

С.А. Лупенко

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ
МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПРАЦЮВАННЯ
ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ
В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

Наукова монографія



Computing

УДК 004.4
ББК 32.970.4
Л 85

Відтворення цієї книги або будь-якої її частини заборонено без письмової згоди видавництва. Будь-які спроби порушення авторських прав будуть переслідуватися у судовому порядку.

Рецензенти:

Щербак Л.М. – доктор технічних наук, професор, Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки (Національний авіаційний університет);

Матвійчук Я.М. – доктор технічних наук, професор (Національний університет «Львівська політехніка»);

Дивак М.П. – доктор технічних наук, професор (Тернопільський національний економічний університет).

Рекомендовано Вченою радою

Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя
(Протокол № 2 від 22 березня 2016р.)

Лупенко С.А.

Теоретичні основи моделювання та опрацювання циклічних сигналів в інформаційних системах / С.А. Лупенко. – Львів: Видавництво «Магнолія 2006», 2016. – 344 с.

Монографію присвячено теоретичним основам математичного моделювання, комп'ютерної симуляції та опрацювання циклічних сигналів в автоматизованих інформаційних системах. У рамках єдиного теоретико-методологічного підходу розглянуто детерміновані, стохастичні, нечіткі та інтервальні математичні моделі, методи імітації, дискретизації, статистичного оцінювання та спектрального аналізу циклічних сигналів. Особливу увагу приділено математичним засобам моделювання та опрацювання циклічних сигналів зі змінним ритмом.

Монографія призначена для наукових працівників, докторантів, аспірантів та студентів старших курсів вищих навчальних закладів, які цікавляться математичним моделюванням та методами опрацювання сигналів в автоматизованих інформаційних системах.

ISBN 978-617-574-108-5

© Лупенко С.А., 2016

© «Магнолія 2006», 2016

ЗМІСТ

Перелік основних умовних позначень, символів і скорочень	10
Вступ.....	11
Розділ 1. Математичні моделі та методи опрацювання циклічних сигналів в інформаційних системах (огляд літературних джерел).....	17
1.1. Інформаційні системи автоматизованого опрацювання та імітації циклічних сигналів.....	17
1.1.1. Комп'ютерні системи діагностики функціонального стану серцево-судинної системи людини за циклічними кардіосигналами.....	17
1.1.2. Автоматизовані системи аналізу та прогнозування електро-, газо-, нафто-, водоспоживання	22
1.1.3. Інформаційні системи автоматизованого аналізу та прогнозування циклічних економічних процесів	23
1.1.4. Комп'ютерні системи аутентифікації особи за її біометричними динамічними даними.....	25
1.1.5. Програмно-апаратні засоби генерування та імітації циклічних сигналів	28
1.2. Недоліки інформаційних систем автоматизованого опрацювання та імітації циклічних сигналів	29
1.3. Математичні моделі циклічних сигналів та можливості їх використання	30
1.3.1. Детерміновані математичні моделі циклічних сигналів та явищ	31
1.3.1.1. Гармонічні функції	31
1.3.1.2. Періодичні функції та їх гармонічний аналіз.....	32
1.3.1.3. Майже періодичні та квазіперіодичні функції.....	36
1.3.2. Стохастичні математичні моделі циклічних сигналів та явищ.....	41
1.3.2.1. Стаціонарний випадковий процес як математична модель циклічних сигналів	43
1.3.2.2. Адитивні, мультиплікативні та адитивно-мультиплікативні моделі циклічних сигналів	46
1.3.2.3. Періодично корельовані випадкові процеси та їх гармонічний аналіз	46
1.3.2.4. Періодичні випадкові процеси у вузькому розумінні	49

2.7. Класифікація циклічних функцій	103
2.8. Циклічні функції із зонною (сегментною) структурою	107
2.9. Висновки	112
Розділ 3. Детерміновані, стохастичні, інтервальні та нечіткі математичні моделі циклічних сигналів та процесів	114
3.1. Детерміновані математичні моделі циклічних сигналів та процесів - циклічні детерміновані функції	114
3.1.1. Циклічна детермінована числова функція	114
3.1.2. Циклічна комплекснозначна функція.....	115
3.1.3. Циклічна відносно модуля комплекснозначна функція.....	115
3.1.4. Векторна циклічна функція.....	116
3.1.5. Циклічна відносно норми векторна функція	117
3.1.6. Циклічна відносно скалярного добутку векторна функція.....	118
3.1.7. Матрична циклічна функція	119
3.1.8. Матрична циклічна відносно норми функція	119
3.1.9. Циклічні детерміновані поля	120
3.1.10. Тензорні циклічні функція та поле	121
3.1.11. Циклічний оператор	121
3.2. Стохастичні математичні моделі циклічних процесів та сигналів - випадкові функції із циклічними ймовірнісними характеристиками	122
3.2.1. Випадкові процеси із циклічними ймовірнісними характеристиками.....	123
3.2.1.1. Циклічно розподілений випадковий процес (циклічний випадковий процес)	123
3.2.1.2. Циклічно розподілений випадковий процес із циклічними реалізаціями	125
3.2.1.3. Випадкові процеси із циклічними моментними функціями ...	126
3.2.1.4. Процеси із незалежними циклічними приростами	128
3.2.1.5. Циклічний випадковий процес із незалежними (некорельованими) значеннями (циклічний білий шум).....	130
3.2.1.6. Циклічні марковські випадкові процеси	130
3.2.1.7. Лінійні циклічні випадкові процеси	130
3.2.2. Вектор циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів	132
3.3. Циклічні відносно множини інтервалів числові функції.....	134
3.4. Циклічна нечітка функція	135

3.5. Циклічний випадковий процес із зонною (сегментною) структурою	136
3.5.1. Випадкові процеси із зонною (сегментною) структурою та їх імовірнісні характеристики.....	136
3.5.2. Циклічний випадковий процес із зонною (сегментною) структурою	146
3.5.3. Циклічний випадковий процес із стохастично незалежними циклами.....	152
3.6. Висновки.....	155

Розділ 4. Перетворення циклічних процесів та сигналів в інформаційних системах.....

4.1. Загальні підходи до зображення систем та перетворень сигналів у них	158
4.2. Безінерційні перетворення детермінованих та випадкових циклічних функцій	159
4.2.1. Сума та добуток циклічних строго ритмічних пов'язаних детермінованих числових функцій	159
4.2.2. Безінерційне перетворення циклічних детермінованих числових функцій	161
4.2.3. Безінерційні перетворення циклічного випадкового процесу	163
4.3. Нелінійні інерційні перетворення періодичного випадкового процесу із незалежними значеннями (періодичного білого шуму)	166
4.3.1. Моментні функції нелінійного часоінваріантного стохастичного функціонального поліному Вольтерра другого порядку та теореми про їх періодичність	168
4.3.2. Моментні функції нелінійного часоінваріантного стохастичного функціонального поліному Вольтерра скінченного порядку та теореми про їх періодичність	173
4.4. Оператор перетворення шкали циклічних функціональних відношень	178
4.4.1. Ізоморфізм відносно порядку та значень циклічних функціональних відношень.....	178
4.4.2. Оператор перетворення шкали	181
4.4.3. Дія оператора перетворення шкали на циклічні функціональні відношення	186
4.5. Висновки	191

Розділ 5. Методи опрацювання циклічних сигналів в інформаційних системах.....	193
5.1. Метод оцінювання функції ритму циклічного сигналу на основі відомостей про його зонну структуру.....	193
5.2. Статистичні методи оцінювання ймовірнісних характеристик циклічного випадкового процесу.....	199
5.3. Статистичні методи оцінювання сумісних ймовірнісних характеристик вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів.....	209
5.4. Деякі особливості та аналітичні залежності в задачах спектрального аналізу та синтезу циклічних сигналів.....	214
5.4.1. Оператор перетворення шкали у задачах спектрального аналізу сигналів.....	214
5.4.2. Розклади циклічних числових функцій у базисі комплексних експонент.....	218
5.4.3. Узагальнення поняття кутової частоти модульованої за кутом гармонічної функції на випадок довільного циклічного функціонального відношення неперервного аргумента.....	221
5.4.4. Взаємозв'язок між функцією ритму та кутовою частотою циклічного функціонального відношення неперервного аргумента.....	222
5.4.5. Кратно ритмічно пов'язані циклічні функції.....	225
5.4.6. Спектральний аналіз та синтез циклічних числових функцій.....	230
5.5. Дискретизація циклічних сигналів в інформаційних системах.....	232
5.6. Висновки.....	236

Розділ 6. Комп'ютерне імітаційне моделювання циклічних сигналів на базі детермінованих та випадкових циклічних функціональних відношень.....	238
6.1. Методологічні підходи до генерування та імітації циклічних сигналів на ЕОМ.....	238
6.1.1. Імітація циклічних сигналів згідно першого підходу.....	241
6.1.2. Імітація циклічних сигналів згідно другого підходу.....	242
6.1.3. Про еквівалентність двох підходів до імітації циклічних сигналів.....	250
6.2. Імітаційне моделювання детермінованої циклічної числової функції...	252

6.3.	Імітаційне моделювання циклічних відносно множини інтервалів детермінованих числових функцій.....	255
6.4.	Імітаційне моделювання випадкових процесів із циклічними ймовірнісними характеристиками	260
6.4.1.	Імітаційне моделювання циклічних випадкових процесів шляхом дії оператора перетворення шкали на стохастично періодичний процес.....	260
6.4.2.	Імітаційне моделювання циклічного випадкового процесу із послідовності базових стохастично еквівалентних циклів	263
6.4.3.	Імітаційне моделювання дискретного циклічного білого шуму... ..	265
6.4.4.	Імітаційне моделювання процесу із незалежними циклічними приростами	269
6.4.5.	Імітаційне моделювання дискретних циклічних марковських випадкових процесів	271
6.4.6.	Імітаційне моделювання циклічних випадкових процесів із циклічними реалізаціями	274
6.4.7.	Точність та достовірність імітаційного моделювання дискретних випадкових процесів із циклічними ймовірнісними характеристиками	280
6.5.	Комп'ютерна програма "Генератор циклічних сигналів".....	282
6.6.	Висновки	284
Розділ 7.	Моделювання та опрацювання циклічних сигналів в системах автоматизованої кардіодіагностики та біометричної аутентифікації особи	286
7.1.	Моделювання та статистичний аналіз кардіосигналів на базі їх моделей у вигляді циклічного випадкового процесу та вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів	286
7.1.1.	Обґрунтування математичної моделі циклічних сигналів серця різної фізичної природи	286
7.1.2.	Методи опрацювання циклічних сигналів серця на базі ЕОМ	289
7.1.2.1.	Оцінювання функції ритму кардіосигналів	290
7.1.2.2.	Оцінювання ймовірнісних характеристик кардіосигналів.....	292
7.1.3.	Вектор діагностичних ознак в системах автоматизованої кардіодіагностики	297

7.1.4. Комп'ютерна програма “Статистична обробка циклічних сигналів серця”	301
7.2. Моделювання та аналіз динамічного підпису для задач біометричної аутентифікації особи в інформаційних системах	303
7.2.1. Новий підхід до математичного моделювання динамічного підпису	303
7.2.2. Методи опрацювання серії динамічних підписів на базі ЕОМ ...	304
7.2.2.1. Статистичний аналіз ритмічної структури серії динамічних підписів	304
7.2.2.2. Статистичний аналіз морфологічної структури серії динамічних підписів	306
7.2.3. Обґрунтування вектора аутентифікаційних ознак	308
7.2.4. Комп'ютерна програма «Облік робочого часу осіб на основі біометричної аутентифікації за динамічним підписом»	310
7.3. Висновки	311
Висновки	313
Список використаних джерел	316

ВСТУП

Коливні, циклічні явища та процеси займають одне із основних місць серед явищ та процесів дійсності. Циклічний характер носить багато фізичних, хімічних, технічних, біологічних, економічних, політичних, соціальних процесів. Зокрема, до циклічних явищ належать такі феномени як періодичне чергування пір року та дня і ночі, випромінювання пульсарів, спалахи на Сонці, магнітні бурі, процеси самоорганізації в синергетиці, хімічні реакції Жаботинського-Білоусова, робота різного роду електронних генераторів струмів та напруг, модульовані радіосигнали, циклічна робота механічних систем (двигунів, пропелерів, гвинтів), біоритми, робота серця людини і часова структура кардіосигналів, дихальний процес, процес розвитку цивілізацій [60, 62, 76, 96, 100, 103, 108, 152, 267, 303, 304, 319, 320].

Циклічні явища є об'єктами інтенсивного дослідження як в далекому минулому, так і в сучасній науці. Поняття циклу, циклічності, фази вже присутні у древніх індійських писаннях, зокрема в Рігведі містяться твердження про циклічний характер розвитку Всесвіту і про чотири основні його фази: Сатья-юга (золотий вік), Трета-юга (срібний вік), Двапара-юга (мідний вік), Калі-юга (залізний вік). На основі сезонних закономірностей фаз Місяця, руху планет та зірок стародавні цивілізації навчилися вимірювати час, створили календарі. На теренах західної філософської та наукової думки ще Піфагор, Платон, Арістотель, Птолемеї досліджували циклічні рухи небесних об'єктів, де вже плідно використовувалися поняття циклу, епіциклу, диференти. Ряд наукових робіт [164, 261, 291] вказують на фундаментальне місце поняття циклу та циклічності в сучасній науці. Автори цих праць обґрунтовують нову парадигму загальнонаукового знання, в основі якої лежить поняття циклу, і яка носить назву циклології.

Розробка сучасних інформаційних систем та технологій опрацювання та імітації циклічних сигналів різної природи дає змогу автоматизувати та суттєво інтенсифікувати процедуру їх аналізу, діагностування та прогнозування стану систем, у яких вони протікають, відкриває можливість проведення комп'ютерних імітаційних експериментів. Вагомим аргументом на користь використання таких систем автоматизованого аналізу циклічних сигналів є підвищення рівня його об'єктивності та достовірності, а саме, аналіз людиною-експертом дуже часто зумовлений природними обмеженнями сприйняття, помилками, що виникають внаслідок втоми та розсіяння уваги, відмінністю у досвіді різних експертів. Типовими прикладами таких систем є комп'ютерні системи кардіодіагностики, інформаційні системи аналізу та прогнозування циклічних економічних процесів, інформаційні системи аутентифікації особи за її біометричними динамічними даними, автоматизовані системи аналізу та

прогнозу електро-, газо-, водо-, нафто- споживання, програмно-апаратні засоби генерування та імітації циклічних сигналів.

Важливим етапом проектування інформаційних систем опрацювання та імітації циклічних сигналів є створення математичних моделей цих сигналів, які б адекватно відображали важливі, з точки зору задач дослідження, сторони їх просторово-часової структури. Якість (адекватність, конструктивність) математичної моделі циклічних сигналів суттєво визначає точність та достовірність методів їх опрацювання, імітації в інформаційній системі, зумовлює рівень інформативності та репрезентативності діагностичних (аутентифікаційних, прогностичних) ознак, які є характеристиками (параметрами) математичної моделі, впливає на достовірність прийнятих рішень та, певною мірою, зумовлює структуру програмної та апаратної складових проектованої інформаційної системи.

На рис. 1, подано основні етапи розробки та створення інформаційних систем опрацювання та імітації циклічних сигналів, а саме, шляхом виявлення на інтуїтивному феноменологічному рівні властивостей циклічних сигналів, які є важливі для розв'язання задач дослідження, конструюється математична модель, яка поряд із методами та алгоритмами опрацювання та імітації, визначає математичне забезпечення проектованої системи [51, 139, 145, 166, 245, 264, 318]. Далі це математичне забезпечення втілюється у відповіді програмно-апаратні засоби.

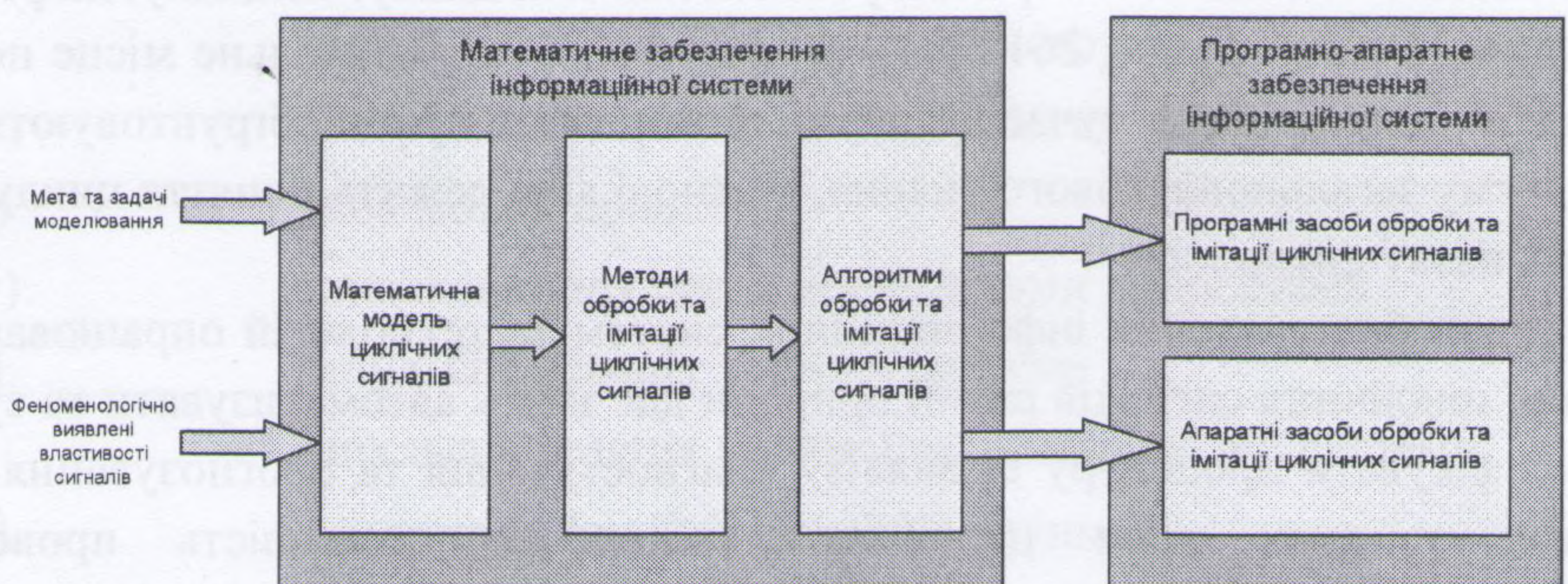


Рис. 1. Етапи розробки та створення інформаційної системи опрацювання та імітації циклічних сигналів

Першим та визначальним етапом проектування інформаційних систем опрацювання та імітації циклічних сигналів є створення їх математичних моделей, які б адекватно відображали важливі, з точки зору задач дослідження, сторони просторово-часової структури циклічних сигналів. Адже математична модель у значній мірі задає потенціал та ефективність створюваних інформаційних технологій, зумовлює структуру програмної та апаратної

складових проектованої інформаційної системи. Від якості математичної моделі циклічних сигналів (див. рис. 2) суттєво залежить точність та достовірність методів їх опрацювання та імітації в інформаційній системі, рівень інформативності та репрезентативності діагностичних, аутентифікаційних, прогностичних ознак, достовірність прийнятих рішень.

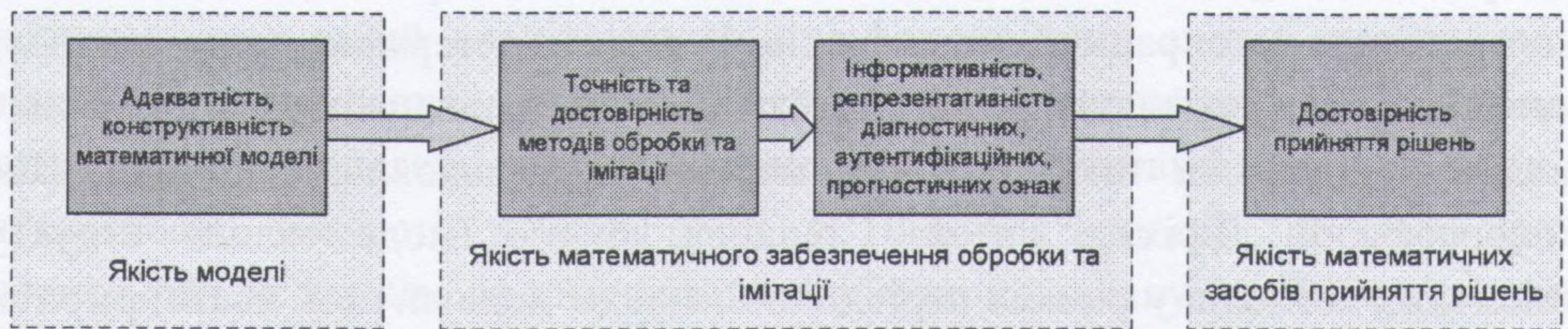


Рис. 2. Причинно-наслідкові зв'язки стосовно якості інформаційної системи опрацювання та імітації циклічних сигналів

Математичним моделям циклічних явищ та сигналів присвячена значна множина наукових праць. Умовно виділяють два підходи до розробки математичних моделей сигналів, зокрема циклічних сигналів, а саме, конструктивний та аксіоматичний. Цим двом підходам відповідають два великих класи математичних моделей сигналів, а саме, конструктивні моделі або моделі систем, що формують (генерують, породжують) досліджувані сигнали, та аксіоматичні математичні моделі сигналів або моделі структури даних (просторово-часової структури сигналів). У конструктивному підході акцент ставиться на побудові та дослідженні моделі не самого циклічного сигналу, а власне механізму (алгоритму) його породження (генерування, формування), зокрема шляхом запису диференціального чи інтегрального рівняння, що відображає функціонування коливної системи, яка породжує досліджуваний сигнал. Також до конструктивного підходу слід віднести теорію рядів та інтеграла Фур'є, моделі модульованих коливань, де складні коливання утворюється із простих (гармонічних, періодичних), моделі авторегресії-ковзного середнього із періодичною чи майже періодичною зміною їх коефіцієнтів. За конструктивного підходу до дослідження сигналів можуть виникати наступні задачі: задача пошуку результуючого (вихідного) сигналу за відомою конструкцією (а також її параметрами) та відомим вхідним сигналом системи (задача аналізу); задача створення конструкції, структури системи (задача структурної ідентифікації) чи задача підбору параметрів вже відомої конструкції системи (задача параметричної ідентифікації), щоб забезпечити формування вихідного сигналу із заданими (відомими) характеристиками. Аксіоматичний підхід сконцентрований не стільки на дослідженні механізму породження циклічного сигналу, скільки на моделюванні закономірностей його просторово-часової структури, тобто аксіоматичні математичні моделі сигналів

безпосередньо описують просторово-часове розгортання (еволюцію) досліджуваних сигналів.

Крім конструктивного та аксіоматичного підходів до моделювання сигналів, зокрема циклічних сигналів, у залежності від формального способу опису невизначеності у поведінці досліджуваного процесу, виділяють детермінований, стохастичний, нечіткий та інтервальний підходи до моделювання та опрацювання сигналів. У рамках детермінованого підходу до математичного моделювання та обробки циклічних сигналів вагомі результати досягнуто працями таких відомих вчених як Безикович, Бор, Бол, Вінер, Гоноровський, Діріхле, Ритов, Степанов, Фур'є (моделювання структури циклічних сигналів у рамках періодичної, майже періодичної, квазігармонічної функцій, квазімеандру та застосування методів спектрального аналізу) та Андронов, Боголюбов, Крилов, Ляпунов, Мандельштам, Пуанкаре (моделювання механізмів формування циклічних сигналів із використанням теорії диференціальних рівнянь). Серед провідних науковців, які займалися математичним моделюванням та аналізом циклічних сигналів у рамках теоретико-ймовірнісного підходу, слід назвати Крамара, Колмогорова, Слуцького, Хінчина (у рамках спектрально-кореляційної теорії стаціонарних випадкових процесів), Гаррі, Гарда, Гарднера, Калліанпура, Войчишина, Гладишева, Драгана, Коренкевича, Сікору, Стратоновича, Яворського І., Яворського Б. (у рамках теорії періодично-корельованих (циклостаціонарно корельованих) та майже періодично-корельованих (майже циклостаціонарно корельованих) випадкових процесів), Боме, Гансена, Гайселса, Кохела, Нематоллахі, Саргента, Солтані, Тсе, Дороговцева (у рамках теорії періодичних марковських випадкових процесів та ланцюгів), Драгана, Красильникова, Марченка, Приймака, Щербака (у рамках теорії лінійних періодичних випадкових процесів, процесів із незалежними періодичним приростами та періодичних білих шумів).

Незважаючи на значні здобутки у сфері математичного моделювання, опрацювання та імітації циклічних сигналів в інформаційних системах, має місце ряд недоліків, які розкриті у цій монографії, що у значній мірі зумовлені недостатнім рівнем розбудови теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів в інформаційних системах, що дає підстави сформулювати науково-прикладну проблему її розвитку в напрямку створення нових моделей та методів опрацювання циклічних сигналів, які б як частинні випадки охоплювали відомі засоби їх моделювання та опрацювання, у рамках єдиного теоретико-методологічного підходу враховували б широкий спектр можливих атрибутів циклічності (для відображення не лише точної чи ймовірнісної повторюваності у структурі сигналів) та значне структурне багатоманіття

закономірностей мінливості та спільності ритму циклічних сигналів, що, як наслідок, підвищить точність, достовірність та рівень інформативності їх опрацювання та імітації в інформаційних системах. Власне ця монографія і присвячена вирішенню цієї важливої науково-прикладної проблеми.

Монографія складається із семи розділів.

У першому розділі монографії на основі огляду літературних джерел проведено критичний аналіз існуючих інформаційних систем опрацювання, імітації та генерування циклічних сигналів різної природи та структури, їх математичних моделей, методів опрацювання та імітації з точки зору їх адекватності, точності, достовірності та інформативності, що дало змогу виявити ряд недоліків, сформулювати науково-прикладну проблему розвитку теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів в інформаційних системах.

У другому розділі монографії сформульовано концепцію теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів в інформаційних системах. Завдяки означенню абстрактного циклічного функціонального відношення та встановленню необхідних та достатніх умов для його функції ритму розвинуто математичні основи теорії моделювання та опрацювання циклічних сигналів в інформаційних системах. Проведено класифікацію циклічних функцій.

У третьому розділі монографії, шляхом конкретизації основних властивостей абстрактних циклічних функцій, дано означення та досліджено властивості важливих їх підкласів, що можуть застосовуватися як нові математичні моделі досліджуваних на практиці циклічних процесів та сигналів. А саме, у залежності від конкретного типу невизначеності у структурі досліджуваних циклічних сигналів, виділено чотири класи їх математичних моделей: циклічні детерміновані функції, випадкові функції із циклічними ймовірнісними характеристиками, циклічні інтервальні функції та циклічні нечіткі функції. Зокрема, означено числову, векторну, матричну циклічні детерміновані функції, циклічну відносно множини інтервалів функцію, циклічний випадковий процес та вектор циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. Досліджено ймовірнісні характеристики циклічних випадкових процесів із зонною часовою структурою.

У четвертому розділі монографії досліджено перетворення циклічних функціональних відношень, що відображають ряд важливих з точки зору теорії та практики перетворень циклічних процесів та сигналів, які мають місце у задачах їх опрацювання, генерування та комп'ютерної симуляції. Зокрема, встановлено умови, за яких вихідний сигнал лінійної та нелінійної безінерційних систем буде циклічним, встановлено аналітичні вирази та доведено періодичність моментних функцій вихідного процесу нелінійної

динамічної системи, яка описується часоінваріантним функціональним поліномом Вольтерра скінченного порядку нелінійності, коли на її вхід діє періодичний білий шум, встановлено аналітичні залежності між функціями ритму циклічних функціональних відношень, які пов'язані через оператор перетворення шкали.

У п'ятому розділі монографії розроблено метод оцінювання функції ритму циклічного сигналу, статистичні методи оцінювання ймовірнісних характеристик циклічного випадкового процесу та вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів, метод спектрального аналізу циклічних сигналів зі змінним ритмом, метод дискретизації циклічних сигналів у цифрових інформаційних системах.

У шостому розділі монографії розроблено методи імітаційного моделювання на ЕОМ циклічних сигналів, моделями яких є циклічні функціональні відношення, а саме, числова, векторна циклічні детерміновані функції, циклічна відносно множини інтервалів функція, випадкові процеси та вектори із циклічними ймовірнісними характеристиками, зокрема, циклічні білі шуми, процеси із незалежними циклічними приростами та циклічні марковські випадкові процеси.

У сьомому розділі монографії проведено апробацію отриманих у ній теоретичних положень та прикладних результатів у сфері технічної кардіометрії та біометричної аутентифікації особи в інформаційних системах за динамічним підписом. Обґрунтовано нові математичні моделі циклічних біометричних сигналів, а саме, кардіосигналів різної фізичної природи та серій динамічних підписів у вигляді циклічного випадкового процесу та вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. Запропоновано нові діагностичні ознаки та методи статистичного аналізу циклічних біометричних сигналів у сучасних інформаційних системах.