

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Наталії Богданівни Стадник на тему: "Моделювання та ефективні методи опрацювання циклічних сигналів на базі ізоморфних циклічних випадкових процесів", представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми дисертації.

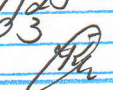
Протягом останніх десятиліть спостерігаємо стрімкий розвиток інформаційних систем автоматизованого аналізу та прогнозування циклічних сигналів, завдяки яким досягається підвищення ефективності вирішення багатьох важливих завдань в галузі медицини, вивчення стану довкілля, техніки та економіки. Прикладами таких застосувань є комп'ютеризовані системи функціональної кардіодіагностики та моніторингу стану серцево-судинної системи в палатах інтенсивної терапії за циклічними сигналами серця, автоматизовані системи аналізу та прогнозування за циклічними економічними процесами, автоматизовані системи аналізу та прогнозування електро-, газо-, водо-, нафто- споживання, інформаційні системи аналізу та діагностики стану матеріалів за циклічними процесами самоорганізації на їх поверхні.

Зважаючи на вищенаведену інформацію надзвичайно актуальними завданнями сьогодення є своєчасне та кваліфіковане застосування інформаційних систем автоматизованого аналізу та прогнозування циклічних сигналів. У таких системах високі якісні та кількісні показники функціонування, а саме точність, достовірність, інформативність, швидкодія у значній мірі залежать від адекватності, конструктивності, складності математичних моделей досліджуваних циклічних сигналів.

Отже, розробка, тестування та впровадження інформаційних систем автоматизованого аналізу, прогнозування циклічних процесів та сигналів із використанням верифікованих математичних моделей та методів їх опрацювання, побудованих на їх основі сучасних програмно-апаратних засобів, суттєво підвищує ефективність вирішення багатьох важливих завдань в галузях медицини, моніторингу навколишнього середовища, техніки та економіки.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання розвитку моделювання та методів статистичного опрацювання циклічних сигналів на основі теорії циклічних випадкових процесів для вдосконалення концепції їх ізоморфізму та встановлення базових властивостей і співвідношень між різними класами їх еквівалентності, а також у напрямі розробки математичної моделі цифрових циклічних сигналів із подвійною стохастичністю та розробки методів їх статистичного опрацювання із низькою обчислювальною складністю з можливістю використання у цифрових системах із обмеженими обчислювальними ресурсами.

Дисертаційне дослідження пов'язане з виконанням науково-дослідної теми «Класи інформаційних технологій в проектах "Розумне місто" (номер державної реєстрації №0117 U 002241, 2017–2019 рр.), у якій здобувачу належить система комп'ютерних програм для статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик кардіосигналів для телемедицини в проекті "Розумне місто"»

ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЯ	
Вхідний №	1128 - 306
«02»	03 2021 р.
Підпис	

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їхня достовірність. Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації повною мірою обґрунтовані, оскільки логічно впливають із результатів, отриманих за допомогою методів теорії категорій для означення різних видів ізоморфізму циклічних випадкових процесів; методів теорії випадкових процесів для моделювання стохастичних цифрових циклічних сигналів; методів статистичного точкового оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних випадкових процесів для побудови методів опрацювання циклічних сигналів у комп'ютеризованих системах з обмеженими обчислювальними ресурсами; методів розробки програмних систем на основі об'єктно-орієнтованого підходу.

Достовірність отриманих результатів базується на обґрунтованості результатів моделювання. Достовірність отриманих результатів підтверджують впровадження в практичну діяльність медичного центру та у навчальний процес та науково-дослідну роботу вищих навчальних закладів медичного та технічного профілю.

Наукова новизна дисертаційної роботи:

1. Вперше запропоновано різні види розбиттів класу циклічних випадкових процесів на підкласи еквівалентності та встановлено основні властивості і співвідношення між ними, що уможливило чітке структурування класів циклічних випадкових процесів як дискретного, так і континуального (дійсного) аргументів. Такий підхід ґрунтується на означенні різних видів ізоморфізму між циклічними випадковими процесами та означенню їх строгої ритмічної пов'язаності, що стало основою для розвитку теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів в рамках стохастичного формалізованого підходу.

2. Вперше розроблено математичну модель циклічних цифрових сигналів із подвійною стохастичністю у вигляді умовного циклічного випадкового процесу дискретного аргументу, що уможливило логічне узгодження та коректне одночасне застосування двох взаємодоповнювальних цифрових методів аналізу циклічних сигналів в рамках їх єдиної математичної моделі, а саме, застосування статистичних методів морфологічного аналізу та статистичного аналізу ритму циклічних сигналів із подвійною стохастичністю у цифрових інформаційних системах. При цьому було використано поняття ізоморфізму відносно порядку та значень між циклічними випадковими процесами дискретного аргументу та врахування факту існування відповідного класу їх еквівалентності,

3. Отримали подальший розвиток методи статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних випадкових процесів дискретного аргументу. При цьому було використано їх зведення до відомих методів оцінювання відповідних ймовірнісних характеристик періодичних випадкових послідовностей, які ізоморфні відносно порядку та значень цим циклічним випадковим процесам. Такий підхід дав змогу спростити аналітичні вирази для розрахунку реалізацій статистик та знизити обчислювальну складність алгоритмів статистичного аналізу циклічних сигналів у комп'ютеризованих системах з обмеженими обчислювальними ресурсами.

4. Вперше побудовано аналітичні вирази для функцій обчислювальної складності відомих та нових методів статистичного оцінювання початкової моментної функції першого порядку (математичного сподівання) та кореляційної функції циклічних випадкових процесів дискретного аргументу, що дало змогу у рамках кореляційної

теорії випадкових процесів досліджувати аналітичними методами вплив основних параметрів відповідних методів статистичного оцінювання на їх обчислювальну складність.

Значення одержаних результатів для науки і практики. Розроблена у дисертації математична модель циклічних цифрових сигналів із подвійною стохастичністю у вигляді умовного циклічного випадкового процесу дискретного аргументу, різні види розбиттів класу циклічних випадкових процесів на підкласи еквівалентності, методи статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних випадкових процесів дискретного аргументу, аналітичні вирази для функцій обчислювальної складності відомих та нових методів статистичного оцінювання початкової моментної функції першого порядку та кореляційної функції циклічних випадкових процесів дискретного аргументу є повністю обґрунтованими для використання при проектуванні інформаційних систем функціональної кардіодіагностики та моніторингу стану серцево-судинної системи в палатах інтенсивної терапії за циклічними сигналами серця, автоматизованих систем аналізу та прогнозування за циклічними економічними процесами, автоматизованих систем аналізу та прогнозування електро-, газо-, водо-, нафто- споживання, інформаційних систем аналізу та діагностики стану матеріалів за циклічними процесами самоорганізації на їх поверхні.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у ТОВ "Медичний центр МЕВІЗ", впроваджено у навчальний процес Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та в науково-дослідну роботу Тернопільського національного медичного університету ім. І.Я. Горбачевського.

Повнота викладу в опублікованих працях. Основні результати, отримані в дисертації, опубліковано в 19 наукових працях, зокрема: 1 стаття у закордонному науковому періодичному виданні, 8 статей у наукових фахових періодичних виданнях України, 10 у матеріалах міжнародних та всеукраїнських науково-практичних та науково-технічних конференцій. 4 публікації входять до міжнародної наукометричної бази Scopus, 8 публікацій входять до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus.

Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів з висновками, загального висновку, списку використаної літератури з 119 найменувань і 3 додатків. Написана на 230 сторінках, з них 180 сторінок основного тексту, що містять 82 рисунки та 1 таблицю.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження, наведено зв'язок роботи з науково-дослідною темою, поставлено мету та визначено завдання дослідження, об'єкт та предмет дослідження, наведено перелік методів дослідження. Сформульовано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий науковий внесок здобувача, а також відомості щодо апробації та опублікування результатів дослідження.

У **першому розділі** представлено важливість математичного моделювання у процесі створення комп'ютеризованих систем аналізу та прогнозування циклічних сигналів. Проведено порівняльний аналіз і класифікацію відомих математичних моделей циклічних сигналів та процесів з точки зору можливості врахування ними визначальних ознак, властивостей просторово-часової структури циклічних сигналів

та можливості розробки методів їх опрацювання в автоматизованих інформаційних системах. Розглянуто детерміновані математичні моделі циклічних сигналів у вигляді гармонічної функції, періодичної полігармонічної функції, майже періодичної функції. Відзначено, важливість стохастичних математичних моделей, яким дано коротку характеристику.

Розглянуто найпростішу стохастичну математичну модель циклічних сигналів у вигляді вектора випадкових величин та стаціонарного випадкового процесу у вузькому та широкому розумінні, які, досить ефективно застосовуються для моделювання багатьох сигналів та процесів циклічної структури, хоча безпосередньо і не відображають коливний, циклічний рух.

Проаналізовано процеси із незалежними періодичними приростами, процеси із незалежними періодичними значеннями (періодичні білі шуми), марковські періодичні випадкові процеси та ланцюги, лінійні періодичні випадкові процеси. Розглянуто декілька існуючих підходів до математичного моделювання та опрацювання циклічних сигналів зі змінним ритмом, які враховують різного роду відхилення від детермінованих та стохастичних періодичних моделей у вигляді квазігармонічної функції, де мінливість ритму враховується у такому понятті як миттєва кутова частота та миттєвий період; квазімеандр, де мінливість ритму враховується поняттями частість та змінний період. Okремо відзначено характеристику умовно періодичного зі змінним періодом випадковому процесу, який містить внутрішні логіко-термінологічні суперечності та не має адекватних засобів математичного відображення циклічної структури досліджуваних сигналів.

Відзначено, що узагальнена математична модель циклічних сигналів у вигляді абстрактного циклічного функціонального відношення, яке як частинні свої випадки включає детерміновані, стохастичні, нечіткі та інтервальні математичні моделі циклічних сигналів як з постійним, так і зі змінним ритмом є одним із найперспективніших підходів до математичного моделювання, комп'ютерної симуляції та опрацювання циклічних сигналів в автоматизованих інформаційних системах.

Проаналізовано такі стохастичні моделі циклічних сигналів як циклічний випадковий процес, що узагальнює періодично розподілений випадковий процес (враховування змінності ритму циклічного сигналу), вектор циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів (врахування спільності ритму синхронно зареєстрованих циклічних сигналів) та умовний циклічний випадковий процес (врахування подвійної стохастичності досліджуваних циклічних сигналів, стохастичність їх морфологічної та ритмічної структур).

Розглянуто типи ізоморфізму функціональних відношень між циклічними випадковими процесами. Враховуючи фундаментальну роль в означенні детермінованих, стохастичних, інтервальних та нечітких моделей циклічних сигналів та лежить в основі їх методів опрацювання, відзначено важливу роль поняття ізоморфізму в теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів.

З метою формулювання наукового завдання даного дисертаційного дослідження проведено порівняльний аналіз із вказанням основних недоліків відомих результатів в сфері математичного моделювання та опрацювання циклічних сигналів в рамках теорії циклічних випадкових процесів.

У **другому розділі** уточнено означення поняття ізоморфізму циклічних випадкових процесів відносно порядку та значень, у вигляді доповнення відомого означення положенням про спосіб привнесення порядку у циклічні випадкові процеси як певну множину упорядкованих пар “аргумент, значення”, шляхом упорядкування ізоморфних циклічних випадкових процесів за типом упорядкування їх областей визначення. Протрактовано поняття ізоморфізму відносно порядку та значень циклічних випадкових процесів у термінах теорії категорій.

Дано означення ізоморфізму циклічних випадкових процесів відносно порядку та таких ймовірнісних атрибутів їх циклічності як математичне сподівання та кореляційна функція, змішані початкові та центральні моментні функції вищого порядку, а також сімейство функцій розподілу. Такі види ізоморфізмів доповнюють відомий вид ізоморфізму відносно порядку та значень циклічних випадкових процесів, дають змогу досліджувати значно ширші підкласи ізоморфних відносно порядку та ймовірнісних атрибутів циклічності, ніж відносно вузькі підкласи ізоморфних відносно порядку та значень циклічних випадкових процесів, та лежать в основі структуризації класів циклічних випадкових процесів дискретного та континуального (дійсного) аргументу.

Проведено структуризацію класу циклічних випадкових процесів, шляхом формування його різних розбиттів на взаємопов'язані класи еквівалентності, які ґрунтуються на означених видах ізоморфізму та на властивості строгої ритмічної пов'язаності циклічних випадкових процесів. Такий підхід є особливо актуальним, оскільки із різними видами ізоморфізму циклічних випадкових процесів дискретного та континуального аргументів, можна пов'язати розбиття відповідних класів циклічних випадкових процесів на підкласи їх еквівалентності.

Встановлено базові властивості та співвідношення між різними класами еквівалентності циклічних випадкових процесів, що розвиває теорію моделювання та опрацювання циклічних сигналів в рамках стохастичного формального підходу. Представлено співвідношення між різними класами еквівалентності циклічних випадкових процесів, що породжені різними видами їх ізоморфізму у формі діаграми Венна, у вигляді ізоморфізму відносно порядку та значень, ізоморфізму відносно порядку та сімейства функцій розподілу, ізоморфізму відносно порядку та їх змішаних початкових та центральних моментних функцій, ізоморфізму відносно порядку, математичного сподівання та кореляційної функції, як перших двох моментних функцій.

З метою несуперечливого врахування стохастичності циклічних сигналів при їх морфологічному статистичному аналізі та при статистичному аналізі їх ритму розроблено процедуру побудови математичної моделі циклічних цифрових сигналів у вигляді умовного циклічного випадкового процесу дискретного аргументу. Наведено означення дискретної випадкової функції ритму та випадкової області визначення умовного циклічного випадкового процесу дискретного аргументу, які лежать в основі аналізу ритму циклічних сигналів в рамках стохастичного підходу. Сформульовані підходи до проведення морфологічного статистичний аналізу циклічних сигналів із подвійною стохастичністю та статистичного аналізу їх ритму.

У **третьому розділі** розроблено новий підхід до статистичного опрацювання циклічних випадкових процесів дискретного аргументу, який ґрунтується на процедурі їх зведення до ізоморфних ним періодичних випадкових послідовностей, що спростило аналітичні вирази та формули для розрахунків, а також знизило обчислювальну складність відповідних алгоритмів у задачах статистичного опрацювання циклічних сигналів в інформаційних системах для медицини, техніки та економіки, що особливо важливо для їх реалізації у портативних системах з суттєво обмеженими обчислювальними потужностями.

Отримано нові обчислювальні ефективні методи статистичного оцінювання математичного сподівання, як початкової моментної функції першого порядку та кореляційної функції циклічних випадкових процесів дискретного аргументу, завдяки застосуванню нового підходу до вирішення завдання статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних випадкових процесів дискретного аргументу.

Побудовано аналітичні вирази для функцій обчислювальної складності відомих та нових методів статистичного оцінювання початкової моментної функції першого порядку та кореляційної функції циклічних випадкових процесів дискретного аргументу.

Наведено приклади статистичного оцінювання початкової моментної функції першого порядку та кореляційної функції електрокардіосигналу як циклічного випадкового процесу дискретного аргументу із використанням відомих методів, а також із застосуванням нових методів статистичного оцінювання, що ґрунтується на процедурі зведення досліджуваного циклічного випадкового процесу до ізоморфної йому періодичної випадкової послідовності.

У **четвертому розділі** розроблено комп'ютерні програми для статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних сигналів на основі нових ефективних обчислювальних методів, які розроблені в третьому розділі дисертації. Розглянуто структурно-функціональні схеми та функціональні можливості багатофункціонального програмного комплексу для моделювання та аналізу циклічних сигналів, який дооснащено розробленою системою комп'ютерних програм. Програмний комплекс реалізовано на мові програмування Object Pascal. Наведено приклади скріншотів відповідних його інтерфейсів. Даний програмний комплекс забезпечує ввід та попереднє опрацювання циклічних сигналів, оцінювання їх сегментної структури, статистичний морфоаналіз та аналіз ритму циклічних сигналів; імітаційне моделювання циклічних сигналів, а також дає змогу зберігати, повторно використовувати та графічно відображати результати опрацювання та імітаційного моделювання циклічних сигналів.

Створення системи комп'ютерних програм для статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних сигналів є підставою для підвищення швидкодії статистичного опрацювання циклічних сигналів в рамках їх таких математичних моделей як циклічний випадковий процес та умовний циклічний випадковий процес дискретного аргументу, що має місце у комп'ютеризованих системах діагностування стану серцево-судинної системи, моніторингових системах параметрів навколишнього середовища, а також інформаційних системах аналізу та прогнозування економічних циклічних процесів.

Оформлення дисертації та автореферату.

Дисертаційна робота написана грамотно. Матеріали досліджень подано логічно, послідовно та доказово. Оформлення автореферату та дисертації повністю відповідає вимогам, рекомендованим Міністерством освіти і науки України. Текст автореферату відповідає змісту дисертаційної роботи, а дисертація – паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

Зауваження до дисертації:

1. Аналіз літератури в області теорії, методів аналізу циклічно нестационарних випадкових процесів та їх використання слід би конкретизувати, а не обмежуватись тільки переліком відомих дисертанту імен, серед яких є й така, що не мають прямого відношення до даної тематики. Дослідженням в цій області присвячені численні публікації, які неможливо загалом оцінити в дисертації. Достатньо назвати тільки три оглядові статті в журналі "Signal Processing", в кожній з яких цитується біля 100 наукових праць.

2. У прикладних дослідженнях, на нашу думку, недоцільно позначати випадковий процес як функцію двох аргументів $\xi(\omega, t)$, а саме випадкової події ω та часу t . Таке позначення не полегшує доведення статистичних тверджень, а навпаки заплутує їх. Переріз $\xi(\omega, t)$ для конкретного $\omega = \omega_1$ не є реалізацією ергодичного випадкового процесу, оскільки останній при своїй часовій еволюції може проходити всі можливі стани $\omega \in \Omega$. Тому позначення реалізації $\xi(\omega', t)$, яке використовується в роботі є помилковим (за автором: "кожній події ω' відповідає її ω' – реалізація").

3. У роботі вказано, що розроблені нові методи оцінювання, і в той же час відмічається, що обчислення оцінки математичного сподівання чи кореляційної функції зведено до обчислення цих характеристик за формулами "L – періодичної послідовності". Як це розуміти (розроблено чи зведено)? Дисертантом також не показана статистична рівнозначність цих формул.

4. У роботі автором наведені результати опрацювання не дискретних процесів, а даних, що є результатом дискретизації неперервних. Дисертанткою, на жаль, не обговорюється питання вибору кроку дискретизації. Зазначу, що при розв'язуванні статистичних задач умови його вибору відрізняються від відомих (наприклад, умови Найквіста).

5. Недостатньо висвітлені питання обчислення наведених оцінок математичного сподівання та кореляційної функції. Як знаходився так званий "зворотній оператор перетворення шкали", яка точність отриманих оцінок.

6. У роботі зустрічаються помилкові твердження щодо класифікації сигналів (наприклад, періодично корельовані випадкові процеси та періодично нестационарні n -ого порядку (за автором "періодично розподілені") не належать до класу "періодичних випадкових процесів"), а також прийнятих (широко розповсюджених) назв цих класів, автор без потреби та без підстав старається все узагальнити.

7. У роботі є чимало невдалих термінів, які дисертантка без пояснень використовує ("ймовірнісні атрибути циклічності", "стохастично періодичні процеси", "подвійна стохастичність", "континуальні аргументи", "компаративний аналіз", "обернений оператор перетворення шкали", "випадковий об'єкт", "ритмічна пов'язаність" і т.п.).

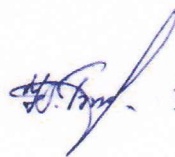
8. У тексті дисертаційної роботи подекуди зустрічаються граматичні помилки та стилістичні неточності.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок. Дисертаційна робота Наталії Богданівни Стадник є завершеною науковою працею, в якій отримано нові наукові та прикладні результати, а саме, розроблено моделі, методи та програмні засоби статистичного опрацювання циклічних сигналів. Ці результати належно апробовані та впроваджені.

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, повнотою вирішення поставлених наукових та практичних задач, новизною і ступінню обґрунтованості отриманих результатів, практичних висновків та рекомендацій робота задовольняє вимогам, зокрема (п. 9, 11, 12 щодо кандидатських дисертацій) "Порядку присудження наукових ступенів" затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р. № 567 (зі змінами), а її автор, Наталія Богданівна Стадник заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

**Офіційний опонент,
завідувач відділу методів та засобів
відбору й обробки діагностичних сигналів
Фізико-механічного інституту
ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник**



Р. М. Юзефович

