

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ
НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ
З ПОДВІЙНОЮ ДОВГОЮ ПАМ'ЯТТЮ**



Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ
ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ
З ПОДВІЙНОЮ ДОВГОЮ ПАМ'ЯТТЮ**

Монографія

За загальною редакцією Р. Н. Кветного

Вінниця
ВНТУ
2012

УДК 004.942

ББК 32.81

I-74

Автори:

**Р. Н. Кветний, Л. М. Кислиця, В. Ю. Коцюбинський,
В. В. Усов.**

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 11 від 30.06.2011 р.)

Рецензенти:

С. Д. Штовба, доктор технічних наук, доцент;
В. М. Лисогор, доктор технічних наук, професор.

I-74 **Інформаційна** технологія прийняття рішень на основі прогнозування часових рядів з подвійною довгою пам'яттю: монографія / за заг. ред. Р. Н. Кветного. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 140 с.

ISBN 978-966-641-449-9

Розглянуто інформаційну технологію підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності із врахуванням результатів моделювання та прогнозування часових рядів з подвійною довгою пам'яттю. Шляхом модифікації структури вдосконалено математичні моделі часових рядів з подвійною довгою пам'яттю, що дало змогу підвищити адекватність моделей і таким чином зменшити похибку прогнозування рядів з подвійною довгою пам'яттю. Розроблено нечіткий класифікатор виду часового ряду та інформаційну систему підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності, показано її використання у різних прикладних областях.

УДК 004.942

ББК 32.81

ISBN 978-966-641-449-9

© Р. Кветний, Л. Кислиця, В. Коцюбинський, В. Усов, 2012

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ В ЗАДАЧАХ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ.....	8
1.1. Багатокритеріальні задачі прийняття рішень.....	8
1.1.1. Постановка задачі багатокритеріального вибору.	8
1.1.2. Аналіз методів прийняття рішень в умовах багатокритеріальності.....	10
1.2. Аналіз використання часових рядів у різних галузях науки і техніки	14
1.3. Огляд та аналіз методів для моделювання та прогнозування часових рядів	17
1.3.1. Аналіз методів моделювання та прогнозування стаціонарних часових рядів.	17
1.3.2. Аналіз методів моделювання та прогнозування нестационарних часових рядів.....	19
1.3.3. Аналіз методів моделювання та прогнозування	22
1.3.4. Аналіз методів моделювання гетероскедастичних часових рядів.....	28
1.4. Аналіз методів ідентифікації виду часових рядів	34
1.4.1. Аналіз підходів до класифікації часових рядів.....	34
1.4.2. Огляд методів ідентифікації виду часових рядів.....	36
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДУ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ З ПОДВІЙНОЮ ДОВГОЮ ПАМ'ЯТТЮ.....	41
2.1. Розробка процедури автоматичної класифікації виду часового ряду.....	41
2.1.1. Постановка задачі класифікації часових рядів.	42
2.1.2. Класифікація виду часового ряду із використанням алгоритму нечіткого логічного висновку.	47
2.2.1. Розробка моделей часових рядів з подвійною довгою пам'яттю.	54

2.2.2. Дослідження поведінки автокореляційної функції часового ряду з подвійною довгою пам'яттю	58
2.3. Сутність методу для класифікації та моделювання часових рядів з подвійною довгою пам'яттю	62
2.4. Приклад застосування методу класифікації та моделювання часового ряду з подвійною довгою пам'яттю	65
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИХ ЗАДАЧАХ	69
3.1. Критерії оцінки альтернативних рішень	69
3.1.1. Вибір критеріїв оцінки альтернативних рішень	69
3.2. Оцінка ефективності рішень в умовах ієрархії критеріїв	76
3.3. Інформаційна технологія прийняття рішень на основі прогнозування часових рядів в умовах багатокритеріальності.....	80
3.4. Оцінка впливу прогнозування на процес прийняття рішень.....	84
3.4.1. Оцінка помилок першого та другого роду прогнозування випадкового процесу.....	84
3.4.2. Оцінка впливу прогнозування за допомогою функції втрат.....	89
РОЗДІЛ 4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АПРОБАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	93
4.1. Розробка архітектури СППР	93
4.2. Розробка інтерфейсу системи обробки даних.....	97
4.3. Використання СППР для прийняття рішень в різних прикладних областях	104
4.3.1. Оцінювання робочого стану гідроагрегатів на основі прогнозування рівня вібрації.....	104
4.3.2. Моделювання процесу прийняття рішення для розподілення завантаженості мережі.	113
4.3.3. Застосування СППР для формування портфеля цінних паперів за результатами прогнозування ціни фінансових активів.	120
ЛІТЕРАТУРА	128

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АКФ	автокореляційна функція
АРІКС	модель авторегресії з інтегрованим ковзним середнім
АРКС	модель авторегресії з ковзним середнім
АРУГ	авторегресійна умовно гетероскедастична модель
АРЧІКС	модель авторегресії з частково інтегрованим ковзним середнім
ГУГ	гіперболічна умовно гетероскедастична
ІУГ	інтегрована умовно гетероскедастична;
МНК	метод найменших квадратів
ОПР	особа, яка приймає рішення
ПР	прийняття рішення
СКП	сума квадратів похибок
СППР	система підтримки прийняття рішень
ЧАКФ	часткова автокореляційна функція
ЧІУГ	частково інтегрована умовно гетероскедастична

ВСТУП

Розвиток сучасного виробництва і науки загалом можна охарактеризувати як нелінійний та стрибкоподібний. Це обумовлено широким впровадженням сучасних технологій, «технологізацією» виробництва і, як наслідок, підвищенням продуктивності праці, темпів глобалізації світової економіки. Тому останнім часом все більше зростає потреба в системах, які здатні виконувати не тільки запрограмовану послідовність дій над раніше визначеними даними, але й здатні самі аналізувати нову інформацію, знаходити в ній закономірності, проводити прогнозування, приймати рішення тощо.

Використання результатів моделювання та прогнозування ходу часових рядів, які описують поведінку об'єктів, займає важливий етап в процесі прийняття рішень для підвищення їх ефективності та зниження ймовірності появи неправильних рішень.

Математичному моделюванню та прогнозуванню часових рядів різної природи приділено багато уваги у роботах зарубіжних та вітчизняних вчених [10, 28 – 30, 36, 49 – 52, 56, 87, 88, 105].

Не дивлячись на значну кількість серйозних наукових досліджень, теоретичних робіт і численних публікацій, проблема аналізу і прогнозування часових рядів на сучасному етапі розвитку науково-дослідної бази стосується в основному стаціонарних часових рядів. Не досліджений механізм впливу всієї сукупності чинників на поведінку часового ряду, а саме, не виявлені особливості застосування системного аналізу і прогнозування нестаціонарних часових рядів, особливо так званих часових рядів з довгою та подвійною довгою пам'яттю, які характеризуються гіперболічною автокореляційною функцією. Явища, які можуть бути описані процесами такого виду, зустрічаються у різноманітних областях людської діяльності: енергетиці, телекомунікації, економіці тощо.

Універсальних та досконалих підходів до ідентифікації та моделювання часових рядів такого типу на сьогодні не існує. Тому є актуальним не тільки вдосконалення підходів та моделей для класифікації та моделювання часових рядів з довгою пам'яттю, але й дослідження, в якій мірі результати прогнозування впливають на оцінку альтернативних рішень. І на основі виконаних досліджень розробити інформа-

ційну технологію підтримки прийняття рішень шляхом прогнозування часових рядів, в тому числі і з довгою та подвійною довгою пам'яттю.

Прийняття рішення в реальних технологічних чи економічних системах вимагає, як правило, оцінки цілої низки критеріїв. Саме тому в таких випадках виникає потреба у вирішенні задач багатокритеріального вибору та оцінці альтернативних рішень на основі визначеного набору критеріїв. На сьогодні існує мала кількість підходів до розв'язання задач цього класу, які враховують результати прогнозування ходу часових рядів, що описують поведінку об'єкта [44, 45, 53, 60]. А серед існуючих систем підтримки прийняття рішень (СППР), які дозволяють включити в оцінку альтернативних рішень критерії, що аналізують ефективність моделей часових рядів та їх прогнозну силу, немає таких, які ефективно можуть працювати з часовими рядами з довгою та подвійною довгою пам'яттю.

Тому актуальними є не тільки теоретичні дослідження в області класифікації, моделювання та прогнозування часових рядів з довгою та подвійною довгою пам'яттю, але й розробка інформаційної технології підтримки прийняття рішень в умовах багатокритеріальності на основі результатів прогнозування часових рядів такого типу.

Монографія написана за результатами кандидатської дисертації Л. М. Кислиці, яка виконана під науковим керівництвом професора Р. Н. Кветного, та за результатами наукових досліджень кандидатів технічних наук Вінницького національного технічного університету В. Ю. Коцюбинського та В. В. Усова.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ В ЗАДАЧАХ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

1.1. Багатокритеріальні задачі прийняття рішень

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується інтенсивними дослідженнями в області створення систем підтримки прийняття рішень (СППР) [13, 15 – 18, 21, 22, 48, 83, 87, 88, 97, 99, 102]. Однією з типових є задача багатокритеріального прийняття рішень (ПР) [77, 79].

На сьогодні запропоновано значну кількість методів та процедур багатокритеріального ПР [19, 26, 27, 44, 45, 60, 78, 91, 93, 112]. Однак взаємно суперечливі вимоги універсальності процедур ПР і врахування можливостей особи, яка приймає рішення, приводять до того, що жоден з існуючих методів в повній мірі не забезпечує одночасного виконання цих вимог. З цієї причини не зменшується інтерес дослідників до розробки і дослідження методів ПР.

В цьому підрозділі розглядаються основні принципи теорії прийняття рішення, вводиться поняття оптимального критерію та формулюються умови та методи вирішення багатокритеріальної задачі вибору.

1.1.1. Постановка задачі багатокритеріального вибору. Задачу найкращого вибору вивчає теорія прийняття рішень (ПР). З її допомогою можна здійснити вибір більш обґрунтовано, ефективно використовуючи апріорну інформацію про вимоги та очікувані результати.

Зазвичай вважається що оптимальним є таке можливе рішення, яке якнайповніше відповідає намірам, інтересам або цілям особи, що приймає рішення (ОПР). Наміри ОПР досягти певної мети іноді вдається в математичних термінах виразити у вигляді максимізації (або мінімізації) деякої числової функції, заданої на множині X [60].

Проте в складніших ситуаціях доводиться мати справу не з однією, а відразу декількома такими функціями. Якщо явище розглядається в динаміці, поетапно, то для оцінки кожного етапу теж доводиться вводити окрему функцію (в цьому випадку також доводиться враховувати декілька функціональних показників).

Надзвичайно широкий і важливий з практичної точки зору клас задач вибору складають багатокритеріальні задачі, в яких якість рішення, що приймається, оцінюється за декількома критеріями одночасно.

Задачу прийняття рішення в умовах багатокритеріальності можна сформулювати таким чином: необхідно знайти розв'язок такої задачі, що описується функцією виду [60]:

$$\begin{aligned} (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \xrightarrow{x \in D} \min, \\ D = \{x \in E^m \mid g_j(x) \leq 0, j = 1, J\}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де $f_i(x)$, $i = \overline{1, n}$ – критерії, які оптимізуються; D – множина допустимих розв'язків x ; $g_j(x)$, $j = \overline{1, J}$ – функції обмежень; m – розмірність простору параметрів.

Тобто задачу вибору, що містить множину можливих розв'язків X і сукупність критеріїв оцінки розв'язків, називають багатокритеріальною задачею [53, 79].

Більшість методів багатокритеріального вибору досить складні і не забезпечують повноту порівнянь, не враховують всю сукупність критеріїв або ж оцінка альтернативних варіантів ведеться лише по числових або нечислових критеріях. При виборі кращого рішення в таких задачах недостатньо уваги надається врахуванню вимог ОПР, інформації про важливість експертів для ОПР при одночасному збереженні множинності критеріїв, що також мають різну значущість [42, 46, 79, 91, 100, 102].

У класифікаційних методах ПР важливою проблемою є пошук еталонних представників класів, наявність яких прискорює розпізнавання ситуації, що склалася, а значить і вибір кращого рішення. Особливо актуальними представляються задачі розкладання складних ситуацій на класи і знаходження еталонних представників класів, коли ситуації описані нечіткою множиною іншого рівня.

У зв'язку з цим виникає потреба в створенні зручніших і досить надійних методів багатокритеріального вибору рішень на основі обробки експертних знань і нечіткого розпізнавання ситуацій.

1.1.2. Аналіз методів прийняття рішень в умовах багатокритеріальності. При розробці методів розв'язування багатокритеріальних задач потрібно вирішувати декілька проблем, основними з яких є проблема вибору принципу компромісу і відповідного йому принципу оптимальності [91], проблема врахування пріоритету критеріїв [84], проблема нормалізації критеріїв тощо.

Проблема вибору принципу компромісу і відповідного йому принципу оптимальності є ключовою, оскільки пов'язана з визначенням властивостей оптимального рішення і вирішення питання: у якому сенсі оптимальне рішення краще за всі інші [60]. Проблема врахування пріоритетів критеріїв виникає тоді, коли локальні критерії мають різну значущість, що викликає необхідність оцінки міри їх впливу на розв'язок задачі (необхідність знаходження пріоритетів критеріїв). Тут же виникає проблема нормалізації критеріїв, яка обумовлена тим, що локальні критерії мають, як правило, різні одиниці та масштаби вимірювань, що робить практично неможливим їх безпосереднє порівняння [84].

В даний час серед методів розв'язування задач багатокритеріального вибору, що мають, з одного боку, визнану теоретичну обґрунтованість, а з іншого боку, що задовольняють вимогу універсальності, найбільшого поширення набули методи теорії корисності, методи теорії нечітких множин, методи векторної стратифікації і метод аналізу ієрархій Сааті [95, 96]. Основні положення для кожного з них розглянуто далі.

Теорія багатовимірної корисності дозволяє для задач багатокритеріального вибору отримати функцію багатовимірної корисності, максимальне значення якої відповідає найкращому варіанту. Зазвичай багатовимірна функція корисності виходить як адитивна або мультиплікативна комбінація одновимірних функцій, які будуються на основі результатів опитування експертів і дозволяють провести ранжирування можливих результатів без взаємного порівняння альтернатив. При

цьому робиться припущення про взаємну незалежність критеріїв по корисності. Відзначимо, що процедура побудови функції корисності вимагає залучення значних об'ємів інформації і є досить трудомісткою. Перевагою цього підходу є можливість оцінки будь-якої кількості альтернативних варіантів з використанням отриманої функції. В разі нестійкої вихідної інформації використання методів теорії корисності стає малоефективним [95, 96].

Теорія нечітких множин, яку запропонував Л. Заде [47], дозволяє представити знання про перевагу альтернатив за різними критеріями за допомогою нечіткої множини. Формування нечіткої множини є простішим і менш трудомісткою процедурою, ніж побудова функції корисності. Теорія нечітких множин пропонує різні засоби для врахування взаємозв'язків між критеріями: використання вагових коефіцієнтів, нечіткий логічний висновок на правилах, визначення кращої альтернативи тощо. Основною проблемою багатокритеріального вибору із застосуванням нечітких моделей є представлення інформації про зв'язки між критеріями і способи обчислення інтегральних оцінок [33, 47].

Методи векторної стратифікації ґрунтовані на процедурах побудови структурованого багатокритеріального простору і розбиття його на задане число впорядкованих шарів (страт). Методи векторної стратифікації дають можливість проводити комплексну оцінку і вибір кращих з об'єктів на основі як кількісної, так і якісної вихідної інформації.

Метод аналізу ієрархій (МАІ) (або метод Сааті) є замкнутою логічною конструкцією, що забезпечує за допомогою простих правил аналіз складних проблем [95, 96]. Метод заснований на парних порівняннях альтернативних варіантів по різних критеріях з використанням бальної шкали (як правило, від 1 до 9 балів) і подальшим ранжуванням набору альтернатив по всіх критеріях і цілях. Зв'язки між критеріями враховуються шляхом побудови ієрархії критеріїв і застосування парних порівнянь для виявлення важливості критеріїв і підкритеріїв.

Ідея методу ієрархій полягає в тому, що множини елементів, яка відображає складну ситуацію, можна об'єднати в групи відповідно до основних властивостей елементів. Така модель дозволяє повторювати цей процес так, що групи, або їх загальні властивості, розглядаються як елементи наступного рівня системи [95, 96].

Ці елементи, в свою чергу, можуть бути згруповані відповідно до інших виділених властивостей, створюючи елементи ще більш високого рівня, і так до тих пір, поки не буде досягнута мета процесу прийняття рішення. Ця система групування рівнів, кожен з яких характеризується множиною ознак, називається ієрархією.

Нерівномірність впливу ознак на досягнення кінцевої мети приводить до необхідності визначення інтенсивності впливу ознак на кінцеву оцінку альтернативи. Визначення пріоритетів ознак відносно мети зводиться до послідовності задач визначення пріоритетів ознак для кожного рівня, а кожна така задача – до послідовності попарних порівнянь [95, 96].

Якість альтернативи визначається ієрархічною системою векторів:

$$y^{(j-1)} = \{y_i^{(j-1)}\}_{i=1}^{n^{(j-1)}}, \quad j \in [2, m], \quad (1.2)$$

де $y^{(j-1)}$ – вектор критеріїв на $(j-1)$ -ому рівні ієрархії, за компонентами якого оцінюється якість властивостей альтернативи на j -му рівні; m – кількість рівнів ієрархії; $n^{(j-1)}$ – кількість оцінюваних властивостей $(j-1)$ -го рівня ієрархії. Чисельні значення n критеріїв у (1) = y першого рівня ієрархії для даної альтернативи задані. Тому можна стверджувати, що $n^{(1)} = n$ й $n^{(m)} = 1$.

Один і той же критерій $(j-1)$ -го рівня може брати участь в оцінці декількох властивостей j -го рівня, тобто в ієрархії можливі перехресні зв'язки. Структурна схема системи критеріїв якості альтернативи показана на рис. 1.1.

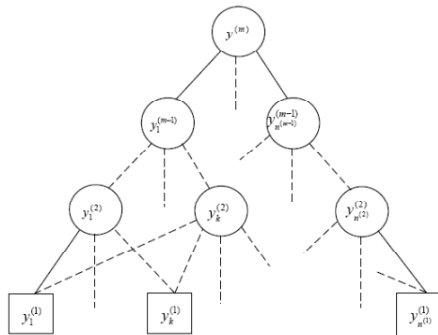


Рис.1.1. Структурна схема системи критеріїв якості рішення

Важливість (значущість) кожної з компонент критерію $(j - 1)$ -го рівня при оцінці k -ої властивості j -го рівня характеризується коефіцієнтом пріоритету, сукупність яких складає систему векторів пріоритету:

$$p^{(j-1)} = \{p_k^{(j-1)}\}_{k=1}^{n^{(j)}}, j \in [2, m]. \quad (1.3)$$

Тоді постановка задачі при багатокритеріальному виборі формулюється таким чином: необхідно знайти аналітичну оцінку $u^{(m)}$ і якісну оцінку ефективності кожного альтернативного рішення у вигляді загального критерію прийняття рішення і вибрати найкращу [95, 96].

Однак метод Сааті володіє такими недоліками:

– збір даних для підтримки прийняття рішення здійснюється головним чином за допомогою процедури парних порівнянь, результати якої можуть бути суперечливими. Тому виникає необхідність у повторному перегляді даних для мінімізації протиріч.

– в рамках методу аналізу ієрархій немає засобів для перевірки достовірності даних.

Але не дивлячись на наявні недоліки, метод володіє універсальністю застосування, простотою у реалізації і можливістю розбити трудомістку задачу на сукупність дрібніших підзадач.

На основі проведеного літературного аналізу було виділено низку критеріїв для оцінки використання кожного методу ПР для досягнення мети дослідження та складено таблицю, яка показує присутність того чи іншого критерію у розглянутих методах. Аналіз представлений у табл. 1.1, де позначкою «+» відмічено наявність даної властивості, а «-» – її відсутність.

В цій монографії розглядається розроблена інформаційна технологія підтримки прийняття рішень на основі прогнозування часових рядів, зокрема рядів з довгою та подвійною довгою пам'яттю. Якщо явище можна описати часовим рядом, то врахування результатів прогнозування його майбутнього розвитку дозволить підвищити ефективність прийняття рішення в цій предметній області.

Тому на основі проведеного аналізу методів ПР (див. табл.1.1.) вирішено розробити інформаційну технологію шляхом модифікації ме-

тоду Сааті, яка б дозволила врахувати не тільки результати прогнозування часових рядів, що описують явище чи об'єкт, але і експертні оцінки особи, що приймає рішення.

Таблиця 1.1

Оцінка методів ПР

Методи ПР	Простота	Точність	Врахування експертних оцінок	Врахування пріоритетності критеріїв	Можливість врахування прогнозування
Теорія корисності	–	–	+	–	–
Теорія нечітких множин	–	+	+	–	+
Метод векторної стратифікації	+	+	–	+	–
Метод аналізу ієрархій Сааті	+	–	+	+	+

1.2. Аналіз використання часових рядів у різних галузях науки і техніки

У всіх сферах людської діяльності необхідне передбачення перспектив розвитку, майбутніх наслідків процесів, що відбуваються навколо, а також явищ, які можуть виникнути в майбутньому і незалежно від направлених дій. Виявлення закономірності розвитку і передбачення зміни майбутньої соціально-економічної реальності є метою вивчення будь-якого суспільного явища. Вплив на майбутні процеси неможливий без урахування історії їх розвитку, тобто минулого. Зміна явища відображається за допомогою хронологічно впорядкованих значень ознак, що характеризують це явище в різних часових проміжках. Таке відображення прийнято називати рядом динаміки або часовим рядом, а окремі значення ознаки – рівнями часового ряду [36, 72].

Таким чином, часовий ряд є сукупністю спостережень випадкового процесу.

Часові ряди використовуються у різних областях та галузях: в економіці, енергетиці, біології, у космічній локації тощо [35, 38, 41, 52, 54, 57, 81, 82, 90].

Характеристики часових рядів. Для докладнішого вивчення часових рядів використовуються ймовірнісно-статистичні моделі. Тоді часовий ряд y_t розглядається як реалізація деякого випадкового процесу (з дискретним часом) з наступними основними характеристиками:

- математичне сподівання часового ряду y_t : $E[y_t]$;
- дисперсія часового ряду y_t : $D[y_t] = \sigma_t^2$;
- автокореляційна функція часового ряду y_t :

$$\rho(t, s) = E(y_t - E[y_t])(y_s - E[y_s]). \quad (1.4)$$

Всі випадкові процеси можна умовно поділити на два види: стаціонарні і нестаціонарні.

Стаціонарний процес – процес, імовірнісні характеристики якого залишаються незмінними в часі [28]. Під стаціонарними рядами розуміються випадкові процеси y_t , характеристики яких не змінюються з часом t , тобто інваріантні щодо часових зрушень $t \rightarrow t+T$, $y_t \rightarrow y_{t+1}$ при будь-якому фіксованому T [30, 34, 36].

Розрізняють стаціонарність в широкому значенні та у вузькому значенні. Стаціонарність в широкому значенні вимагає, щоб обов'язково математичне сподівання та автоковаріація були константами. Умовою стаціонарності у вузькому значенні є інваріантність n -вимірної щільності ймовірності відносно часового зсуву τ .

Формально випадковий процес із скінченим середнім та дисперсією називають стаціонарним у широкому значенні, якщо для всіх t і $t-s$, ($k = 0, 1, 2, \dots$; $t = 0, 1, 2, \dots$) виконуються такі умови:

- математичне сподівання не залежить від часу:

$$E[y_t] = E[y_{t-s}] = \mu = const, \quad (1.5)$$

- дисперсія залишається незмінною за величиною для всього часового інтервалу, на якому розглядається процес:

$$E\{[y_t - \mu]^2\} = E\{[y_{t-s} - \mu]^2\} = \sigma_y^2 = const \quad (1.6)$$

- автоковаріація залишається незмінною в часі для всього часового інтервалу і залежить тільки від вибраних моментів часу t і $t - s$:

$$E\{[y_t - \mu][y_{t-s} - \mu]\} = E\{[y_{t-j} - \mu][y_{t-j-s} - \mu]\} = \gamma_s = const \quad (1.7)$$

або $cov[y_t, y_{t-s}] = cov[y_{t-j}, y_{t-j-s}] = \gamma_s = const$.

В подальшому будуть розглядатись процеси, які є стаціонарні в широкому значенні.

Процес буде вважатись *нестационарним*, якщо не виконується хоча б одна з умов (1.5) – (1.7). Нестационарні процеси характерні для більшості технічних систем – економіки, фінансів, біологічних та ін. [28].

Далеко не завжди значення часового ряду формуються тільки під впливом яких-небудь чинників. Особливий інтерес викликають процеси, що знаходяться в так званому «перехідному» режимі, тобто процеси, що є по суті стаціонарними, але на досліджуваному проміжку часу вони проявляють властивості нестационарного часового ряду, що пояснюється нечіткими для стаціонарного режиму початковими умовами [28 – 30, 56, 59]. У ситуаціях, коли часовий ряд формується під впливом деякого набору випадкових і не випадкових чинників, аналіз окремих часових рядів має величезне значення. Це необхідно для правильної ідентифікації моделей, які будуються за інформацією про досліджувані процеси (векторні авторегресії, моделі корекції похибок, динамічні моделі з розподіленими запізненнями тощо) [28, 30, 34].

Беручи до уваги складні умови протікання часових рядів, значну сукупність зовнішніх та внутрішніх факторів, які на нього впливають, з широкого класу нестационарних часових рядів можна виділити так звані випадкові процеси з *довгою пам'яттю*, для яких лише в кінці ХХ століття були запропоновані математичні моделі їх аналізу [90]. Необхідно відзначити, що поняття довгої пам'яті є проміжним між поняттями пам'яті короткої (стаціонарні ряди) і пам'яті нескінченної (нестационарні ряди). Це зауваження набуває особливого значення,

оскільки дуже часто важко провести жорстке розмежування між цими типами поведінки часових рядів, особливо у разі розгляду економічних даних або інформаційних потоків в технічних системах. Для ряду з короткою пам'яттю, ефект «шоку» не робить впливу на поведінку аналізованого ряду в довгостроковому періоді [6–9]. І навпаки, для ряду, що характеризується нескінченною пам'яттю, ефект шоку позначається на всіх без винятку майбутніх його значеннях. У проміжному випадку наявність ефекту довгострокової пам'яті приводить до вкрай тривалих, але не перманентних наслідків шоку. Ці наслідки не є постійними в тому сенсі, що рано чи пізно ряд повернеться до свого рівноважного стану (такий стан часто називають «нормальним» або «природним»), тоді як ряд з нескінченною пам'яттю ніколи не повертається до рівноважного стану після шоку, що відбувся.

В цій монографії основну увагу приділено прийняттю рішень щодо об'єктів, поведінку яких можна описати часовими рядами з довгою пам'яттю.

1.3. Огляд та аналіз методів для моделювання та прогнозування часових рядів

Кожен вид часових рядів вимагає своїх специфічних методів для моделювання та прогнозування їх поведінки. Розглянемо основні методи моделювання основних типів часових рядів та підходи до їх прогнозування.

1.3.1. Аналіз методів моделювання та прогнозування стаціонарних часових рядів. При аналізі часових рядів основна увага приділяється дослідженню, опису і/або моделюванню їх структури. Побудована модель далі використовується для екстраполяції або прогнозування часового ряду, і тоді якість прогнозу може служити корисним критерієм при виборі з кількох альтернативних моделей.

Побудова якісних моделей ряду необхідна і для інших цілей, наприклад, коректування сезонних ефектів і згладжування. Крім того, побудовані моделі можуть використовуватися для статистичного моделювання довгих рядів спостережень при дослідженні великих сис-

тем, для яких часовий ряд розглядається як вхідна інформація [24, 25, 28–30, 39, 59, 76, 85, 105].

До основних моделей стаціонарних часових рядів належать такі моделі: авторегресійна, ковзне середнє та їх комбінація АР (р), КС (q), АРКС (р, q).

Авторегресійний процес порядку р – АР (р). Авторегресійний процес (АР) – це процес, в якому наступні значення знаходяться в лінійній залежності від попередніх. АР бувають першого порядку (Марківський процес) і другого (процес Юла). Авторегресійні моделі досліджені та описані багатьма вченими [30, 34, 39, 43, 56, 59].

Загальний вигляд авторегресійного процесу можна представити у вигляді [30]:

$$y_t = \alpha + \rho_1 y_{t-1} + \dots + \rho_p y_{t-p} + \varepsilon_t, \quad (1.8)$$

де ε_t – білий шум, p – порядок КС, ρ_p – коефіцієнти авторегресії.

Процес ковзного середнього q – КС (q). Загальний вигляд даного процесу можна представити у вигляді [30]:

$$y_t = \alpha + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}, \quad (1.9)$$

де ε_t – білий шум, q – порядок КС, θ_q – коефіцієнти ковзного середнього.

Математичне сподівання процесу ковзного середнього визначається як $\alpha = M(Y_t)$. Дисперсія процесу обраховується таким чином [30]:

$$\begin{aligned} D[y_t] &= \nu_0 = E[y_t - \alpha]^2 = E[\varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}]^2 = \\ &= \sigma^2 (1 + \theta_1^2 + \dots + \theta_q^2) \end{aligned} \quad (1.10)$$

Тепер підрахуємо автоковаріацію АСF:

$$\begin{aligned} \nu_L &= \text{Cov}(y_t - \mu, y_{t+L} - \mu) = 0, \text{ якщо } L > q \\ \text{ACF}(L) &= \begin{cases} 1, & L = 0; \\ \dots & \\ 0, & L > q. \end{cases} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Часткова автокореляційна функція КС (q) аналогічно автокореляційній функції для АР (p) процесу експоненціально спадає [30, 34, 57, 76].

Комбінація авторегресії та ковзного середнього – АРКС (p, q). Безліч стаціонарних процесів, як правило, не вдається змоделювати за допомогою чистого авторегресійного процесу чи ковзного середнього, оскільки вони володіють якостями обох процесів.

Тоді комбінацією авторегресії порядку p і ковзного середнього порядку q (так звана модель АРКС (p, q)) є процес виду [30]:

$$y_t = \alpha + \rho_1 y_{t-1} + \dots + \rho_p y_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}, \quad (1.12)$$

де ε_t – білий шум;

$$\sum_{i=1}^p \rho_i y_{t-i} \text{ – авторегресійний член порядку } p;$$

$$\sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \text{ – член ковзного середнього порядку } q.$$

При побудові моделей часових рядів методом АРКС використовується загальноприйнята методика, описана в [30]. Але цей метод моделювання ефективний лише для стаціонарних рядів. Оскільки більшість процесів, які спостерігаються в природі та прикладних областях, належать до нестаціонарних, то є потреба зосередити увагу на методах моделювання нестаціонарних процесів.

1.3.2. Аналіз методів моделювання та прогнозування нестаціонарних часових рядів. На практиці більшість рядів, з якими працює дослідник, є нестаціонарними, і характеристики ряду змінюються в часі.

Нестаціонарний ряд називається гомоденічним, якщо його можна звести до стаціонарного, узявши послідовні різниці деякого порядку. Якщо ряд, складений з кінцевих різниць порядку d нестаціонарного часового ряду y_t , є стаціонарним, то говорять, що ряд y_t є інтегрованим порядку d і позначають $y_t \sim I(d)$ [30].

Нехай ряд є інтегрованим порядку d . Позначимо $\omega_t = \Delta^d y_t$, де Δ означає взяття послідовних різниць, тобто $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$,

$\Delta^2 y_t = \Delta y_t - \Delta y_{t-1}$. Ряд w_t є стаціонарним часовим рядом. Знаючи ряд ω_t , можна отримати початковий ряд y_t , підраховуючи суму ряду ω_t d разів. Якщо позначити $y_t = \sum^d \omega_t$, де $\sum \omega_t = \sum_{\tau=-\infty}^t \omega_\tau$, $\sum^2 \omega_t = \sum_{j=-\infty}^t \sum_{\tau=-\infty}^j \omega_\tau$, тоді $y_t = y_0 + w_1 + \dots + w_t$. Якщо y_t був диференційований двічі, то легко можна отримати y_t з ω_t , підраховуючи суму ряду ω_t теж двічі.

Цю властивість помітили Бокс і Дженкінс [30] і запропонували виділити клас нестаціонарних рядів, яких методом послідовних різниць можна привести до стаціонарного виду, а саме АРКС. Якщо ряд після застосування до нього d послідовних різниць, стає стаціонарним, то він є процесом виду АРІКС (p, d, q) . При цьому p – параметр АР-частини, q – параметр КС-частини, d – степінь інтеграції. Загальний вигляд даного процесу можна представити наступним чином:

$$\Delta^d y_t = \alpha + \rho_1 \Delta^d y_{t-1} + \dots + \rho_p \Delta^d y_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}. \quad (1.13)$$

Задачу побудови моделі типу АРІКС по реалізації випадкового процесу Бокс і Дженкінс запропонували розбити на декілька етапів [30].

Етап 1.

1. Встановити порядок інтеграції d , тобто домогтись стаціонарності ряду, взявши достатню кількість послідовних різниць. Іншими словами, «остаціонарити» ряд.

2. Після цього отримано часовий ряд y_t , для якого треба підібрати вже модель АРКС (p, q) . Беручи до уваги поведінку автокореляційної і часткової автокореляційної функцій, встановити параметри p і q .

Перший етап прийнято називати ідентифікацією моделі АРІКС (p, d, q) . Це всього лише визначення параметрів d, p і q , саме в такій послідовності.

Етап 2. Оцінка коефіцієнтів $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q$ при умові, що вже відомі параметри p і q .

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-449-9>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-449-9>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page
<http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-449-9>

Наукове видання

**Квстний Роман Наумович
Кислиця Людмила Миколаївна
Коцюбинський Володимир Юрійович
Усов Віктор Васильович**

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ
НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ
З ПОДВІЙНОЮ ДОВГОЮ ПАМ'ЯТТЮ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Л. Кислицею

Підписано до друку 04.01.2012 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,08
Наклад 100 прим. Зам № 2012-2

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.