i -го сегмента-циклу \mathbf{W}_i визначається через часовий або просторовий півінтервал (2), який задається відповідно двома величинами – початком t_i та закінченням t_{i+1} i -го сегмента-циклу для кожного циклічного сигналу. Для випадку дискретного сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, область визначення i -го сегмента-циклу визначається через множину дискретних часових відліків (3).

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

$$\mathbf{W} = \bigcup_{i=1}^C \mathbf{W}_i, \mathbf{W}_i \cap \mathbf{W}_q = \emptyset, i \neq q, i = \overline{1, C}. \quad (14)$$

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, тобто $\widehat{\mathbf{W}} \neq \bigcup_{i=1}^C \mathbf{W}_i$. На практиці, перед проведенням опрацювання циклічного сигналу, необхідно залишити лише ту ділянку циклічного сигналу $F(t), t \in \widehat{\mathbf{W}}$, яка складається з цілого числа циклів, тобто для області його визначення можна записати $\widehat{\mathbf{W}} = \bigcup_{i=1}^C \mathbf{W}_i$. При досить великій кількості зареєстрованих циклів таке відкидання крайніх сегментів циклічного сигналу практично не вплине на точність і достовірність процедури опрацювання циклічного сигналу.

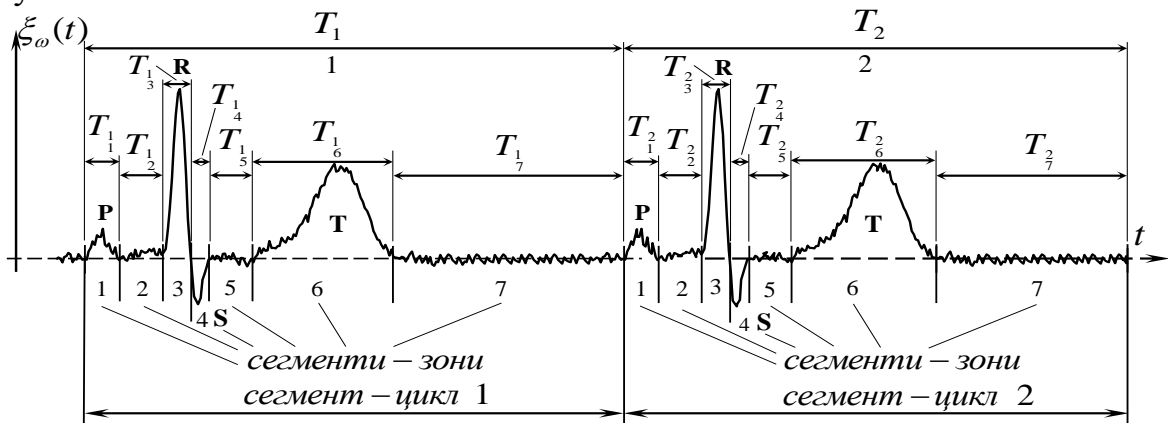


Рис. 4. Зображення циклічного сигналу з позначеною сегментною зонною структурою, типова реалізація електрокардіосигналу з позначеннями сегментів-циклів (два цикли) та сегментів-зон ($C = 2, Z = 7$), P, R, S, T – діагностичні сегменти-зони електрокардіосигналу – прийнято позначати у лікарській практиці

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

$$t_j = t_1 + \sum_{q=1}^{i-1} T_q + \sum_{q=1}^{j-1} T_q, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}. \quad (15)$$

Для сегментної циклічної структури (див. рис. 1), оскільки вона вкладена в сегментну зонну структуру, початок першого циклу і початок першої зони в першому циклі сегментної зонної структури (див. рис. 2) співпадають, тобто $t_1 = t_1$. 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, будемо визначати через тривалості сегментів-зон у циклі

$$t_{j+1} = t_j + T_j, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}. \quad (16)$$

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

$$T_i = \sum_{j=1}^Z T_j, i = \overline{1, C}. \quad (17)$$

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

$$T_j = t_{j+1} - t_j, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}. \quad (18)$$

Для випадку аналогового сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, область визначення \mathbf{W}_j j -ого сегмента-зони в i -му сегменті-циклі визначаємо через часовий або просторовий півінтервал (5), який задається двома величинами – початком t_j та закінченням t_{j+1} j -го сегмента-зони в i -му сегменті-циклі циклічного сигналу. Для випадку дискретного сигналу, тобто $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, область визначення i -го сегмента-циклу визначаємо через множину дискретних часових відліків (6).

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

$$\mathbf{W}_i = \bigcup_{j=1}^Z \mathbf{W}_j, \mathbf{W}_j \cap \mathbf{W}_q = \emptyset, j \neq q, j, q = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}. \quad (19)$$

Область визначення циклічного сигналу \mathbf{W} дорівнює об'єднанню областей визначення сегментів-циклів \mathbf{W}_i або об'єднанню областей визначення сегментів-зон \mathbf{W}_j на циклах, що не перетинаються,

$$\mathbf{W} = \bigcup_{i=1}^C \mathbf{W}_i = \bigcup_{i=1}^C \bigcup_{j=1}^Z \mathbf{W}_j, \mathbf{W}_i \neq \emptyset, j = \overline{1, Z}, i = \overline{1, C}. \quad (20)$$

Оскільки сегментна зонна структура вкладена в сегментну циклічну структуру, то має місце зв'язок між початками і закінченнями відліків сегментів-зон та сегментів-циклів:

$$t_1 = t_1, t_{i+1} = t_{i+1}, i = \overline{1, C}. \quad (21)$$

Сегментні структури $\hat{\mathbf{D}}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$ та $\hat{\mathbf{D}}_z = \{t_j, j = \overline{1, Z}\}$ пов'язані з ритмічними структурами через урахування їх відліків. Дискретна ритмічна циклічна структура $\{\hat{T}(t_i, n), i = \overline{1, C}\}$ та дискретна ритмічна зонна структура $\{\hat{T}(t_j, n), j = \overline{1, Z}\}$ є формальним описом ритму циклічного сигналу. На практиці в системах цифрової обробки даних проводять опрацюванням циклічного сигналу 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 $n = 1$.

У роботах Лупенка С.А. описано властивості неперервної та дискретної функції ритму, циклічної детермінованої (циклічної числової функції) та циклічної стохастичної (циклічного випадкового процесу) функцій. У даній роботі вживаємо термін «ритмічна структура» (що є синонімом дискретної функції ритму), оскільки вона має важливий зв'язок із відповідною їй сегментною структурою. Покажемо, як формується дискретна ритмічна структура циклічного сигналу (дискретна функція ритму) для сегментної структури, наведеної на рисунках 1 та 2.

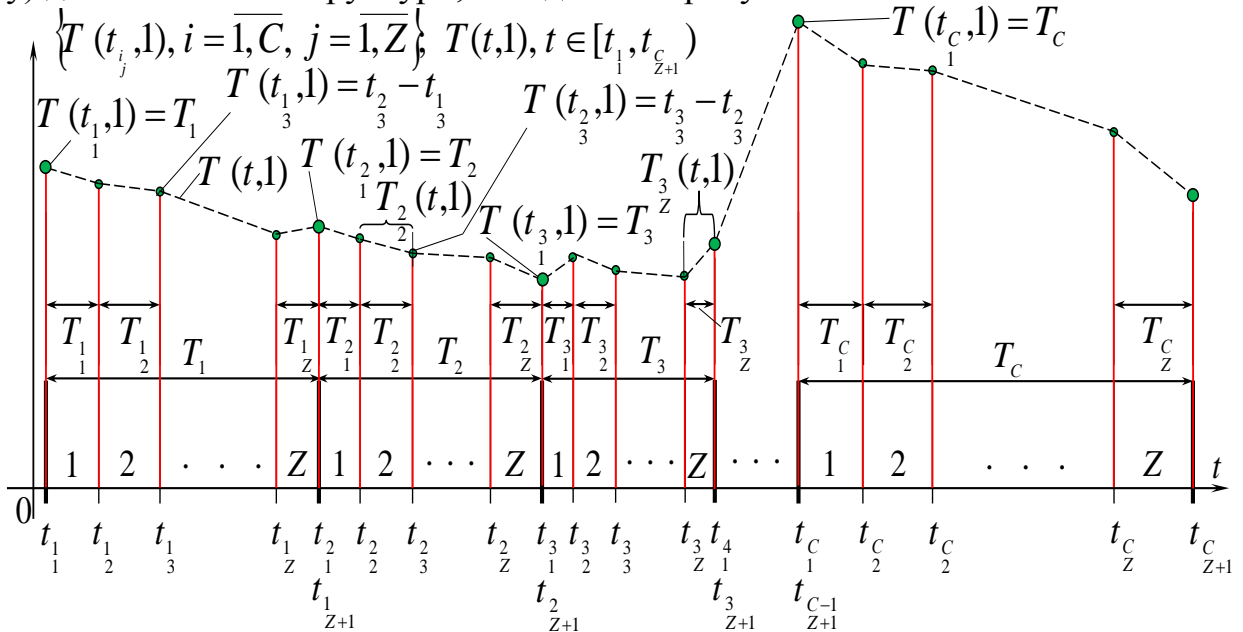


Рис. 5. Схематичне зображення ритмічної структури (дискретної функції ритму) та неперервної функції ритму циклічного сигналу (неперервна функція ритму – кусково-лінійна, позначена пунктиром)

Дискретну ритмічну структуру для випадку сегментної циклічної структури дискретного сигналу (див. рис. 1), коли $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, формуємо так:

$$\hat{T}(t_i, n) = t_{i+n} - t_i, i = \overline{1, C}, n \in \mathbf{Z}. \quad (22)$$

Дискретну ритмічну структуру для випадку сегментної зонної структури дискретного сигналу (див. рис. 2), коли $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, формуємо так:

$$\hat{T}(t_j, n) = t_{j+n} - t_j, j = \overline{1, Z}, n \in \mathbf{Z}. \quad (23)$$

Як приклад, на рисунку 5 схематично зображено дискретну ритмічну зонну

структуру, яка відповідає сегментній зонній структурі (див. рис. 2).

Під час аналізу ритму ЦС, 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 $T = \text{const} > 0$ – 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 це, відзначимо, якщо значення неперервної функції ритму дорівнюють $T(t, n) = n \cdot T$ – ритм є стабільним; у протилежному випадку, коли $T(t, n) \neq n \cdot T$ – ритм є змінним. Також справедливе таке твердження: якщо проведено оцінювання ритму і встановлено, що він є стабільним, тобто була визначена величина періоду ($T = \text{const} > 0$), то для такого циклічного сигналу (періодичного сигналу) можна визначити неперервну функцію ритму, яка дорівнює

$$T(t, n) = n \cdot T, \quad t \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}. \quad (24)$$

Оскільки розроблені в роботі методи побудовано на використаній математичній моделі циклічної функції, наведеної в роботах Лупенка С.А., необхідно сказати за характеристики моделі (фаза та атрибут), які є важливими й використовуються при побудові методології сегментації та нових методів сегментації (ідентифікації сегментних структур) на її основі.

Фаза – характеризує стадію 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

$$f_{\varphi_i}^\alpha = f(t_{i,l}), \quad f_{\varphi_j}^\alpha = f(t_{j,l}), \quad \alpha = l = \overline{1, L}, \quad i = \overline{1, C}, \quad j = \overline{1, Z}, \quad (25)$$

де $f_{\varphi_i}^\alpha$ або $f_{\varphi_j}^\alpha$ – множина фаз, тобто упорядковане за індексом α розбиття циклічного сигналу.

Атрибут – характеризує упорядкований за множиною циклів сигнал, який має властивість подібності, еквівалентності між сегментами-циклами та сегментами-зонами. Прикладом атрибуту є рівність значень усіх однофазних відліків у різних циклах детермінованого циклічного сигналу

$$p(f(t)) = p(f(t + T(t, n))) \in \mathbf{A}, \quad t \in \mathbf{W}, n \in \mathbf{Z}, \quad (26)$$

де \mathbf{A} – множина можливих значень атрибутів.

На рисунку 6 схематично зображено циклічний сигнал та позначення сегментної зонної структури. Оскільки дана структура є вкладеною в сегментну циклічну структуру, то для даного прикладу відліки зонної структури, а саме $t_{1,1}$, $t_{2,1}$, $t_{3,1}$ (на рис. 6 не показано), відліки циклів відповідають $t_1 = t_{1,1}$, $t_2 = t_{2,1}$, $t_3 = t_{3,1}$. Така відповідність стосується і фаз, тобто $f_{\varphi_{t_1}} = f_{\varphi_{t_{1,1}}}$, $f_{\varphi_{t_2}} = f_{\varphi_{t_{2,1}}}$, $f_{\varphi_{t_3}} = f_{\varphi_{t_{3,1}}}$ для сегментної зонної та сегментної циклічної структур відповідно.

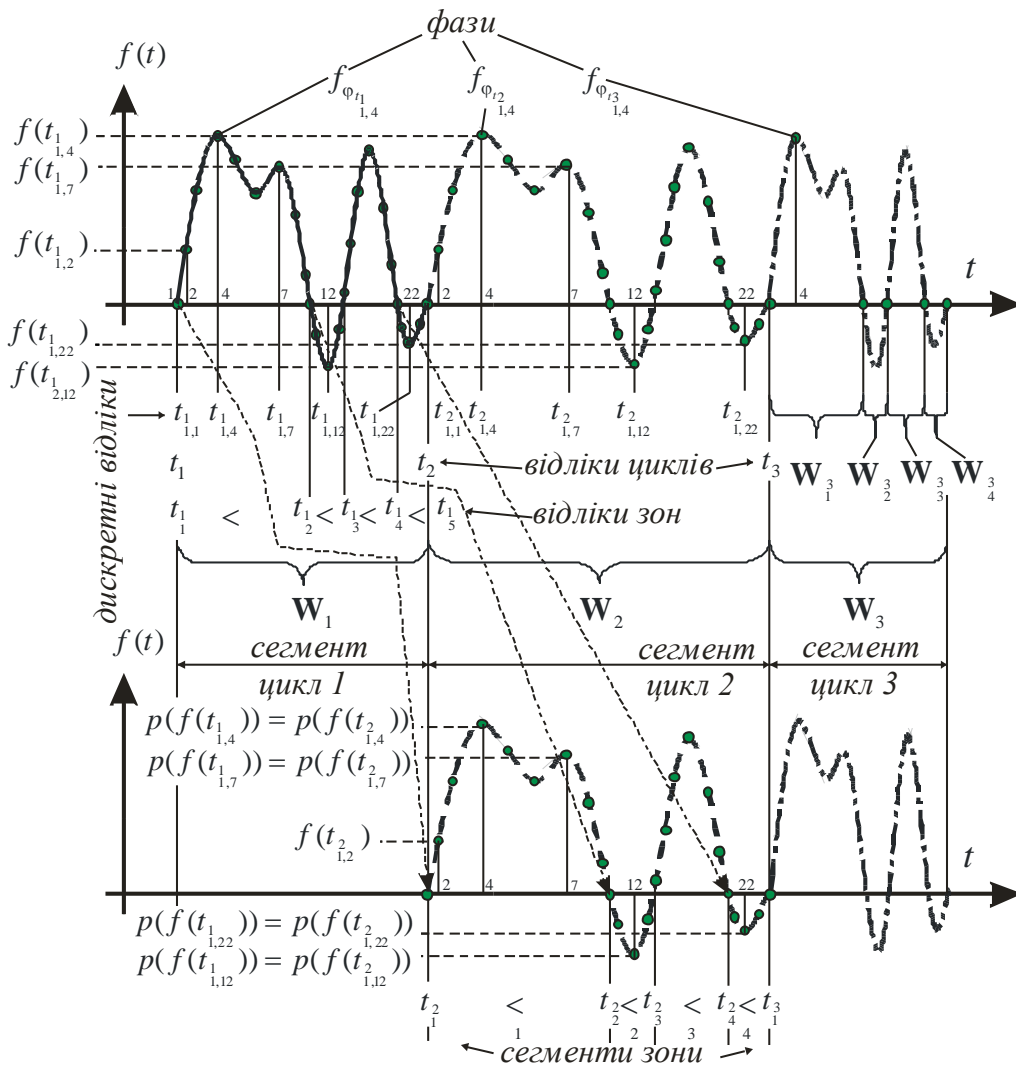


Рис. 6. Схематичне зображення циклічного сигналу з позначеннями ізоморфізму, що відображено між його сегментами, позначено вибіркові моменти часу, приклади однофазних значень (фаз циклічного сигналу), приклади атрибутів (для даного випадку рівні значення сигналу), області визначень сегментів-циклів та сегментів-зон ($C = 3, Z = 4$)

Для опису циклічного сигналу, який має сегментну циклічну структуру, необхідно знати розбиття $\mathbf{W}_w^c = \{\mathbf{W}_i \subset \mathbf{W}, i = \overline{1, C}\}$ області визначення \mathbf{W} на ізоморфні відносно порядку множини (коли $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, то $\mathbf{W}_i = [t_i, t_{i+1}), i = \overline{1, C}$ ($0 < t_{i+1} - t_i < \infty, i = \overline{1, C}$), а коли $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, то $\mathbf{W}_i = \{t_{i,l}\}, i = \overline{1, C}, l = \overline{1, L}, L = const \in \mathbf{N}$ ($0 < t_{i+1,1} - t_{i,1} < \infty, i = \overline{1, C}$). Для опису циклічного сигналу, який має сегментну зонну структуру, необхідно знати розбиття $\mathbf{W}_w^z = \{\mathbf{W}_j \subset \mathbf{W}_i \subset \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ області визначення \mathbf{W} на ізоморфні відносно порядку множини (коли $\mathbf{W} = \mathbf{R}$, то $\mathbf{W}_j = [t_j, t_{j+1}), j = \overline{1, Z}$ ($0 < t_{j+1} - t_j < \infty, j = \overline{1, Z}$), а коли $\mathbf{W} = \mathbf{D}$, то $\mathbf{W}_j = \{t_{j,l}\}, j = \overline{1, Z}, l = \overline{1, L_j}, L = const \in \mathbf{N}, L = \sum_{j=1}^Z L_j, (0 < t_{i+1,1} - t_{i,1} < \infty, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z})$.

Враховуючи описане вище, 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 просторових відліків $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$ виконувались умови бієкції встановлених відліків меж сегментів-циклів, строге їх упорядкування, тобто ізоморфізм відносно порядку відліків (27), які відповідають сегментам-циклам, а також рівність атрибутів однофазних відліків сегментів-циклів (28), тобто:

$$t_i \leftrightarrow t_{i+1}, \dots; t_{i+1} > t_i, t_i \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, \quad (27)$$

$$p(f(t_i)) = p(f(t_{i+1})) \in \mathbf{A}, t_i \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}. \quad (28)$$

Аналогічним чином сформульовано постановку завдання сегментації циклічного сигналу з сегментною циклічною структурою через урахування його фаз. Вона полягає у знаходженні невідомої множини часових або просторових відліків i -х сегментів-циклів $\mathbf{D}_c = \{t_i, i = \overline{1, C}\}$, що аналогічно знаходженню множини однофазних значень $\mathbf{A}_{\varphi_\alpha}$, які відповідають межах цих сегментів-циклів, тобто

$$\mathbf{A}_{\varphi_\alpha} = \{f(t_i^\alpha): t_i^\alpha \leftrightarrow t_i^\alpha, i_1 = const, i \in \mathbf{Z}\}. \quad (29)$$

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

$\mathbf{D}_z = \{t_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, що аналогічно знаходженню розбиття

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

необхідно, щоб для визначеної множини моментів часу або просторових відліків

$\mathbf{D}_z = \{t_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ виконувались умови бієкції встановлених відліків меж

сегментів-зон, строге їх упорядкування, тобто ізоморфізм відносно порядку відліків (30), які відповідають сегментам-зонам, а також рівність атрибутів однофазних відліків сегментів-зон (31), тобто:

$$t_j \leftrightarrow t_{j+1}, \dots; t_{j+1} > t_j, t_j \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, \quad (30)$$

$$p(f(t_j)) = p(f(t_{j+1})) \in \mathbf{A}, t_j \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}. \quad (31)$$

Аналогічним чином сформульовано постановку завдання сегментації циклічного сигналу з сегментною зонною структурою через урахування його фаз. Вона полягає у знаходженні невідомої множини часових або просторових відліків

j -х сегментів-зон у i -х сегментах-циклів $\mathbf{D}_z = \{t_j, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$, що аналогічно

знаходженню множини однофазних значень $\mathbf{A}_{\varphi_\alpha}$, які відповідають межах цих сегментів-зон, тобто

$$\mathbf{A}_{\varphi_\alpha} = \left\{ f\left(t_{j_1}^\alpha\right): t_{j_1}^\alpha \leftrightarrow t_{j_1}^\alpha, j_1 = const, i, j \in \mathbf{Z} \right\}. \quad (32)$$

Враховуючи постановку завдання сегментації, побудовано методологію сегментації ЦС та розроблена система методів на її основі.

У третьому розділі розроблено методологію сегментації циклічних сигналів у рамках детермінованого та стохастичного підходів до їх моделювання. На основі цієї методології розроблено систему методів ідентифікації сегментних структур циклічних сигналів. Проведено оцінювання точності розроблених методів сегментації. Наведено результати застосування розроблених методів у різних галузях: медицині, механіці, економіці, а саме, результати сегментації циклічних кардіосигналів, циклічних механічних процесів рельєфних утворень поверхні металів та циклічних економічних процесів.

В основу методології сегментації покладено чотири принципи, які враховують такі факти: повторюване розгортання у часі чи просторі структури циклічного явища (феноменологічна властивість); можливої наявності у циклічній структурі сегментної зонної структури, яка повторюється на всіх його циклах; урахування у використаній математичній моделі ізоморфізмів відносно порядку відліків циклічних сигналів у всіх його сегментах-циклах та сегментах-зонах; наявність зв'язку сегментних та ритмічних структур, який подано формулами (22) та (23). Останній факт дає змогу проводити оцінювання ритму циклічного сигналу, попередньо ідентифікувавши його сегментну структуру.

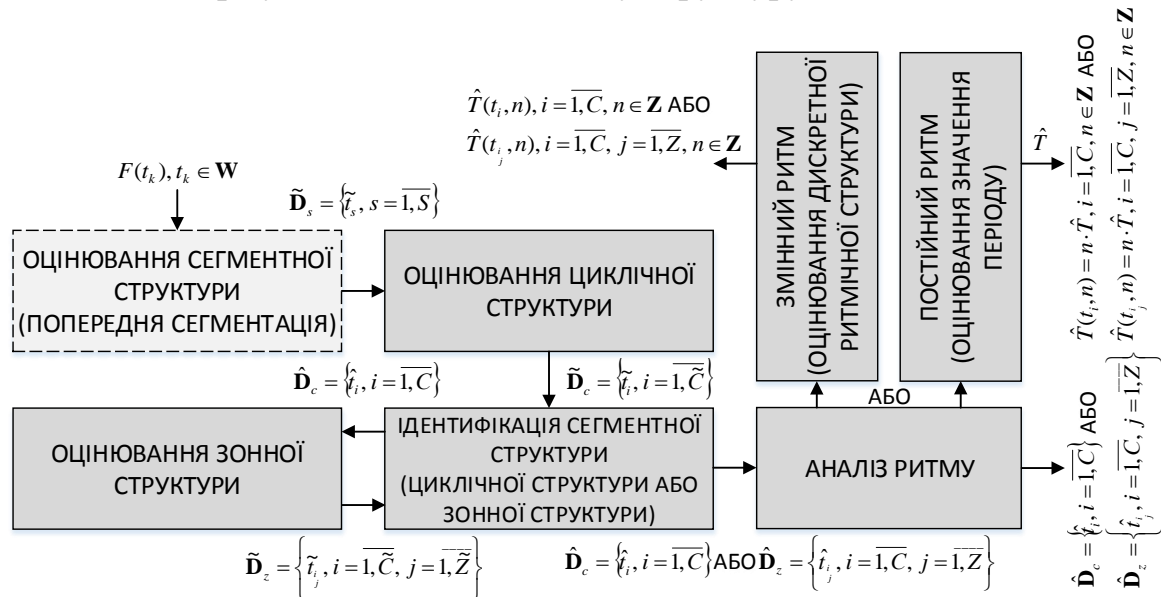


Рис. 7. Узагальнена структурна схема методології сегментації циклічних сигналів (ідентифікації сегментних структур)

Перелічені принципи є обґрунтованими, оскільки впливають із феноменологічних властивостей циклічних сигналів та математично формалізовані, що дозволяє будувати на чіткій математичній основі методи сегментації різних циклічних сигналів, враховуючи як детермінований, так і стохастичний підходи до їх моделювання. На рисунку 7, у вигляді структурної схеми, наведено методологію сегментації циклічних сигналів (ідентифікації сегментних структур). Враховуючи дану структуру, розроблено нові методи сегментації в рамках двох підходів детермінованого та стохастичного, які об'єднані узагальненою структурою. Для прикладу, на рисунку 8 наведено розроблений метод сегментації на основі урахування математичної моделі у вигляді детермінованої циклічної числової функції дискретного аргументу. Сегментну структуру $\tilde{D}_s = \{\tilde{t}_s, s = \overline{1, S}\}$, за даним методом, оцінено на основі визначення адаптивного порогу (попередня сегментація)

$$f_{aver} = \frac{Max f_d(t_k) - Min f_d(t_k)}{2} + Min f_d(t_k), t \in \mathbf{W}, \quad (33)$$

де $Max f_d(t_k), Min f_d(t_k)$ – максимальне та мінімальне значення досліджуваного циклічного сигналу. Попередня сегментація дозволяє отримати множину меж сегментів $\tilde{\mathbf{D}}_s = \{\tilde{t}_s, s = \overline{1, S}\}$. Далі оцінюємо циклічну структуру $\tilde{\mathbf{D}}_c = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, \tilde{C}}\}$, визначаємо множину відліків серед отриманих відліків меж сегментів, рівних за атрибутами. Для цього урахувавши (28), перевірено умову рівності за атрибутом

$$\tilde{t}_g = \begin{cases} \tilde{t}_s, \text{ якщо } p(f_d(\hat{t}_1)) = p(f_d(\tilde{t}_s)) \in \mathbf{A}, g = 2, \dots, s = \overline{2, S}, \\ \tilde{t}_s - \text{ відлік не враховується, в іншому випадку,} \end{cases} \quad (34)$$

де \hat{t}_1 – відлік початку циклу в досліджуваному сигналі, тобто $\hat{t}_1 = \tilde{t}_i = \tilde{t}_s, i, s = 1$.

Урахувавши умови (27) та (28), перевіряємо однаковість фазової структури на сегментах

$$\tilde{t}_i = \begin{cases} \tilde{t}_g, \text{ якщо } \begin{cases} p(f_d(\hat{t}_1 + l)) = p(f_d(\tilde{t}_g + l)), g = \overline{2, G-1}, \tilde{t}_g \leq l \leq \tilde{t}_{g+1}, \\ \hat{t}_1 + l < \tilde{t}_g + l, g = \overline{2, G-1}, l - \text{ відліки в межах сегмента - циклу,} \end{cases} \\ \tilde{t}_g - \text{ відлік не враховується, в іншому випадку.} \end{cases} \quad (35)$$

Отримуємо множину часових відліків $\tilde{\mathbf{D}}_c = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, \tilde{C}}\}$, які відповідають початкам сегментів-циклів, де \tilde{C} – кількість попередньо оцінених циклів.

При ідентифікації сегментної циклічної чи сегментної зонної структури перевіряються дві умови: якщо для отриманих на основі (34) та (35) 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, ідентифіковано сегментну циклічну структуру – $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, C}\}$. У такому випадку переходимо до аналізу ритму. Якщо виконується рівність $p(f_d(\tilde{t}_1)) = p(f_d(\tilde{t}_3)) = p(f_d(\tilde{t}_5)) = \dots = p(f_d(\tilde{t}_i)) = \dots = p(f_d(\tilde{t}_{\tilde{C}})), i = \overline{1, \tilde{C}}$, то $p(f_d(\tilde{t}_1)), p(f_d(\tilde{t}_3)), p(f_d(\tilde{t}_5))$ ідентифікуємо 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 оцінюємо сегментну зонну структуру, врахувавши (31), перевіряємо умову рівності за атрибутом

$$\tilde{t}_j = \begin{cases} \tilde{t}_j, \text{ якщо } p(f_d(\hat{t}_1)) = p(f_d(\tilde{t}_s)) \in \mathbf{A}, g = 2, \dots, s = \overline{2, S}, j = 2, \dots, \\ \tilde{t}_j - \text{ відлік не враховується, в іншому випадку.} \end{cases} \quad (36)$$

При цьому приймаємо $\tilde{t}_i = \tilde{t}_j, i, j = 1$ – як відлік початку першої зони в першому циклі. Урахувавши умови (30) та (31), перевіряємо однаковість фазової структури на сегментах

$$\tilde{t}_i = \begin{cases} \tilde{t}_j, \text{ якщо } \begin{cases} p(f(\hat{t}_1 + l)) = p(f(\tilde{t}_g + l)), g = \overline{2, G-1}, \tilde{t}_g \leq l \leq \tilde{t}_{g+1}, i = 1, \dots, \\ \hat{t}_1 + l < \tilde{t}_g + l, g = \overline{2, G-1}, l - \text{ відліки в межах сегмента - зони,} \end{cases} \\ \tilde{t}_j - \text{ відлік не враховується, в іншому випадку.} \end{cases} \quad (37)$$

Отримуємо множину $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_i, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, \tilde{Z} + 1}\}$, яка містить лише відліки

сегментів-зон, де \tilde{Z} – кількість відліків зон, які уточнюються, враховуючи Евклідову метрику близькості. Оскільки кількість уточнених відліків та зон на циклах дорівнює $Z_i = Z$, то $\tilde{\mathbf{D}}_z = \{\tilde{t}_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$; де Z – кількість зон, для яких виконалася рівність за атрибутом, які знаходяться між відліками меж сегментів-циклів; Z_i – кількість зон на i -му циклі. Після того, як ідентифікована сегментна зонна структура та уточнені її відліки $\mathbf{D}_z = \left\{t_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\right\}$ здійснюємо аналіз ритму.

Якщо $t_{i_{j+1}} - t_{i_j} = const = T - \text{неперіод}$ або $t_{i_{j+1}} - t_{i_j} = const$, $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$. Тобто маємо постійний ритм циклічного сигналу то проводимо оцінювання значення періоду згідно з формулою

$$\hat{T} = t_{i_{j+1}} - t_{i_j} \text{ або } \hat{T} = t_{i_{j+1}} - t_{i_j}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}. \quad (38)$$

Дискретна ритмічна структура, яка визначена через оцінений період для відліків сегментів-циклів згідно з (24) має вигляд $\hat{T}(t_i, n) = n \cdot \hat{T}, t_i \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, n \in \mathbf{Z}$; для визначених відліків сегментів-зон аналогічно до (24) $\hat{T}(t_{i_j}, n) = n \cdot \hat{T}, t_{i_j} \in \mathbf{W}, i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, n \in \mathbf{Z}$.

Якщо $t_{i_{j+1}} - t_{i_j} \neq const$ або $t_{i_{j+1}} - t_{i_j} \neq const$, $i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}$, то маємо змінний ритм циклічного сигналу. У випадку змінного ритму формується дискретна ритмічна структура, урахувавши визначені відліки сегментів-циклів згідно з (22), а дискретна ритмічна зонна структура формується, урахувавши визначені відліки сегментів-зон згідно з (23).

Враховуючи структурну схему (див. рис. 7), на рисунку 8 наведено структуру алгоритмічного забезпечення методу сегментації детермінованих циклічних сигналів, моделлю яких є циклічна числова функція дискретного аргументу. Аналогічну структуру має метод сегментації стохастичних циклічних сигналів, моделлю яких є циклічний випадковий процес. Відмінність його структури полягає у блоці «Оцінювання сегментної структури (попередня сегментація)» та у блоці «Оцінювання циклічної структури», де додається блок «Оцінювання відліків циклів за метрикою близькості». Для такої попередньої сегментації циклічних сигналів (стохастичний підхід) використовується перетворення сигналу методом Бродського-Дарховського, який ґрунтується на статистиці

$$S(t_m) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_{\omega}(t_k) - \frac{1}{K-m} \sum_{k=m+1}^K \xi_{\omega}(t_k), m = \overline{1, K-1}, k = \overline{1, K}, t_k \in \mathbf{W}, \quad (39)$$

де $S(t_m)$, $m = \overline{1, K-1}$ – значення статистики, яка є чутливою до змін математичного сподівання випадкового процесу. В такому випадку при побудові методів сегментації ЦС, моделлю яких є циклічні випадкові процеси, структура блоку «Оцінювання сегментної структури (попередня сегментація)» має вигляд, наведений на рисунку 9. Блок «Оцінювання сегментної структури (попередня сегментація)» побудований з урахуванням інших відомих підходів та методів, наприклад, пошуку розладок, які реагують на зміни ймовірнісних характеристик циклічних випадкових процесів.

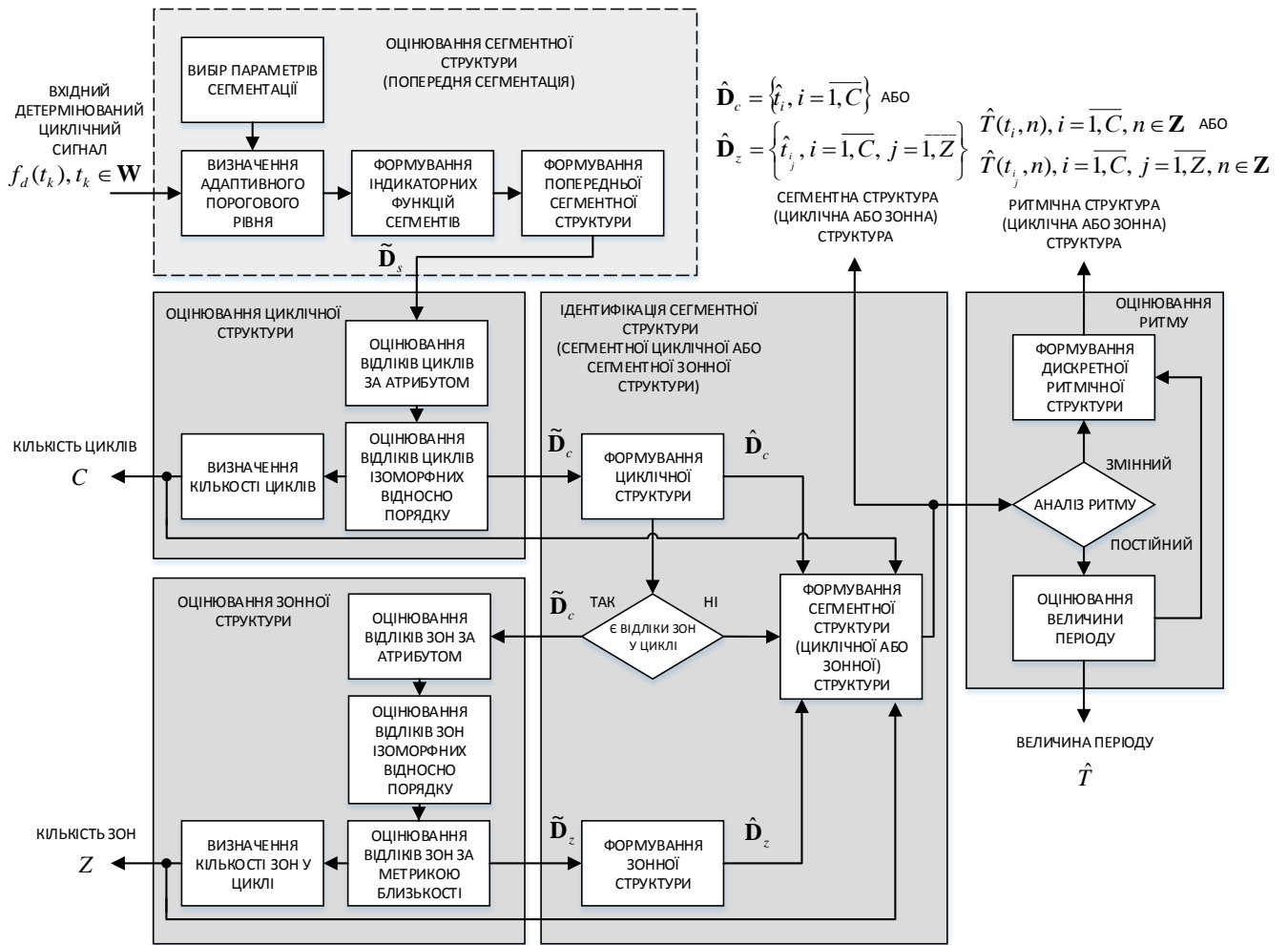


Рис. 8. Структурна схема алгоритмічного забезпечення методу сегментації детермінованих циклічних сигналів

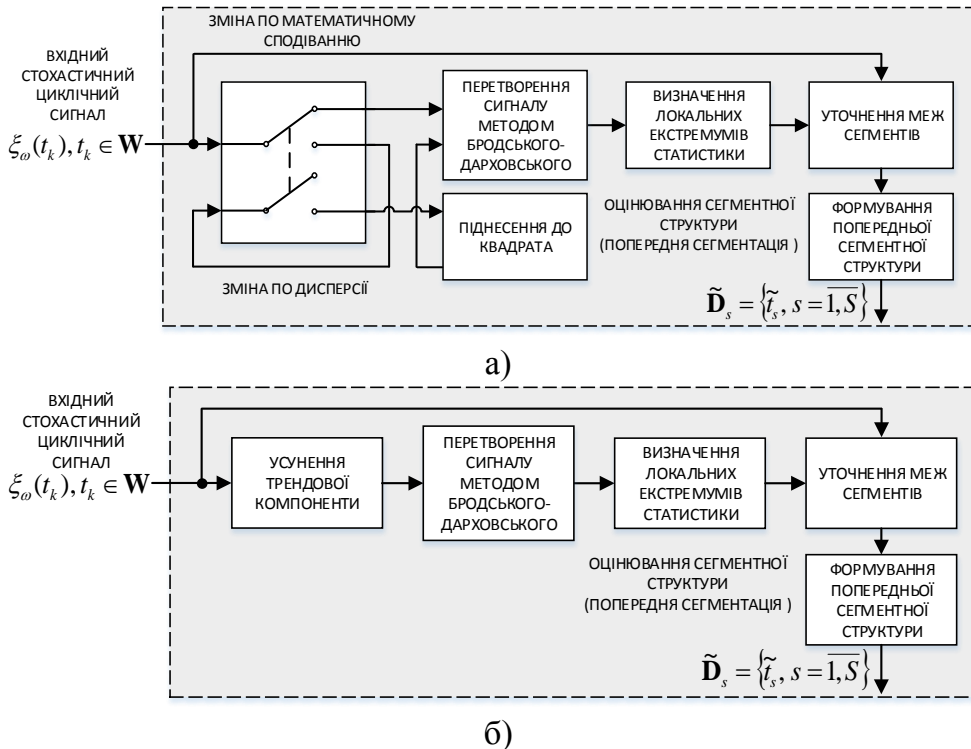


Рис. 9. Блоки оцінювання сегментної структури (попередня сегментація): а) для сегментації реалізацій випадкових процесів з можливістю вибору тих ймовірнісних характеристик, за якими відбувається різка зміна (математичне сподівання чи дисперсія); б) для сегментації реалізацій випадкового процесу із незалежними циклічними приростами

На рисунку 10, як приклад, наведено результати сегментації циклічних сигналів розробленими методами.

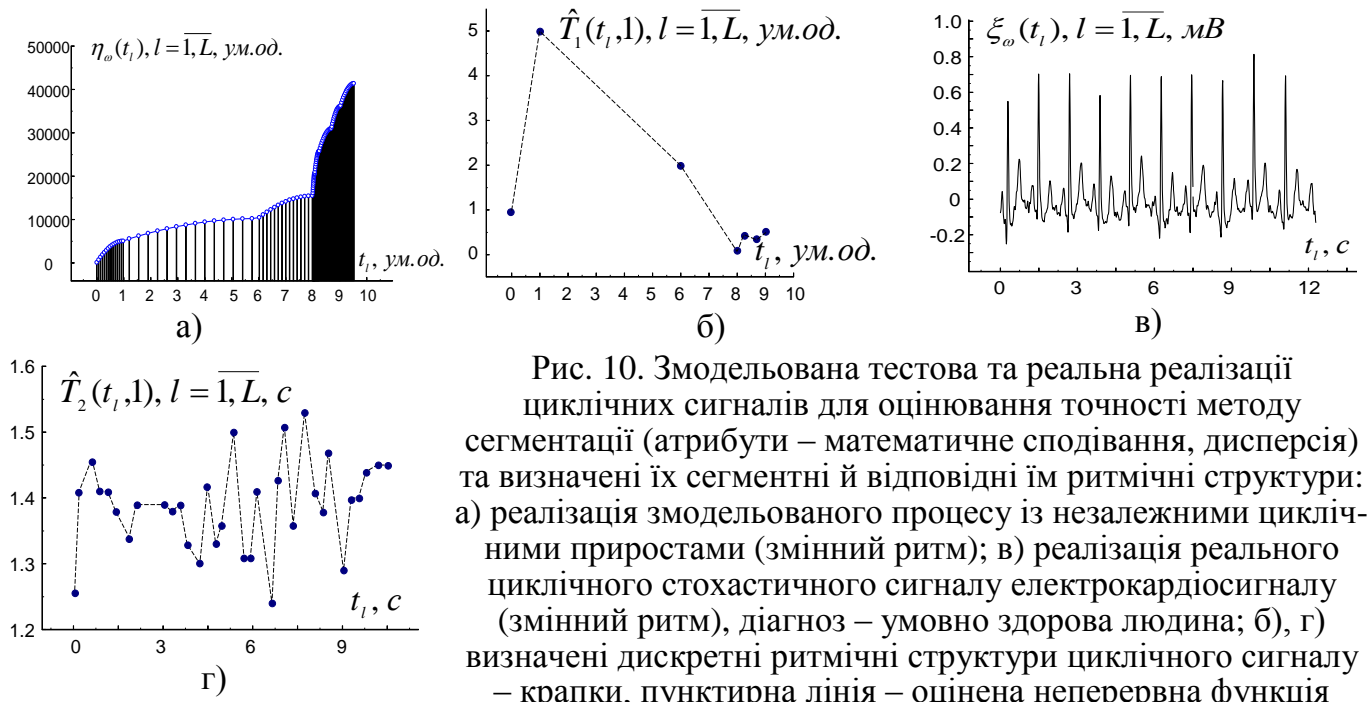


Рис. 10. Змодельована тестова та реальна реалізації циклічних сигналів для оцінювання точності методу сегментації (атрибути – математичне сподівання, дисперсія) та визначені їх сегментні й відповідні їм ритмічні структури: а) реалізація змодельованого процесу із незалежними циклічними приростами (змінний ритм); в) реалізація реального циклічного стохастичного сигналу електрокардіосигналу (змінний ритм), діагноз – умовно здорова людина; б), г) визначені дискретні ритмічні структури циклічного сигналу – крапки, пунктирна лінія – оцінена неперервна функція ритму, кусково-лінійна

Для оцінювання точності розроблених методів сегментації проведено експерименти з моделювання циклічних сигналів. При цьому в тестові реалізації закладено інформацію про різні сегментні та відповідні їм ритмічні структури. Середньоквадратичні похибки сегментації, абсолютну та відносну, визначали за формулами:

$$\Delta(t_k) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (t_l - \hat{t}_l)^2}; \quad \delta(t_k) = \frac{\Delta(t_k)}{\sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{t}_l^2}}, \quad k = \overline{1, L}, \quad (40)$$

де t_l – елемент змодельованої дискретної ритмічної структури (використаної для моделювання циклічного сигналу); \hat{t}_l – елемент визначеної сегментної структури розробленим методом сегментації; L – кількість відліків дискретної ритмічної структури, $l = \overline{1, L}$; k – відлік для середньоквадратичної абсолютної та відносної похибок, $k = \overline{1, L}$.

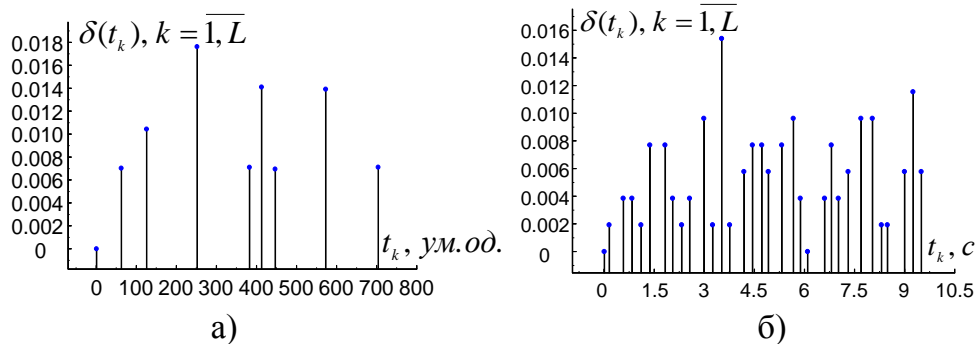


Рис. 11. Середньоквадратичні відносні похибки визначених відліків сегментних структур циклічних сигналів: а) для змодельованої реалізації циклічного стохастичного сигналу (змінний ритм); б) для реалізації електрокардіосигналу, діагноз – умовно здорова людина

На рисунку 11, як приклад, наведено результати отриманих середньоквадратичних відносних похибок сегментації. З отриманих результатів

впливає, що середньоквадратична відносна похибка відліків сегментних структур циклічних сигналів розробленими методами складає 5–8% і є меншою у порівнянні з результатами, отриманими відомими методами, наприклад, методами, в основу яких покладено визначення різницевої функції першого та другого порядку при сегментації електрокардіосигналу, для яких вона складає 10–15%.

Відомості про ідентифіковані сегментні структури дозволили розробити методи ідентифікації ритмічних структур досліджуваних циклічних сигналів.

У четвертому розділі розроблено методи ідентифікації ритмічних структур циклічних сигналів. Описано математичне забезпечення розроблених методів її оцінювання за допомогою методів змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної функції; 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 дисертаційній роботі розроблено методи оцінювання функції ритму на основі інтерполяції дискретної ритмічної структури різними сплайнами. Інтерполяційна функція $\hat{T}(t,1)$ дискретної ритмічної структури $\{\hat{T}(t_i,1), i = \overline{1, C}\}$ або $\{\hat{T}(t_{i_j},1), i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}\}$ буде мати вигляди за умови наявності:

- ідентифікованої дискретної ритмічної циклічної структури

$$\hat{T}(t,1) = \sum_{i=1}^C \hat{T}_i(t,1), t \in \mathbf{W}; \quad (41)$$

- ідентифікованої дискретної ритмічної зонної структури

$$\hat{T}(t,1) = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^Z \hat{T}_{i_j}(t,1), t \in \mathbf{W}, \quad (42)$$

де $\{\hat{T}_i(t,1)\}$, $\{\hat{T}_{i_j}(t,1)\}$ – множини інтерполяційних кривих, які відповідно дорівнюють:

- при використанні змішаної інтерполяції на основі квадратичного сплайна та кусково-лінійної функції

$$\hat{T}_i(t,1) = \begin{cases} a_i \cdot (t - t_i)^2 + b_i \cdot (t - t_i) + c_i, & \text{якщо } \hat{T}_i'(t,1) > -1, \\ k_i \cdot t + m_i, & \text{якщо } \hat{T}_i'(t,1) \leq -1, \end{cases} \quad (43)$$

$$\hat{T}_{i_j}(t,1) = \begin{cases} a_{i_j} \cdot (t - t_{i_j})^2 + b_{i_j} \cdot (t - t_{i_j}) + c_{i_j}, & \text{якщо } \hat{T}_{i_j}'(t,1) > -1, \\ k_{i_j} \cdot t + m_{i_j}, & \text{якщо } \hat{T}_{i_j}'(t,1) \leq -1; \end{cases} \quad (44)$$

- при використанні змішаної інтерполяції на основі кубічного сплайна та кусково-лінійної функції

$$\hat{T}_i(t,1) = \begin{cases} d_i \cdot (t - t_i)^3 + a_i \cdot (t - t_i)^2 + b_i \cdot (t - t_i) + c_i, & \text{якщо } \hat{T}_i'(t,1) > -1, \\ k_i \cdot t + m_i, & \text{якщо } \hat{T}_i'(t,1) \leq -1, \end{cases} \quad (45)$$

$$\hat{T}_{i_j}(t,1) = \begin{cases} d_{i_j} \cdot (t - t_{i_j})^3 + a_{i_j} \cdot (t - t_{i_j})^2 + b_{i_j} \cdot (t - t_{i_j}) + c_{i_j}, & \text{якщо } \hat{T}_{i_j}'(t,1) > -1, \\ k_{i_j} \cdot t + m_{i_j}, & \text{якщо } \hat{T}_{i_j}'(t,1) \leq -1. \end{cases} \quad (46)$$

Коефіцієнти інтерполяційних поліномів визначаються відомими методами, наприклад, при визначенні коефіцієнтів кубічного сплайну використовується метод прогонки (метод Томаса). При застосуванні розроблених методів враховується важлива властивість неперервної функції ритму, а саме, похідна по часу інтерполянти має бути більше -1. При невиконанні цієї умови, за рахунок отриманих коефіцієнтів, інтерполяція на відповідному сегменті замінюється на кусково-лінійну, для якої ця умова завжди виконується. Вибір того чи іншого методу оцінювання ритмічної структури буде гарантовано коректним, якщо буде відомий тип інтерполяційної залежності її значень (лінійної, кубічної чи квадратичної) у межах визначених відліків ідентифікованих сегментних структур. Проте така інформація є відсутньою.

Для прикладу, на рисунку 12 наведено структурну схему методу оцінювання ритмічної структури циклічного сигналу на основі змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції.

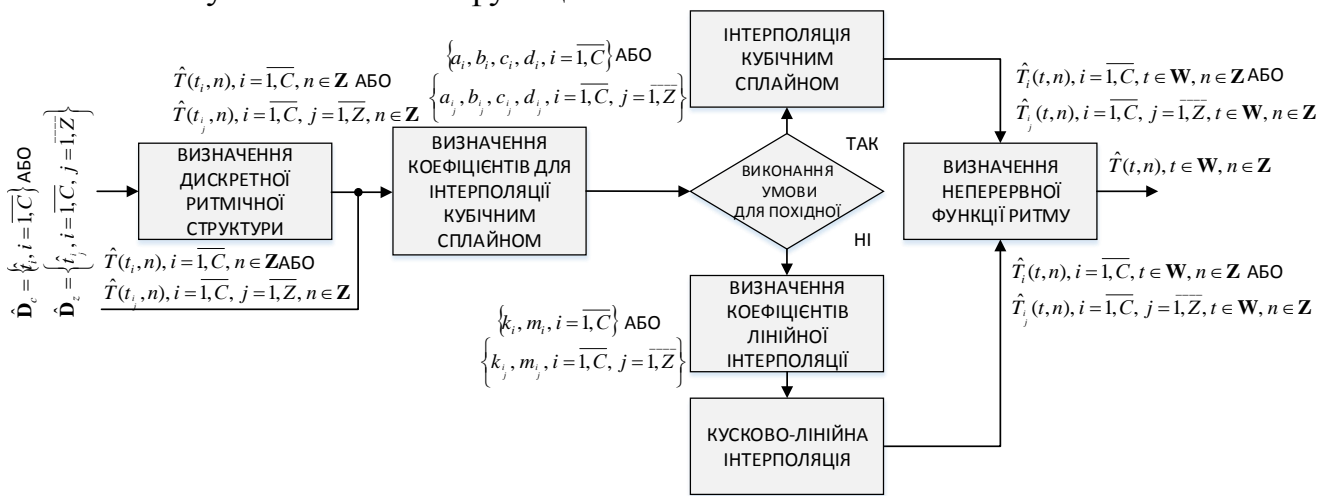


Рис. 12. Структурна схема методу оцінювання функції ритму циклічного сигналу методом змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції

Результати застосування розроблених методів оцінювання ритмічних структур циклічних сигналів наведено на рисунку 13.

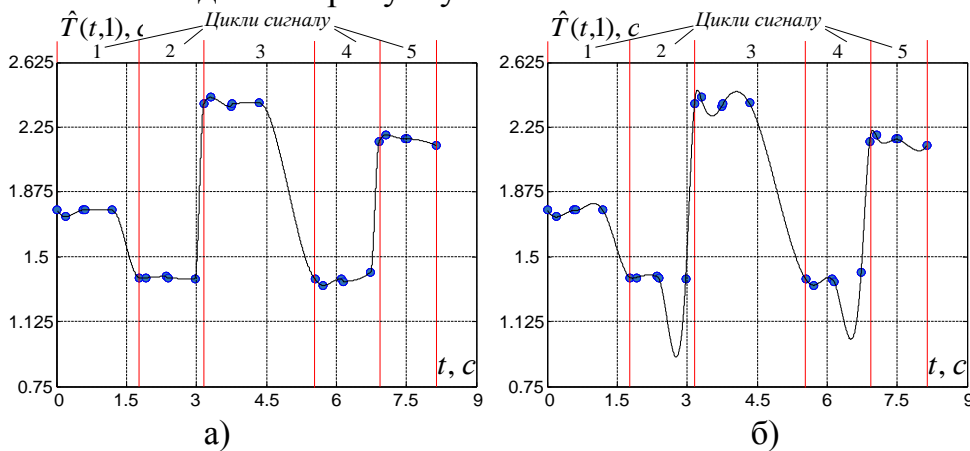


Рис. 13. Результати оцінювання дискретної ритмічної структури електрокардіосигналу (діагноз – умовно здорова людина): а) методом змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної функції; б) методом змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції

З метою підвищення точності оцінювання функції ритму циклічних сигналів

розроблено метод, що дозволяє отримати додаткові елементи (відліки) дискретної ритмічної структури циклічного сигналу. Першим кроком даного методу є моделювання циклічного сигналу, який ритмічно пов'язаний (має однакову ритмічну структуру з досліджуванним сигналом), шляхом незалежного масштабування репрезентативного циклу: першого циклу $f_1(t_k), t_k \in \mathbf{W}_1$ досліджуваного сигналу, у рамках детермінованого підходу, чи відомої оцінки математичного сподівання $\hat{m}_\xi(t_k), t_k \in \mathbf{W}_1$ у випадку стохастичного підходу з урахуванням дискретної ритмічної структури $\{\hat{T}(t_i, 1)\}$ або $\{\hat{T}(t_j, 1)\}$. Для прикладу, розглянемо випадок, що враховує ідентифіковану сегментну зонну структуру і відповідну їй дискретну ритмічну зонну структуру $\{\hat{T}(t_i, 1)\}$. Змасштабовані $\dot{f}_j(t)$ – j -ті сегменти-зони на i -их сегментах-циклах ритмічно пов'язаного циклічного сигналу з вхідним досліджуванним сигналом $F(t)$ послідовно «зшиваються» в одну реалізацію згідно з залежністю

$$\dot{f}(t) = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^Z \dot{f}_j(t), t \in \mathbf{W}. \quad (47)$$

Наступним кроком даного методу є послідовний вибір із змодельованої реалізації $\dot{f}(t)$ відліків першого циклу $\dot{f}_1(t), t \in \mathbf{W}_1$ і порівняння відповідних їм значень зі значеннями у наступних сегментах-циклах. Необхідно, щоб виконувались дві умови:

– умова рівності атрибутів (рівності значень), для даного випадку сегментної зонної структури, при цьому враховується той відлік $\tilde{t}_{j,g}$, $g = l$ як додатково визначений елемент ритмічної структури, якщо виконалася умова рівності атрибутів в усіх сегментах-зонах на різних сегментах-циклах:

$$p(\dot{f}_{j,1,l}(t_{1,l})) = p(\dot{f}_{j,1,l}(\tilde{t}_{2,l})) = \dots = p(\dot{f}_{j,1,l}(\tilde{t}_{i,l})) = \dots = p(\dot{f}_{j,1,l}(\tilde{t}_{c,l})), \quad i = \overline{2,C}, j = \overline{1,Z}, l = \overline{1,L}, \quad (48)$$

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 в реалізації циклічних сигналів, окрім першого його циклу;

– умова однотипності упорядкування відліків у відповідних сегментах-зонах на різних сегментах-циклах:

$$t_{j,g} \leftrightarrow t_{j+1,g}, \dots; t_{j,g} > t_{j+1,g}, t_{j,g} \in \mathbf{W}, i = \overline{1,C}, j = \overline{1,Z}, g = \overline{1,G}. \quad (49)$$

Якщо якась із двох наведених вище умов на одному із сегментів-зон не виконується, то відлік $\tilde{t}_{j,g} \neq t_{j,l}$ не враховується. Аналогічним чином подамо умови (48), (49) для вибору однофазних значень і відповідних їм відліків змодельованої реалізації, тобто

$$f_{\varphi_{11}} = f_{\varphi_{12}} = \dots = f_{\varphi_{1i}} = \dots = f_{\varphi_{1c}}, \quad i = \overline{1,C}, j = \overline{1,Z}, g = \overline{1,G}. \quad (50)$$

Після визначення всіх додаткових елементів (відліків) ритмічної структури

формуємо нову ритмічну зонну структуру, враховуючи визначені додаткові елементи (відліки), для випадку ідентифікованої сегментної зонної структури

$$\hat{T}(t_{j,g}, 1) = \tilde{t}_{j,g} - \tilde{t}_{j,g}, \quad i = \overline{1, C}, j = \overline{1, Z}, g = \overline{1, G}. \quad (51)$$

На рисунку 14 наведено структурну схему методу оцінювання ритмічної зонної структури шляхом визначення її додаткових елементів, а на рисунку 15, як приклад, отримані результати даним методом.

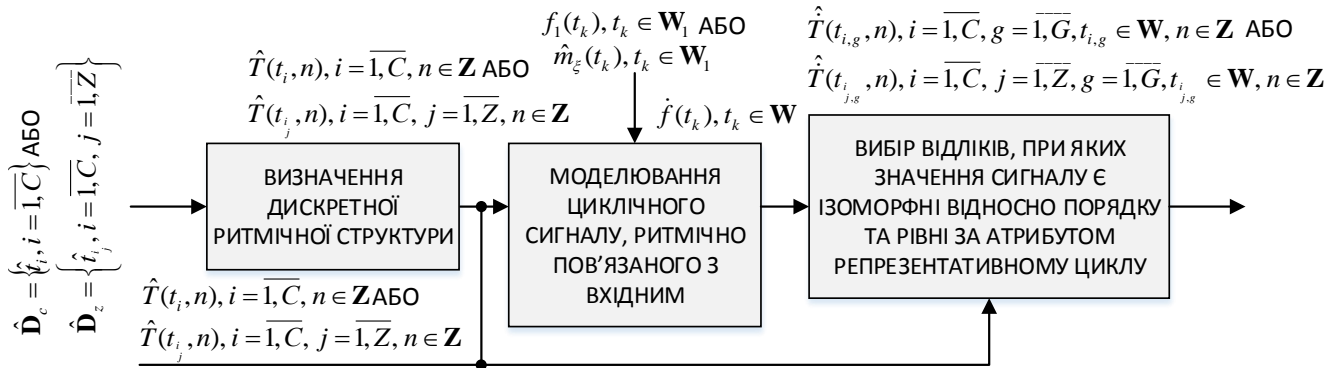


Рис. 14. Структурна схема методу оцінювання ритмічної структури шляхом визначення її додаткових елементів (відліків) циклічного сигналу

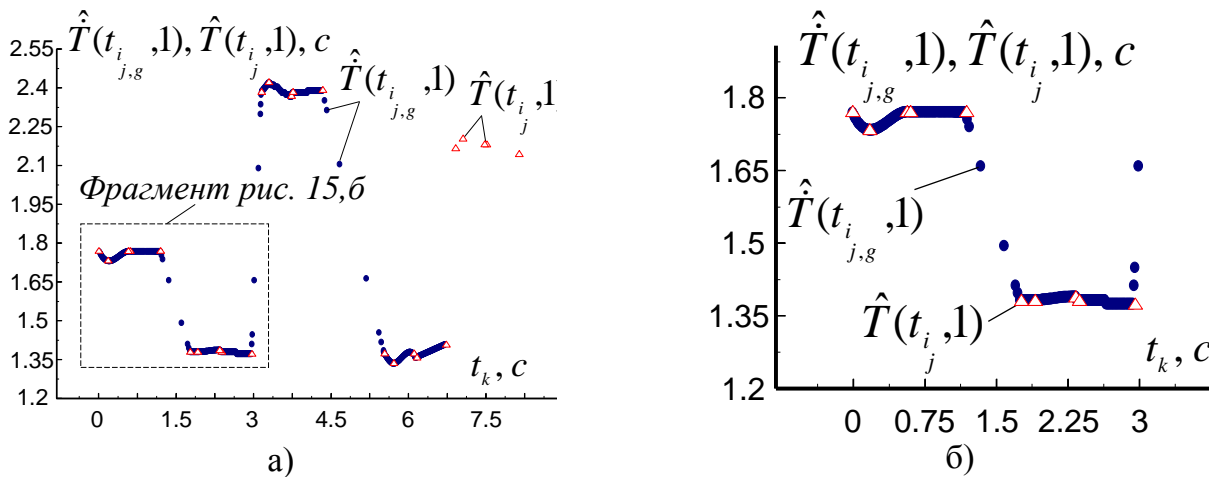


Рис. 15. Дискретна ритмічна структура, оцінена шляхом визначення її додаткових елементів (відліків) циклічного сигналу: а) дискретна ритмічна структура та визначені додаткові її елементи (крапки – визначені додаткові елементи ритмічної структури, 633 відліки; трикутники – відліки ритмічної структури (визначені методами сегментації, 24 відліки); б) збільшений фрагмент визначених додаткових елементів ритмічної структури

Даний метод дає змогу отримувати додаткові елементи ритмічної структури, кількість яких на порядок більше, ніж у випадку отриманої кількості відліків методами сегментації. Таким чином, маючи достатню кількість елементів нової ритмічної структури на відповідних сегментах, для даного прикладу – це $\{\hat{T}(t_{j,g}, 1), t_{j,g} \in \mathbf{W}\}$, розроблено метод оцінювання оптимального полінома на відповідному сегменті серед лінійного, квадратичного та кубічного поліномів. Для цього використано відомий метод найменших квадратів, урахувавши, що отримані дані $\{\hat{T}(t_{j,g}, 1), t_{j,g} \in \mathbf{W}\}$ наближаються многочленами $T_M(t_k), t_k \in \mathbf{W}$, степені $M = 1, 2, 3$, а саме:

$$T_M(t_k) = \sum_{m=0}^M b_m t_k^m, \quad t_k \in \mathbf{W}, \quad (52)$$

де $b_m, m = \overline{0, M}, M = 1, 2, 3$ – коефіцієнти для кожного многочлена $T_M(t_k), t_k \in \mathbf{W}$.

Для вибору оптимального полінома використано критерій для випадку ідентифікованої ритмічної зонної структури (53), при цьому $t_k \in \mathbf{W}_j$

$$\tilde{T}(t_k, 1) = \begin{cases} T_1(t_k), \text{ лінійний,} \\ T_2(t_k), \text{ квадратичний, для якого } \min \\ T_3(t_k), \text{ кубічний,} \end{cases} \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{g=1}^G \left(\hat{T}(t_{i,j,g}, 1) - T_1(t_k) \right)^2}, \\ \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{g=1}^G \left(\hat{T}(t_{i,j,g}, 1) - T_2(t_k) \right)^2}, \\ \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{g=1}^G \left(\hat{T}(t_{i,j,g}, 1) - T_3(t_k) \right)^2}. \end{cases} \quad (53)$$

При використанні даного методу враховано зв'язки між відповідними відліками для ритмічних структур $t_{i,g}, t_{j,g}$ і відліками визначених многочленів t_k , які визначаємо за такими формулами:

- для ритмічної циклічної структури

$$t_{i,g} = t_k, \quad k = i \cdot g - (i - 1), \quad i = \overline{1, C}, \quad g = \overline{1, G}; \quad (54)$$

- для ритмічної зонної структури

$$t_{i,j,g} = t_k, \quad k = i \cdot g \cdot j - (i \cdot j - 1), \quad i = \overline{1, C}, \quad j = \overline{1, Z}, \quad g = \overline{1, G}. \quad (55)$$

На рисунку 16 наведено структурну схему методу оцінювання оптимального полінома на відповідному сегменті.

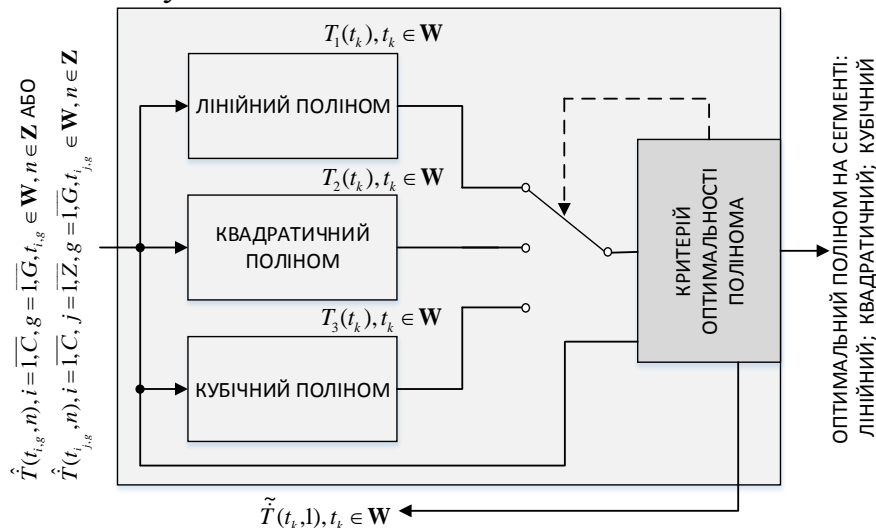


Рис. 16. Структурна схема методу оцінювання оптимального полінома на відповідному сегменті, який входить до складу методу адаптивної ідентифікації дискретної ритмічної структури циклічного сигналу

Розроблені вище методи ввійшли як складові до розробленого методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічного сигналу, структурна схема якого наведена на рисунку 17.

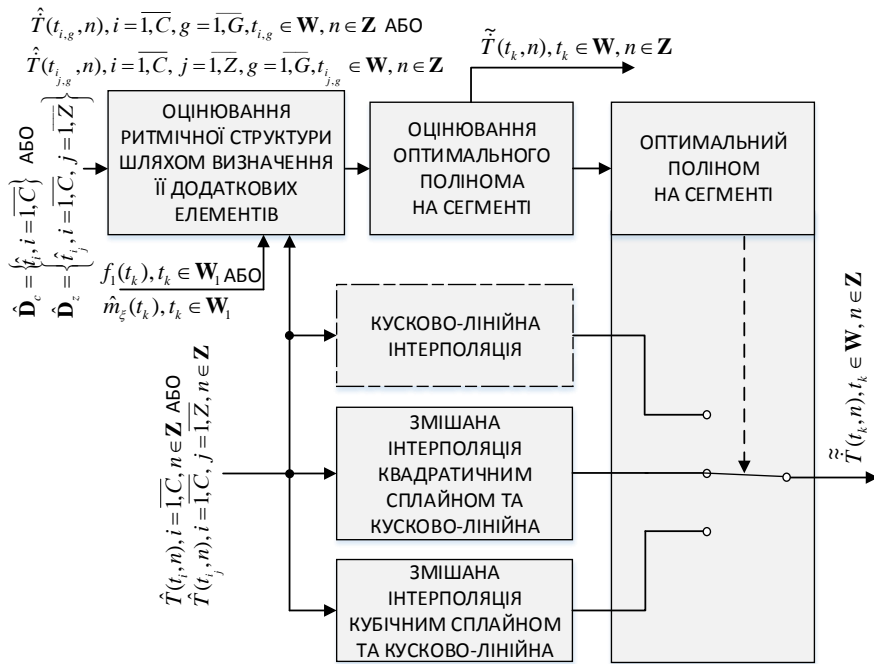


Рис. 17. Структурна схема методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічного сигналу

Попередній розроблений метод дозволяє вибирати тип полінома серед лінійного, квадратичного чи кубічного. Використовуючи критерій (53) за умови визначення квадратичного полінома на сегменті ключ (див. рис. 17) перемикається в положення ідентифікації ритмічної структури методом змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної функції.

Таким чином відбувається адаптація до закону зміни значень ритмічної структури в межах сегментів-циклів чи сегментів-зон.

Для прикладу, на рисунку 18 наведено результати оцінювання ритмічної структури розробленим методом її адаптивної ідентифікації.

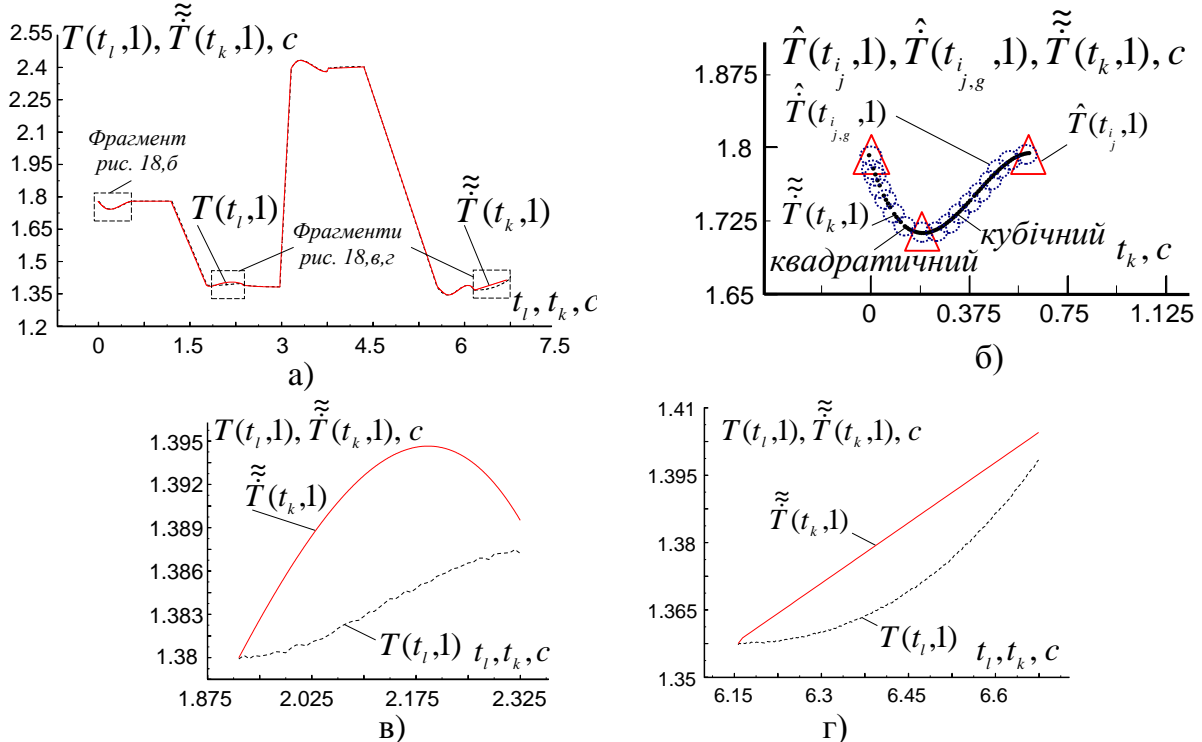


Рис. 18. Фрагмент результату оцінювання ритмічної структури методом адаптивної ідентифікації та змодельована функція ритму $T(t_l, 1)$; б) збільшений фрагмент двох сегментів-зон ритмічної структури (див. рис. 18, а), трикутники – відліки ритмічної структури, визначені методами сегментації, кола – додаткові елементи ритмічної структури, суцільна лінія – оцінена ритмічна структура методом її адаптивної ідентифікації; в), г) збільшені фрагменти оціненої ритмічної структури, що відображають похибки її оцінювання (див. рис. 18, а)

Для визначення точності розроблених методів оцінювання ритмічних структур проведено експерименти з моделювання різних ритмічних структур. При цьому у змодельовані ритмічні структури закладалась інформація про лінійні, квадратичні чи кубічні залежності їх значень на різних сегментах. Середньоквадратичні абсолютну та відносну похибки оцінювання значень ритмічної структури визначали за формулами:

$$\Delta T_q(t_k) = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (T(t_l,1) - \hat{T}_q(t_l,1))^2}; \quad \delta T_q(t_k) = \frac{\Delta T_q(t_k)}{\sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{T}_q(t_l,1)^2}}, \quad k = \overline{1, L}, q = \overline{1, 3}, \quad (56)$$

де $T(t_l,1)$ – значення змодельованої тестової ритмічної структури; $\hat{T}_q(t_l,1)$ – оцінена ритмічна структура одним із розроблених методів, $q = \overline{1, 3}$; L – кількість відліків, $l = \overline{1, L}$; k – відлік для абсолютної та відносної похибок відповідно, $k = \overline{1, L}$. Результати отриманих відносних похибок наведено на рисунку 19.

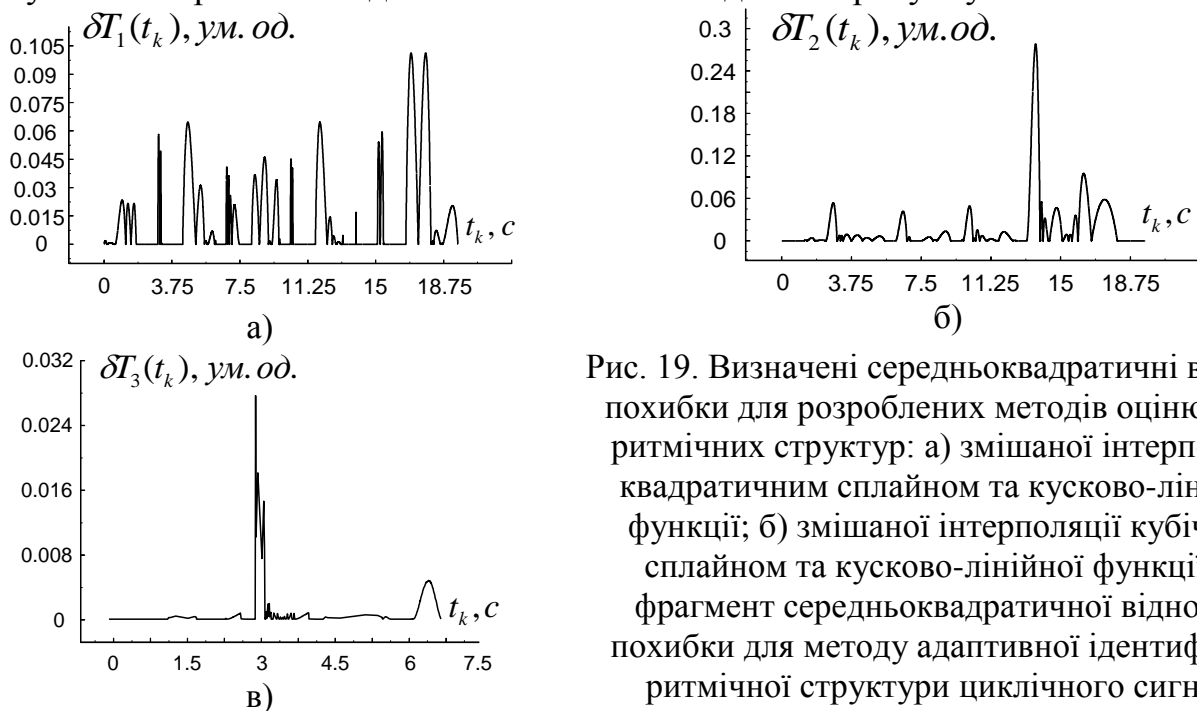


Рис. 19. Визначені середньоквадратичні відносні похибки для розроблених методів оцінювання ритмічних структур: а) змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної функції; б) змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції; в) фрагмент середньоквадратичної відносної похибки для методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічного сигналу

З отриманих результатів випливає, що середня відносна похибка оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів розробленими методами не перевищує 20%. При застосуванні методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури вона складає 1,5–3,2% і значно менша у порівнянні з відомим методом оцінювання ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції, яка складає 3–6,2%.

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 ЦС розробленими методами. Наведено приклади результатів застосування методів статистичного опрацювання до циклічних сигналів у медицині, механіці та економіці. Наведено також результати комп'ютерного моделювання ЦС 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 (метод верифікації циклічності).

Для встановлення впливу різних видів оцінених ритмічних структур розробленими методами на результати передискретизації циклічних сигналів були опрацьовані сигнали, отримані з урахуванням оцінених ритмічних структур різними методами. Для оцінювання похибок передискретизації серед отриманих відліків реалізації ЦС вибираємо ті відліки \hat{t}_q , для яких виконувалася рівність (або мінімальне відхилення відповідних їм значень) за атрибутом, тобто

$$\hat{t}_q = \begin{cases} t_l, & \text{якщо } \min |\xi_\omega(t_k) - \hat{\xi}_\omega(t_l)|, \\ t_l, & \text{не приймається, в іншому випадку,} \end{cases} \quad k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L}, q = \overline{1, Q}, Q < K, L, \quad (57)$$

де $\hat{\xi}_\omega(t_l), t_l \in \mathbf{W}, l = \overline{1, L}$ – передискретизований циклічний сигнал (крок дискретизації нерівномірний), $\xi_\omega(t_k), t_k \in \mathbf{W}, k = \overline{1, K}$ – вхідний сигнал (крок дискретизації рівномірний). При такому виборі відліків \hat{t}_q необхідно перевіряти додаткову умову їх однотипності упорядкування для сегментної структури.

Середньоквадратичні похибки передискретизації ЦС визначалися за формулами, аналогічними (40). Як приклад, на рисунку 20 наведено результати отриманих середньоквадратичних абсолютних похибок передискретизації циклічних електрокардіосигналів.

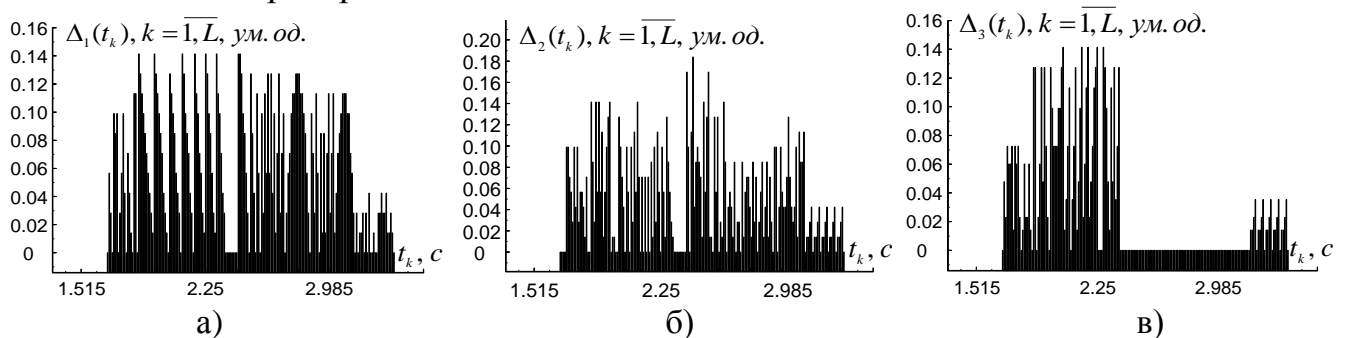


Рис. 20. Середньоквадратичні абсолютні похибки відліків другого циклу передискретизованих циклічних сигналів із урахуванням різних ритмічних структур: а) метод змішаної інтерполяції квадратичним сплайном та кусково-лінійної функції; б) метод змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції; в) метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури

З отриманих результатів випливає, що середньоквадратична відносна похибка передискретизації ЦС при врахуванні різних оцінених ритмічних структур розробленими методами складає 0,06. При застосуванні методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури вона складає 0,04 і менша у порівнянні з похибкою, що дає відомий метод оцінювання ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції, яка складає 0,05. Отримані результати свідчать про незначний вплив різних ритмічних структур на результати передискретизації ЦС.

Для встановлення впливу різних видів оцінених ритмічних структур на результати статистичного опрацювання циклічних сигналів опрацьовано кардіосигнали, отримані з урахуванням оцінених ритмічних структур різними методами. Як приклад, на рисунку 20 наведено отримані реалізації статистичних оцінок математичного сподівання та дисперсії при використанні різних оцінених ритмічних структур електрокардіосигналу.

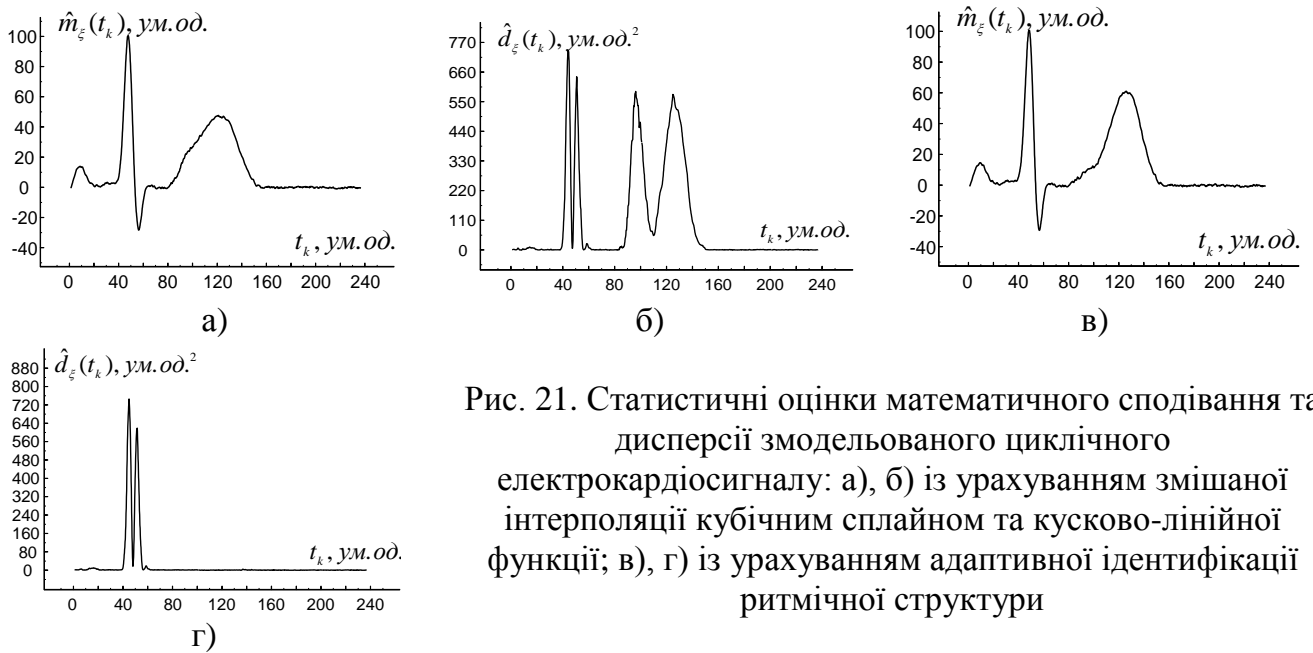


Рис. 21. Статистичні оцінки математичного сподівання та дисперсії змодельованого циклічного електрокардіосигналу: а), б) із урахуванням змішаної інтерполяції кубічним сплайном та кусково-лінійної функції; в), г) із урахуванням адаптивної ідентифікації ритмічної структури

З отриманих результатів встановлено, що у випадку використання методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури оцінка дисперсії ЦС значно менша у порівнянні з отриманими результатами із урахуванням інших розроблених методів оцінювання ритмічних структур та відомого методу на основі кусково-лінійної інтерполяції, що свідчить про підвищення точності статистичного опрацювання циклічних сигналів.

В роботі обґрунтовано математичну модель (58) 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

$$h(\omega, l) = \sum_{i=1}^C h_i(\omega, l), \quad \omega \in \Omega, l \in \mathbf{W}. \quad (58)$$

Оскільки отримані статистичні оцінки ЦС та оцінена ритмічна структура використовується при комп'ютерному моделюванні циклічних сигналів, для прикладу, на рисунку 22 наведено результати моделювання процесів рельєфних утворень на поверхні металів та визначено середньоквадратичну відносну похибку їх моделювання. З отриманих результатів випливає, що похибка моделювання при врахуванні методу адаптивної ідентифікації ритмічної структури складає 2–9%.

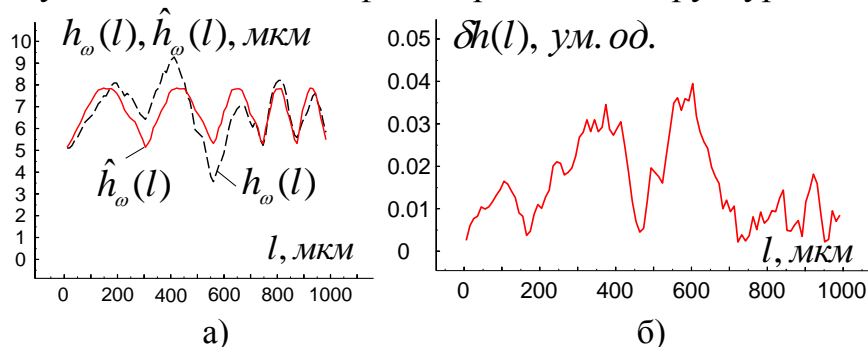


Рис. 22. Реалізація змодельованого та реального циклічного процесу рельєфних утворень на поверхні алюмінієвого сплаву Д16чт та середньоквадратична відносна похибка моделювання: а) процес рельєфних утворень наведено у вигляді графіка «ширина елемента рельєфу–довжина аналізованої області» за відносної деформації $\varepsilon = 15,5\%$; б) середньоквадратична відносна похибка моделювання

На рисунку 22, а) зображено $\hat{h}_\omega(l)$ – результати моделювання (суцільна лінія), $h_\omega(l)$ – реальні дані експерименту (пунктирна лінія).

В роботі розроблено метод верифікації моделей досліджуваних сигналів на належність їх до класу циклічних на основі перевірки гіпотези (59). Суть методу полягає у розділенні досліджуваної реалізації на дві окремі частини і їх паралельному опрацюванні: сегментації, оцінюванні ритмічної структури та статистичної обробки. При цьому висунуті гіпотези H_0 – коли досліджуваний сигнал є циклічним; і протилежна, альтернативна гіпотеза H_1 – коли досліджуваний сигнал не є циклічним. Застосовуючи критерій порівняння нормованих статистичних оцінок математичних сподівань $\hat{m}_n(t), \ddot{m}_n(t)$ на двох окремих частинах реалізації наведено у вигляді

$$H = \begin{cases} H_0, & \begin{cases} \dot{v}_{\min}(t) < \dot{m}_n(t) < \dot{v}_{\max}(t), t \in \mathbf{W}_n, \\ \dot{v}_{\min}(t) < \ddot{m}_n(t) < \dot{v}_{\max}(t), t \in \mathbf{W}_n, \end{cases} \\ H_1, & \text{при невиконанні умов чи умови,} \end{cases} \quad (59)$$

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.

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. Розроблено комплекс комп'ютерних програм для автоматизованого опрацювання циклічних сигналів, який реалізує розроблені у дисертаційній роботі методи. 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.

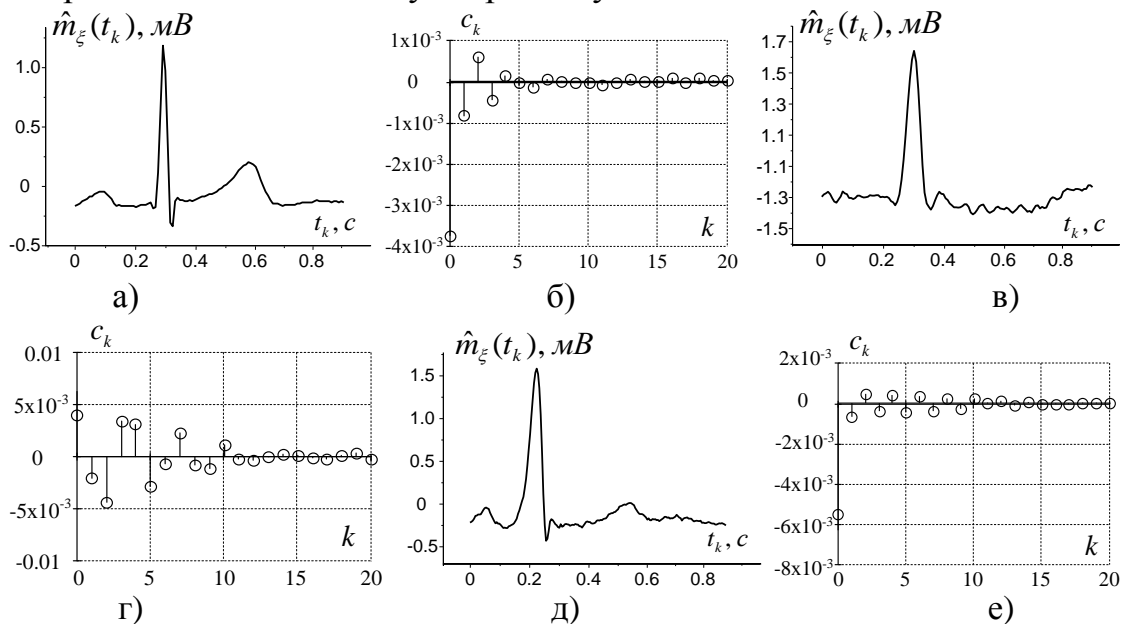


Рис. 23. Реалізації статистичних оцінок математичного сподівання електрокардіосигналу та коефіцієнти їх розкладу у ряд Чебишева: а), б) умовно здорової людини; в), г) при патології ішемії; д), е) при патології синдрому CLC

Як діагностичні ознаки у роботі використано нормовані одновимірні статистичні оцінки (математичного сподівання) та двовимірні оцінки (кореляційна та коваріаційна функції) ЦС. Для прикладу, на рисунку 23 наведено статистичні оцінки математичного сподівання циклічних електрокардіосигналів у нормі та з різними видами патологій та їх розклади. На рисунку 24, для прикладу, наведено побудований діагностичний простір, використовуючи перші два коефіцієнти розкладу отриманих статистичних оцінок у ряд Чебишева. Даний підхід щодо вибору інформативних ознак поширено для діагностування стану поверхні металів.

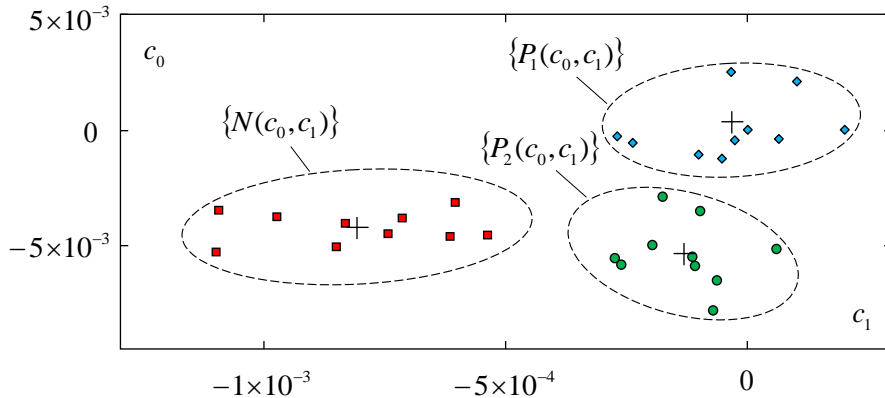


Рис. 24. Діагностичний простір коефіцієнтів розкладів нормованих статистичних оцінок математичних сподівань (квадрати – електрокардіосигнали умовно здорової людини, ромби – при патології ішемії, крапки – при патології синдрому CLC)

Узагальнену структурну схему комплексу комп'ютерних програм наведено на рисунку 25.

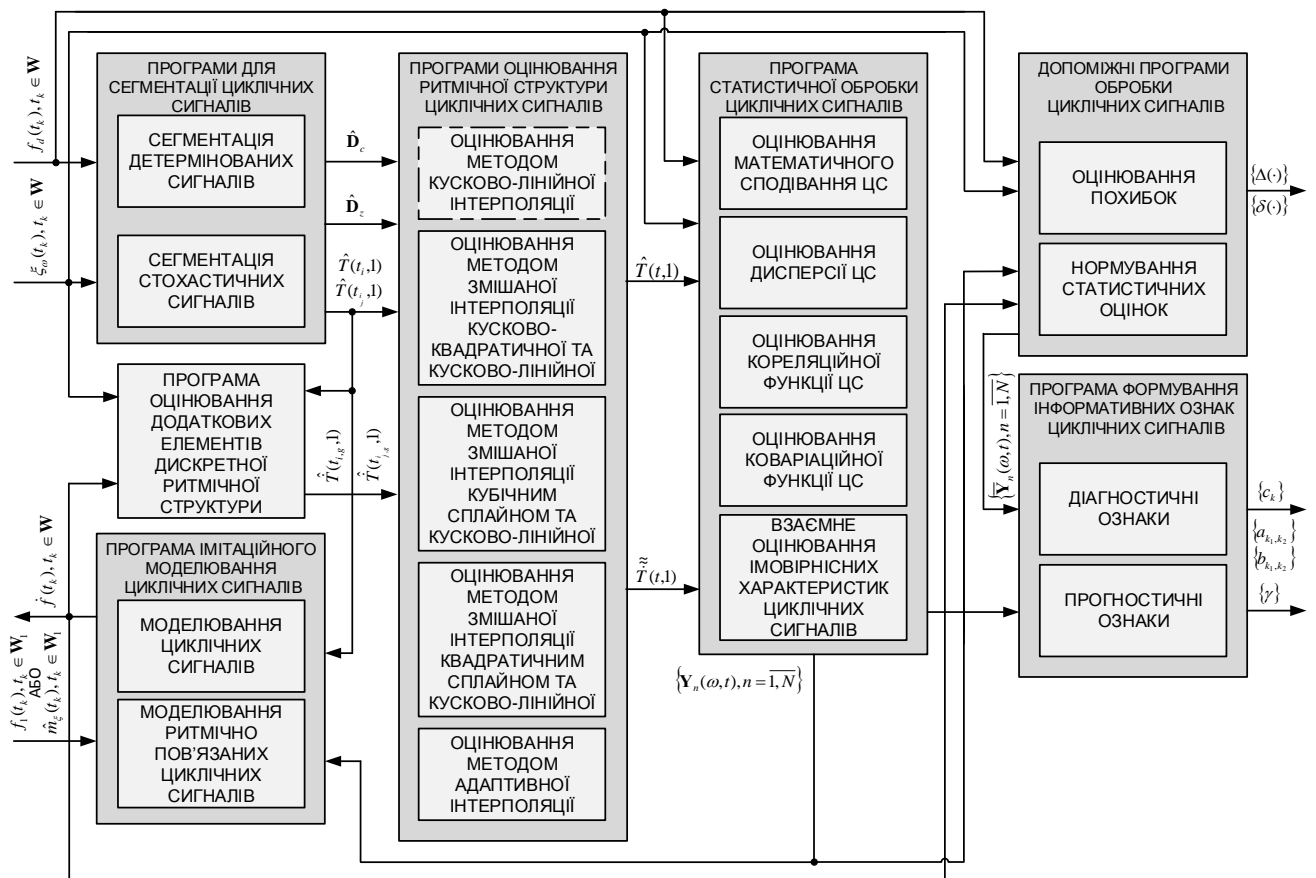


Рис. 25. Узагальнена структурна схема комплексу комп'ютерних програм для опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів

На основі розроблених у роботі методів створено комплекс комп'ютерних

програм для автоматизованого опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів, який може використовуватись як складова спеціалізованого програмного забезпечення в системах комп'ютерної кардіодіагностики чи системах технічного діагностування стану поверхні металів. У системах аналізу та прогнозування циклічних економічних процесів, а також в експериментальних дослідницьких системах при проведенні наукових досліджень. На рисунку 25 позначено $\{\mathbf{Y}_n(\omega, t), n = \overline{1, N}\}$ – множина векторів статистичних оцінок імовірнісних характеристик; $\{\overline{\mathbf{Y}}_n(\omega, t), n = \overline{1, N}\}$ – 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, штрихпунктиром зображено блок програми, яка реалізує відомий метод оцінювання ритмічної структури циклічних сигналів.

У додатках наведено порівняльний аналіз відомих математичних моделей циклічних сигналів, означення та властивості підкласів циклічних випадкових функцій, наведено порівняльний аналіз відомих методів сегментації циклічних сигналів, аналітичні залежності для визначення коефіцієнтів інтерполяційних поліномів, наведено фрагменти комп'ютерних програм, копії свідоцтв на комп'ютерні програми та акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

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 різницевої функції 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 уможливує 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ 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., 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).

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., 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)

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 XIX 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 XIX 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. Horkunenکو 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.

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.

АНОТАЦІЇ

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 та обчислювальні методи». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню проблеми ідентифікації сегментних і ритмічних структур циклічних сигналів, що підвищують точність їх опрацювання та комп'ютерного моделювання в автоматизованих системах цифрової обробки даних. 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 і дискретних ритмічних структур з підвищеною точністю при їх автоматизованому опрацюванні. Удосконалено метод ідентифікації ритмічної структури за рахунок використання методів інтерполяції квадратичним чи кубічним сплайном у порівнянні з відомим методом ідентифікації ритмічної структури на основі кусково-лінійної інтерполяції. Розроблено метод адаптивної ідентифікації ритмічної структури циклічних сигналів, який містить як складові метод визначення додаткових елементів ритмічної структури та метод визначення оптимального полінома на відповідному сегменті. Розроблено метод верифікації моделей на основі перевірки гіпотези про належність досліджуваного сигналу до класу циклічних. Розроблено математичні засоби ідентифікації сегментних та оцінювання ритмічних структур, які в цілому підвищують точність методів дискретизації, статистичного опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів, придатні для використання в програмно-апаратних системах цифрової обробки (діагностики чи

прогнозування) різних циклічних сигналів.

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

Литвиненко Я.В. Методы идентификации сегментной и ритмической структур циклических сигналов в системах цифровой обработки данных. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 – «Математическое моделирование и вычислительные методы». – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2019.

Диссертация посвящена решению проблемы идентификации сегментных и ритмических структур циклических сигналов, повышающие точность их обработки, а также компьютерного моделирования в автоматизированных системах цифровой обработки данных. Создано методологию построения методов сегментации разных циклических сигналов, моделями которых есть циклические функции. Разработанная на основании созданной методологии система методов сегментации циклических сигналов позволяет проводить идентификацию их сегментных и дискретных ритмических структур с повышенной точностью при их автоматизированной обработке. Усовершенствован метод идентификации ритмической структуры за счет использования методов интерполяции квадратичным или кубическим сплайном по сравнению с известным методом идентификации ритмической структуры на основании кусочно-линейной интерполяции. Разработанный метод адаптивной идентификации ритмической структуры циклических сигналов, который включает в себя как свои составляющие метод определения дополнительных элементов ритмической структуры и метод определения оптимального полинома на соответствующем сегменте. Разработан метод верификации моделей на основании проверки гипотезы о принадлежности исследуемого сигнала к классу циклических. Разработанные математические средства идентификации сегментных и оценки ритмических структур, которые, в целом, повышают точность методов дискретизации, статистической обработки и компьютерного моделирования циклических сигналов, пригодные для использования в программно-аппаратных системах цифровой обработки (диагностики или прогнозирования) разных циклических сигналов.

Ключевые слова: циклические сигналы, математическое моделирование, методы сегментации, идентификация сегментной структуры, оценка ритмической структуры, методы статистической обработки, компьютерное моделирование.

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 the solution of the scientific problem which consists

in the creation of new methods for identification of segment and rhythm structures of cyclic signals, which provide improved accuracy of cyclic signals processing and computer modeling in automated digital data processing systems. Considering the fact that there is a repetitive structure of cyclic signals, which is due to phase expansion in time or space of cyclic occurrences and processes - a methodology for constructing methods of segmentation (mathematical models of which are cyclic functions with segment structure) of different cyclic signals is created. The system of new methods of segmentation of cyclic signals was developed on the basis of the created methodology. It allows identifying their segment and discrete rhythm structures with increased accuracy at their automated processing within the framework of deterministic and stochastic mathematical models of cyclic functions with a variable or constant rhythm. There were improvements made in the method for identifying the rhythm structure of cyclic signals through the use of methods of interpolation by the means of a quadratic or cubic spline in comparison with the known method of identification of the rhythm structure on the basis of piecewise linear interpolation. The method of adaptive identification of the rhythm structure of cyclic signals was developed, which includes, as its components, the developed method of determining additional elements of the rhythm structure and the developed method of determining the optimal polynomial in the corresponding segment. Considering the greater number of elements of the rhythm structure, this allowed evaluating the type of optimal polynomial among the linear, quadratic and cubic ones in the investigated segment. This also allowed choosing a method of evaluating the rhythm structure in the investigated segment among the known method (based on piecewise linear interpolation) and the developed one in the process of work (based on quadratic and cubic splines). The achieved results gave a possibility to adaptively evaluate the investigated segment and improved accuracy of identifying the rhythm structure of cyclic signals. There was developed a method of verifying the models of the investigated signals which is based on testing the hypothesis of the relation of the investigated signal to the class of cyclic signals for the suitable, correct application of the methods developed in the process of this study (during the processing of cyclic signals). 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 with a segment structure, was delineated. Mathematical tools were developed of identifying the segment and evaluating rhythm structures that increase the overall accuracy of methods of processing of cyclic signals, in particular, sampling methods, statistical processing and computer simulation of cyclic signals. These tools are suitable for use as components of specialized programs in both software and hardware digital processing systems (diagnostics or forecasting) of different cyclic signals: in cardiac diagnostics systems, in systems of technical diagnostics of the state of the surface of metals and in systems of analysis and forecasting of economic cyclic process.

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.

Підписано до друку 31.10.2019. Формат 60×90, 1/16.
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.
Умовно–друк. арк. 1,8. Наклад – 100 прим.
Замовлення № 311019

Друк ФОП Паляниця В. А.
Свідоцтво ДК №4870 від 20.03.2015 р.
м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 9а, оф.38.
тел. (0352) 528–777