

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Автоматизації і комп'ютерних систем
Кафедра Автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

Форсюк А.В.

(підпис) (прізвище та ініціали)

«__» _____ 2021р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Ельперін І.В.

(підпис) (прізвище та ініціали)

«09» лютого _____ 2021р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 151 «Автоматизації і комп'ютерно-інтегровані технології»

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Інтелектуальні комп'ютерні системи керування

на тему: Інтелектуальне керування відділенням дефекосатурації цукрового заводу на основі вейвлетного, фрактального та рекурентного аналізу часових рядів

Виконав: здобувач II курсу, групи ЗАК-2-1М

Гнатюк Ірина Сергіївна

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник Кишенько Василь Дмитрович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультанти _____

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Мошенський А.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що в цій кваліфікаційній роботі немає запозичень із праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач Гнатюк І.С.

(підпис)

Київ - 2021р.

Інститут (факультет) Автоматизації і комп'ютерних систем

Кафедра Автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Інтелектуальні комп'ютерні системи керування
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри АКТСУ Електро І.В.

М.В.
"09" листопада 2020 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Гнатюк Ірини Сергіївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інтелектуальне керування відділенням дефекосатурації цукрового заводу на основі вейвлетного, фрактального та рекурентного аналізу часових рядів

керівник роботи Кишенько Василь Дмитрович, кандидат технічних наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "09" листопада 2020 року №933-кс

2. Строк подання здобувачем роботи 08 лютого 2021 року

3. Вихідні дані до роботи характеристика об'єкта автоматизації, технологічний регламент, вимоги до системи автоматизації та ін.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ; Аналіз стану цукрового виробництва; Системи управління відділенням дефекосатурації як складним нелінійним динамічним об'єктом; Розробка алгоритмів та аналіз функціонування системи інтелектуального керування відділенням дефекосатурації; Висновки; Список використаної літератури

5. Перелік графічного матеріалу

-Схема концепції моделювання складних технологічних систем

-Структурна схема управління

-Параметрична схема технологічного комплексу очистки дифузійного соку цукрового заводу

АНОТАЦІЯ

Сучасна потреба в новітніх рішеннях, при розробці алгоритмів обробки даних і архітектури інтелектуальних систем керування, вивела на перший план нові актуальні завдання. Створення і використання пристроїв цифрової обробки даних, які здатні працювати в складі інтелектуальних систем керування технологічними процесами, повинні вміти отримувати в реальному часі достовірну картину про стан контрольованих фізичних величин і їх параметрів за рахунок закладених в них ефективних алгоритмів обробки даних.

При спотворенні вимірювальної інформації перешкодами, інтелектуальна керуюча система може прийняти невірне рішення, що призводить до аварії або незворотних наслідків.

Одним з найбільш актуальних завдань цифрової обробки сигналів – є завдання очищення сигналу від шуму, виділення окремої «локальної» складової. На практиці сигнал завжди містить не тільки корисну інформацію, а й сліди деяких зовнішніх впливів (перешкоди, шум або аномалії), що додає додаткову складність в процес обробки даних.

В даній магістерській роботі було розглянуто вейвлет-аналіз, методи теорії фракталів та рекурентного аналізу для оцінки часових рядів, які характеризуються трендовими та локальними змінюваннями частотних спектрів та енергій сигналів при змінюванні режимів функціонування об'єкта керування, що дозволяє перейти до визначення станів системи та прогнозування ймовірності виникнення аварійних ситуацій.

Дослідження здійснювались на часових рядах функціонування дефекосатураційного відділення цукрового виробництва.

Ключові слова: цифрова обробка, локальна складова, вейвлет-аналіз, прогнозування ймовірностей, цукрове виробництво.

ANNOTATION

A modern requirement in the newest decisions, at development of algorithms of processing of data and architecture of intellectual control system, showed out new actual tasks on the first plan. Creation and use of devices of the digital processing of data that is able to work in composition of intellectual control system by technological processes must be able to get real-time a reliable picture about the state of the controlled physical sizes and their parameters due to the effective algorithms of processing of data stopped up in them.

At distortion of measuring information by obstacles, the intellectual sensor-based system can accept an incorrect decision that results in an accident or irreversible consequences. One of the most actual tasks of digital treatment of signals - there is a task of cleaning to the signal from noise, selection of separate "local" constituent. In practice a signal always contains not only useful information but also tracks of some external influences (obstacles, noise or anomalies), that adds additional complication to the computational process.

A Waveletsanalysis was considered in this magister's degree work, methods of theory of fractals and recurrent analysis for the estimation of sentinel rows that are characterized treasons of trend and local of frequency spectrums and energies of signals at treason of the modes of functioning of management object, that allows to pass to determination of the states of the system and prognostication of probability of origin of emergency situations. Researches came true on the sentinel rows of functioning of defecosaturationsdepartment of saccharine production.

Keywords: digital processing, local component, wavelet analysis, probability forecasting, sugar production.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ I. АНАЛІЗ СТАНУ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА	9
1.1.Основні відомості про стадії виробництва у цукровій галузі.....	9
1.2.Опис та аналіз системи відділення дефекосатурації.....	13
1.3.Обґрунтування необхідності інтелектуального керування процесом дефекосатурації	19
1.4. Постановка задачі дослідження.....	22
Висновки 1-го розділу	23
РОЗДІЛ II. СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІДДІЛЕННЯМ ДЕФЕКОСАТУАРЦІЇ ЯК СКЛАДНИМ НЕЛІНІЙНИМ ДІНАМІЧНИМ ОБ'ЄКТОМ	24
2.1.Концепція моделювання складних технологічних систем.....	24
2.2.Огляд моделей керування складними технологічними системами у цукровому виробництві.....	31
2.3. Методи дослідження даних цукрового виробництва.....	42
2.3.1. Аналіз даних з використанням вейвлет-перетворення.....	44
2.3.2.Принципи аналізу даних за допомогою фрактального методу.....	53
2.3.3.Рекурентний метод та його особливості.....	60
Висновки 2-го розділу	81
РОЗДІЛ III. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ВІДДІЛЕННЯМ ДЕФЕКОСАТУАРЦІЇ	82
3.1.Функціональні структури інтелектуальної системи керування відділенням дефекосатурації.....	82
3.2. Розробка систем інтелектуального керування процесом дефекосатурації	

та вибір засобів реалізації програм.....	94
3.3. Інтерфейс візуалізації підсистеми прогнозування та підтримки прийнятих рішень для керування відділенням дефекосатурації	101
Висновки 3-го розділу.....	108
ВИСНОВКИ.....	109
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	110

ВСТУП

Актуальність роботи. Цукрова промисловість – одна із провідних галузей харчової промисловості, яка має багатогранні зв'язки з іншими галузями народного господарства та багатьма галузями харчової промисловості.

У сучасних умовах ринкової конкуренції перше місце при виробництві цукру займають такі показники, як якість, енергоспоживання, собівартість продукції. Все це вимагає застосування у виробничому процесі останніх новітніх досягнень у сфері використання ефективних технологій, знань теплотехніки та загальної організації цукрового виробництва[26, 27, 17].

Автоматизація цукрової промисловості забезпечує якісну та ефективну роботу всіх технологічних ділянок цукрового заводу тільки при застосуванні комплексного підходу до вирішення цієї задачі[31, 32].

Як правило, автоматизація різних об'єктів на більшості цукрових підприємств здійснювалась не одночасно, а на протязі значних проміжків часу. Локальні автоматизовані системи управління технологічними процесами у межах технологічних відділень заводу мали розвиток незалежно одна від іншої. Відповідно, на сучасному етапі функціонування виробництва цукрові заводи характеризуються наявністю роз'єднаних, різнорідних автоматизованих та інформаційних систем, оснащених технічною базою від різних виробників, що не співпрацюють між собою.

Цукропереробний комплекс України, його формування, функціонування та розвиток, ефективність, конкурентоспроможність, вплив для сталого економічного зростання аграрно-промислового виробництва – тема досліджень із дуже багатим науковим підґрунтям[18]. Серед вітчизняних учених особливою значущістю для розвитку теорії та практики цукропереробної галузі характеризуються роботи таких авторів, як О.М. Варченко, О.С. Заєць, М.Ю. Коденська, В.Я. Месель-Веселяк, С.А. Стасіневич, О.М. Шпичак, М.М. Ярчук, В.Д. Кишенько та ін. Ці проблеми

висвітлювали й зарубіжні вчені У. Латач-Ломан, Г. Хельцман, Д. Шпар та ін. Незважаючи на значні звершення в цій галузі, питання щодо її стабілізації та розвитку у період нестабільності досліджено недостатньо.

Сьогодні у стратегічних цілях виробників цукру на перше місце виходить забезпечення конкурентоспроможності продукції, підвищення рентабельності бізнесу та розвиток останнього в умовах зростаючої глобалізації та підвищеної вартості розвитку продукту. У процесі досягнення цих цілей виробники цукру зустрічаються з рядом специфічних виробничих проблем, зокрема щодо необхідності оптимізації споживання електроенергії, зменшення матеріальних затрат на інвентаризацію, збільшення використання активів та пропускної спроможності, покращення якості та зменшення варіацій, помилок та відходів, максимізації відстежуваності матеріалу та виконання вимог регулювання.

Одним із факторів, що сприяє вирішенню даних проблем є подальше удосконалення автоматизації виробництва цукру, що характеризується звільненням людини від безпосереднього виконання функцій управління виробничими процесами і передачею цих функцій технічним приладам та штучному інтелекту.

Зростання продуктивності праці у цукровому виробництві, розробка новітніх технологій, що підвищують рівень ефективності самого виробництва, - все це вимагає оновлення і удосконалення систем керування.

В основі будь-якої моделі керування лежить математична модель об'єкта. Отримати цю модель є дуже складним завданням внаслідок того, що усі реальні процеси характеризуються, як правило, випадковістю, нелінійними залежностями, високим рівнем шумів та їх корельованістю, мінливими умовами функціонування, які в кінцевому результаті змінюють характеристики досліджуваного об'єкту.

У роботі в рамках розгляду інтелектуального керування відділенням дефекосатурації цукрового виробництва, проаналізовано та узагальнено великий об'єм літературних джерел щодо автоматизації технологічного процесу виготовлення цукру, інтелектуальної ідентифікації атрактивної

поведінки системи для організації стратегій керування, застосування вейвлет-аналізу, методів теорії фракталів та рекурентного аналізу для оцінки часових рядів, інформаційної взаємодії з класичними автоматизованими системами управління технологічними процесами. Використані сучасні підходи для вирішення завдань по обробці сигналів станції дефекосатурації.

Практичне значення роботи полягає в тому, що вона, маючи постановочний характер та значний об'єм теоретичного матеріалу, практичного матеріалу, містить в собі численні приклади, в тому числі ілюстровані, вирішення завдань по обробці, класифікації та візуалізації параметрів дефекосатурації. У результаті цього робота може бути використана для подальшої розробки інтелектуальних систем керування відділенням дефекосатурації цукрового заводу.

РОЗДІЛ I. АНАЛІЗ СТАНУ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА.

1.1. Основні відомості про стадії виробництва у цукровій галузі.

Ефективність цукрового виробництва в сучасних умовах багато в чому визначається вибраною стратегією планування в системі управління на всіх її рівнях: від окремого технологічного процесу або агрегату до підприємства в цілому. Основною метою оперативного планування в системі управління виробництвом є складання узгоджених планів виробництва технологічних комплексів підприємства і забезпечення їх виконання. Інструментом узгодження роботи окремих елементів керованої системи з метою реалізації поточних виробничих графіків є технологічна координація, яка полягає в узгодженні (синхронізації) роботи технологічного обладнання і транспорту, руху матеріальних потоків, взаємодії виробничого персоналу цеху при відхиленні фактичного ходу виробництва від запланованого.

Розглядаючи технологічний комплекс цукрового заводу можна побачити, що він належить до складних об'єктів, оскільки має ієрархічну структуру і можна проводити декомпозицію на окремі підсистеми, пов'язані між собою складними структурними та функціональними зв'язками.

Якість функціонування системи в цілому залежить від ефективного функціонування підсистеми кожного рівня, а також від якості та узгодженості взаємодії підсистем між собою. Тому розробляючи підходити до аналізу та проектування систем необхідно звертати особливу увагу на місця стику суміжних підсистем як технічних так і підсистем управління. Використання таких підходів сприяє підвищенню продуктивності, зменшенням витрат та ін., яким чином найефективніше поєднати роботу кожної підсистеми для досягнення таких результатів.

Процес виготовлення цукру складний та відноситься до тонких хімічних технологій. Буряк, який потрапляє в переробку, буває різної якості, що потребує врахування даного факту у процесі його подальшого перероблення.

Для цього на цукрових заводах існують лабораторії, де проводять виміри якості продукції на всіх етапах переробки. Контроль якості продукції необхідний для оперативної зміни технологічного процесу[41].

Основними стандартними етапами виробництва цукрової продукції є: приймання та зберігання цукрового буряку, транспортування, очищення, мийка, отримання соку, його очистка, випаровування, кристалізація та отримання білого цукру, обезцукрювання відтоків та повернення жовтого цукру[43].

Основні етапи виробництва цукру представлені на рис. 1.1



Рис. 1.1. Основні етапи виробництва цукру.

Вирощений цукровий буряк відправляють на завод, де його зберігають певний час, або відразу направляють в переробку. Технологія переробки передбачає очищення буряку та вивільнення з бурякової стружки соку шляхом вилужування (дифузії) речовин кліткового соку за допомогою води, обробку соку вапном та осадженню речовин, що утворюють з іонами кальцію нерозчинні солі (дефекація). Після цього надлишки вапна осаджують вуглекислим газом та додатково відокремлюють нецукристі речовини адсорбцією на поверхні вуглекислого кальцію (1-ша сатурація), отриманий осад відокремлюють фільтрацією, а сік повторно обробляють вапном та вуглекислим газом (2-а сатурація), сік знов фільтрують, обробляють сірчанним газом для знебарвлення (сульфітація) і фільтрують[8].

Очищений сік випаровують в багатокорпусній випаровувальній станції, сульфітують і знов фільтрують.

Заключним етапом виробництва цукру є уварювання очищеного сиропу, при якому розчинник (вода) видаляється, розчин становиться перенасиченим та з нього виділяється кристалічна сахароза.

Кристали сахарози відокремлюють центрифугуванням, промивають та висушують, тобто отримують товарний цукор[30].

У залежності від виробничої необхідності отримання цукрової продукції різної якості використовують різні продуктові технологічні схеми в цукрових заводах.

У сучасній цукровій галузі використовують двох та трьох продуктові схеми отримання цукру. При використанні буряку більш високої якості недостатньо двох уварювань та кристалізацій, як це відбувається при двох продуктовій схемі. Для більш повного виділення цукру використовують, в основному, трьох продуктову схему[14].

На даний час на цукрових заводах в якості типової прийнята технологічна схема з безперервним дифузійним процесом. Типова технологічна схема включає в себе безперервний дифузійний процес з поверненням жомопресової води, вапняно-вуглекислотне очищення дифузійного соку (включає в себе прогресивну предефекацію, холодно-гарячу основну дефекацію, 1-шу сатурацію, фільтрування, дефекацію перед 2-ю сатурацією, 2-гу сатурацію та сульфитацію), згущення соку випаровуванням та дві, а частіше – три ступені кристалізації з афінацією цукру третьої кристалізації[45].

Найбільш поширена стандартна технологічна трьох продуктова схема переробки цукрової продукції, яка представлена на рис.1.2

Ефективність технологічного процесу виробництва цукру значною мірою залежить від досконалості процесу очищення дифузійного соку.

Цей процес характеризується значним ступенем невизначеності, великою розмірністю векторів вхідних збурень і координат збурень, а також безліччю інших перешкод. Якість підтримки технологічних параметрів в регламентних режимах визначається факторами, дія яких складно враховувати,

використовуючи традиційні методи моделювання та управління технологічним процесом.

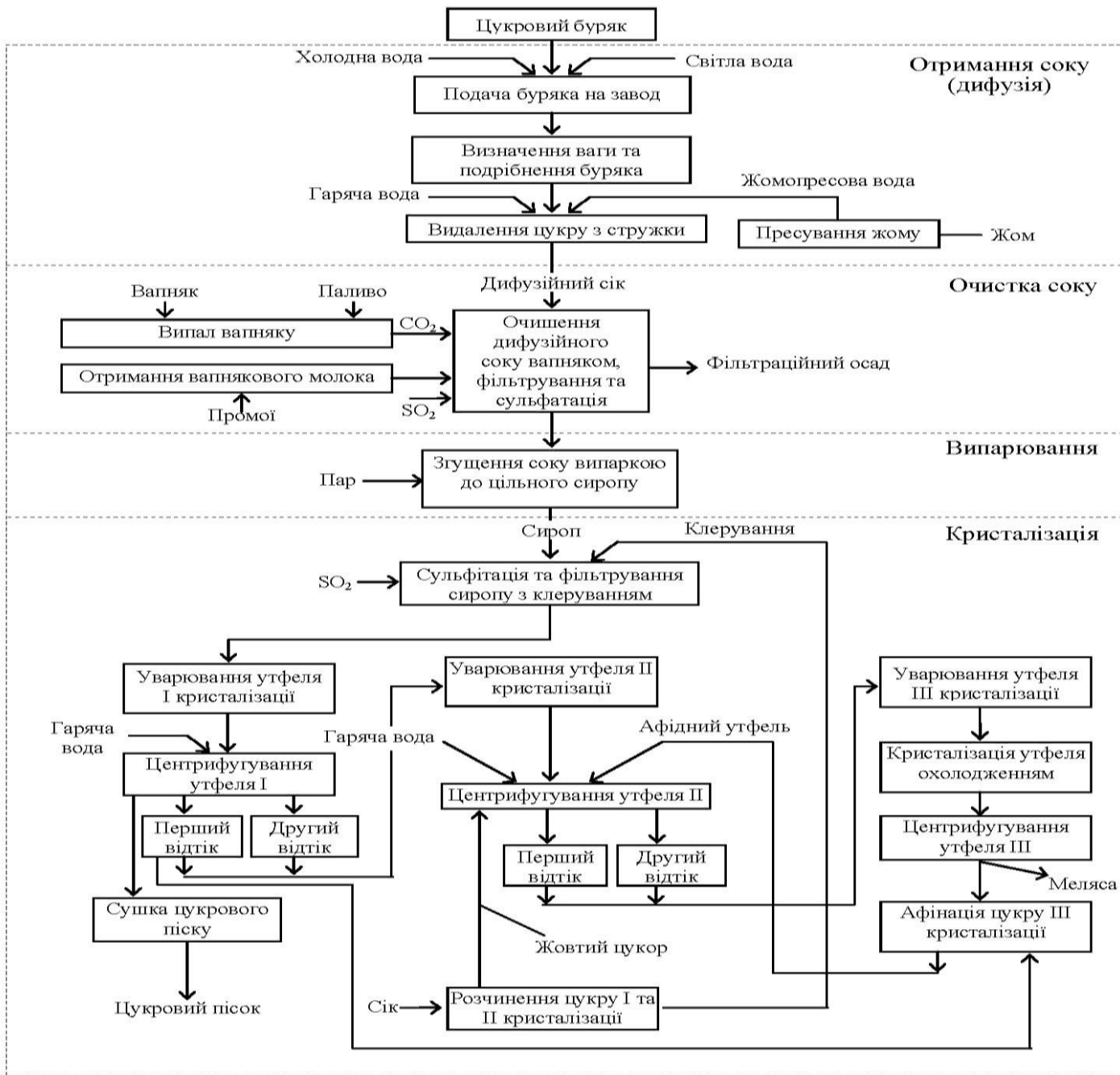


Рис.1.2. Технологічна трьох продуктова схема переробки цукрової продукції

Повна технологічна схема очищення соку являє собою сукупність різного сокоочисного обладнання, згідно з технологією, об'єднаного відповідно до мети виробництва отриманням очищеного дифузійного соку[1]. Отже, машинно-апаратна схема процесу очищення дифузійного соку має розподілену структуру, яка містить як послідовно, так і паралельно з'єднані елементи, а

також ділянки з зворотними зв'язками[26]. Тому відділення очищення соку з точки зору аналізу, синтезу та управління відноситься до складних хіміко-технологічним системам.

1.2. Опис та аналіз системи відділення дефекосатурації.

Для досягнення високого виходу товарного цукру дифузійний сік піддають хімічній та фізико-хімічній обробці з метою видалення нецукрів та доведення до слаболужного розчину.

Тут, слід зазначити, що майже 90 відсотків розчинних нецукрів, а також сахарози переходить з буряка у дифузійний сік. У зв'язку з тим, що розчинні нецукри значно уповільнюють кристалізацію, а також збільшують вміст сахарози у мелясі, з дифузійного соку важко виділити сахарозу без попереднього очищення. Тому, для отримання високого виходу цукру-піску, потребує відділення з дифузійного соку якомога більшої кількості нецукрів та доведення його до слаболужної реакції. Останнє в свою чергу сприяє більшій стійкості сахарози до розкладання.

З цією метою на практиці застосовується один з самих найдешевших методів – це обробка дифузійного соку вапном (такий процес має назву – дефекація) з подальшим видаленням надлишку цього вапна діоксидом вуглецю (цей процес має назву – сатурація). Саме завдяки таким технологічним операціям досягається найбільший ефект очищення при мінімальному руйнуванні сахарози. До того ж фінансові затрати на реагенти для даного процесу досить незначні.

В даний час відомо більше 100 варіантів схеми вапняно-вуглекислотного очищення соку, але жодна з них не є оптимальною. Тому можна вести мову тільки про наближення параметрів до оптимальних, тобто про оптимізацію схеми, яка повинна вирішувати такі основні завдання[41]:

1. На попередній дефекації домагатися не тільки максимального осадження високомолекулярних сполук (ВМС – пектинових речовин, білків, декстрану), редукуючих речовин (РР), нерозчинних солей кальцію деяких

органічних кислот (фосфорної, щавлевої, лимонної), але й висвітлення коагулянту (осаду), структура якого була б досить стійкою до руйнівної дії іонів кальцію в умовах високих значень лужності та температури на основній дефекації.

2. На основній дефекації слід прагнути до максимального розкладання амідів кислот, солей амонію, редукуючих речовин; обмиленню жирів; доосажденню органічних кислот, а також створення надлишку вапна для отримання достатньої кількості CaCO_3 на першій сатурації.

Розкладання РР пов'язано з утворенням нових нецукрів (барвників та органічних кислот), тому основним принципом їх руйнування є проведення цього процесу до випарної станції, а саме в ході очищення.

Реакція розкладання на стадії дефекації залежить від трьох найважливіших факторів: температури, тривалості та рН. Крім того, значення рН залежить не тільки від температури, але й від кількості вапна, що додається.

3. Завданням I сатурації є утворення в очищеному розчині осаду CaCO_3 та адсорбція на його поверхні нецукрів, так як цей осад має високу адсорбційну здатність, яка в сумарному ефекті видалення нецукрів займає важливе місце. При цьому, при лужності 0,11-0,12% CaO спостерігається максимальний ефект видалення нецукрів. На останнє також значно впливає тривалість процесу I сатурації.

Повільна сатурація, низький вміст CO_2 та високий вміст кисню в сатураційному газі погіршує якість соку внаслідок окислення сахарози в лужному середовищі, приводячи до утворення додаткової кількості забарвлених речовин та розчинних солей кальцію. В даний час тривалість сатурації прийнята 10 хвилин, так як при меншому часі протікання процесу важко витримати необхідну лужність соку[7].

Дефекація перед II сатурацією є ефективним способом підвищення термостійкості соку, так як кількість видалених нецукрів на II сатурації з використанням перед нею дефекації становить приблизно 5%.

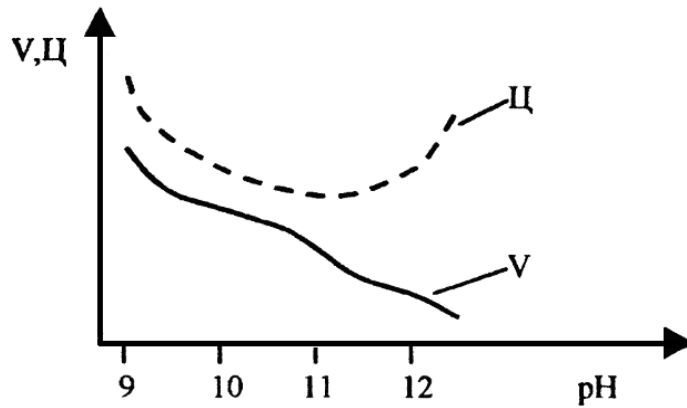


Рис. 1.3. Залежність швидкості фільтрації V та кольоровості Ц соку 1-ї сатурації від рН

4. Мета II сатурації - досягнення оптимальної (ефективної) лужності соку. Величина оптимальної лужності залежить від величини натуральної лужності. Якщо натуральна лужність перероблюваного буряка низька, то й величина оптимальної лужності соку II сатурації буде, природно, низькою. Тому краще підтримувати лужність на 0,003% вище оптимальної [9].

Солі Са, мг

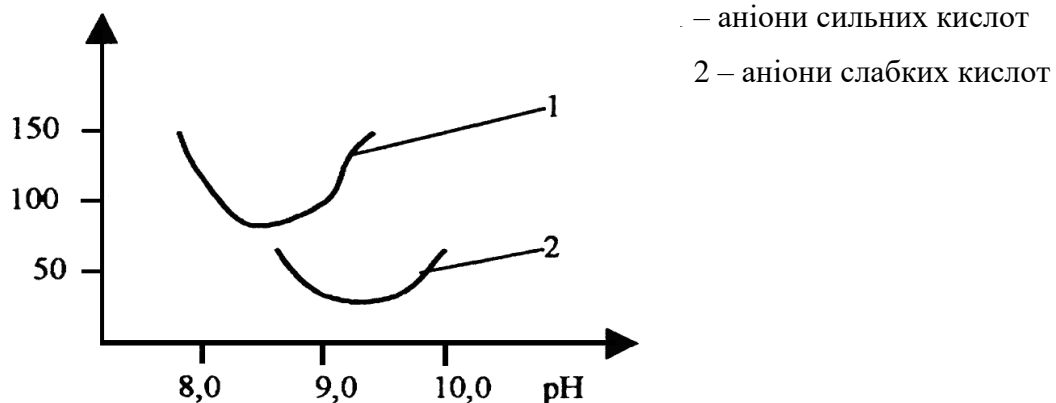


Рис. 1.4. Залежність оптимальної лужності соку 2-ї сатурації від вмісту СаО

У цілому процеси дефекосатураційної очистки, що відбуваються в окремих апаратах, взаємопов'язані між собою, тому ефективність роботи всього відділення потребує суворого дотримання технологічного регламенту кожним апаратом (таблиця 1.1).

Прогресивна преддефекація (горизонтальний преддефекатор ППД)			
Найменування	Значення		
1. Витрата вапняка, % СаО до маси буряка	0,2-0,3		
2. рН по зонах			
1	7,0-7,2		
2	7,8-8,0		
3	8,6-8,8		
4	9,4-9,6		
5	10,2-10,4		
6	11,0-11,2		
3. Температура процесу преддефекації, °С	<i>Холодна</i>	<i>Тепла</i>	<i>Гаряча</i>
	40-50	50-60	-
4. Тривалість процесу преддефекації, хв.	20-30	15	-
5. Кількість повернення, % до маси буряка	<i>соку 1-ї сатурації</i>		<i>згущеної суспензії</i>
	30-100		10-20
Дефекація			
Найменування	<i>Холодна</i>	<i>Гаряча</i>	<i>Перед 2-ї сатурацією</i>
6. Температура процесу, °С	40-50	90	95
7. Тривалість процесу, хв.	20-30	5; 10	5,0-5,8
8. Витрата вапняка, % СаО до маси буряка	1,0-1,8	-	0,2-0,5
9. Лужність соку за фенолфталеїном, % СаО	0,8-1,2	0,8-1,2	0,3-0,5
Сатурація			
Найменування	1-ша сатурація		2-га сатурація
10. рН ₂₀ соку	11±0,2		9,6±0,1
11. Температура соку, °С	80-85		95
12. Лужність соку за фенолфталеїном, % СаО	0,09-0,11		0,015-0,035
13. Вміст СО ₂ в сатураційному газі, не менше, %	28		28

Таблиця 1.1. Параметри технологічного регламенту роботи основних апаратів відділення дефекосатурації.

Вибір найбільш відповідних параметрів процесу визначається якістю буряку, який поступив на переробку. Як правило, коректування технологічного режиму в одному апараті потребує зміни його в суміжних або в усіх апаратах одночасно. Оптимальні значення сировини, яке переробляється у відділенні дефекосатурації, наведено у таблиці 1.2.

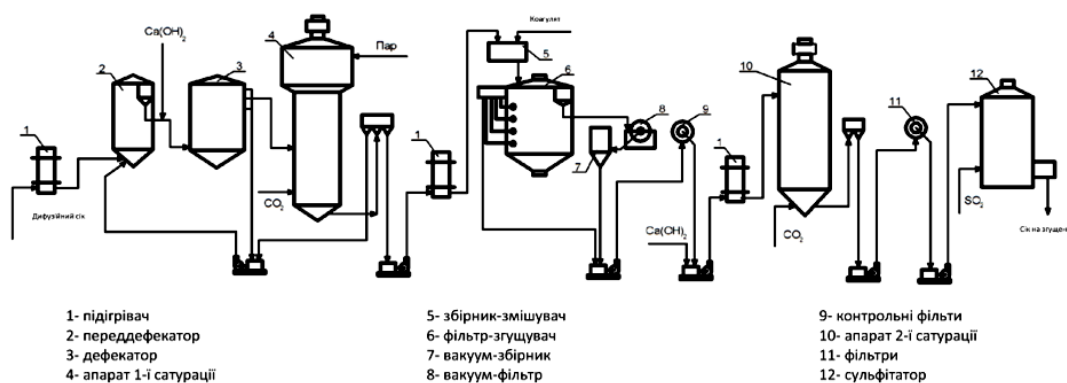
Продукт	При поверненні на преддефекацію	
	50% соку 1-ї сатурації	100% соку 1-ї сатурації
Дифузійний сік	120	120
Вапняне молоко на преддефекацію	1,4	1,7
Преддефекований сік	171,5	221,7
Вапняне молоко на основну дефекацію	10,2	9,9
Дефекований сік на 1-шу сатурацію	181,6	231,6

Сок 1-ї сатурації на виході з сатуратора	179,6	229,6
Повернення на предефекацію не фільтрованого соку 1-ї сатурації	50	100
Не фільтрований сік 1-ї сатурації	129,6	129,6
Сік 1-ї сатурації фільтрований	138,4	138,4
Сік 2-ї сатурації на виході з сатуратора	138,0	138,0
Сік 2-ї сатурації перед фільтруванням (з урахуванням змиву сиропу з дискових фільтрів)	141,5	141,5
Не фільтрований сік 2-ї сатурації після відбору повернення	141,5	141,5
Сік 2-ї сатурації фільтрований з урахуванням витрат сиропу на змив осаду з дискових фільтрів	141,0	141,0
Сік 2-ї сатурації фільтрований після витрат сиропу на змив дискових фільтрів	137,5	137,5
Сік 2-ї сатурації на клеровку	6,8	6,8

Таблиця 1.2. Кількість сировини, що переробляється у відділенні дефекації, %

На цукрових заводах у якості типової прийнята схема очищення дифузійного соку вапном з холодною прогресивною предефекацією і комбінованою холодно-гарячою основною дефекацією(рис. 1.5).

Схема очистки дифузійного соку з гарячою переддефекацією



Універсальна схема очистки дифузійного соку

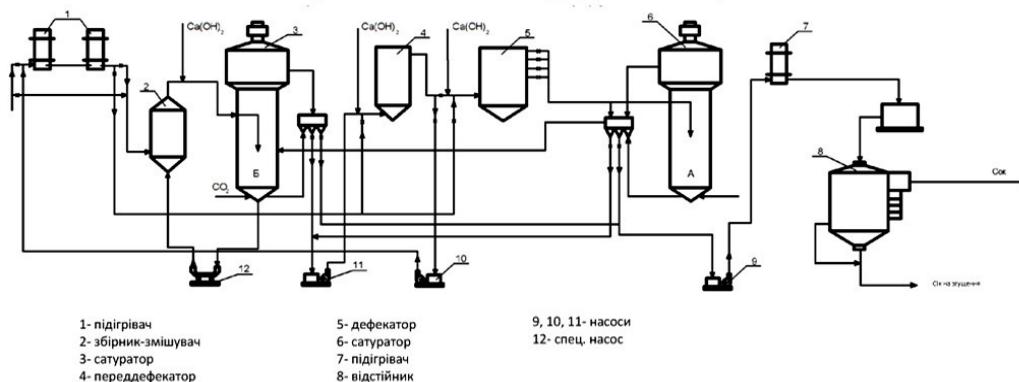


Схема очистки дифузного соку з холодною прогресивною переддефекцією та комбінованою холодно-гарячою основною дефекцією

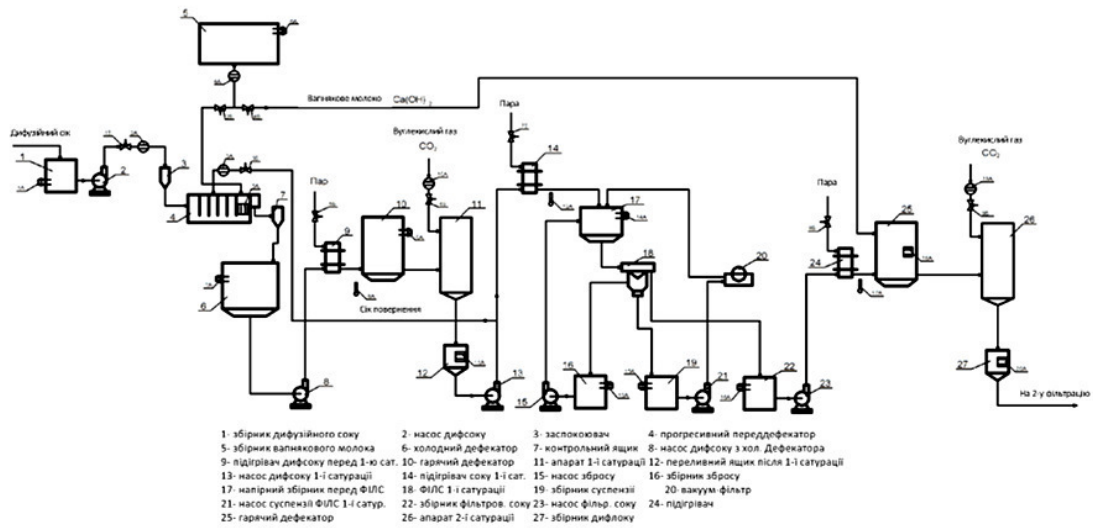


Рис. 1.5. Типові апаратно-технологічні схеми очищення дифузного соку

З метою забезпечення керування технологічними процесами, й, зокрема, дефекосатурації, на цукрових заводах застосовуються різні системи автоматизації, серед яких до 70–80% становлять одноконтурні стабілізуючі системи автоматичного регулювання технологічними процесами, (рис. 1.6).

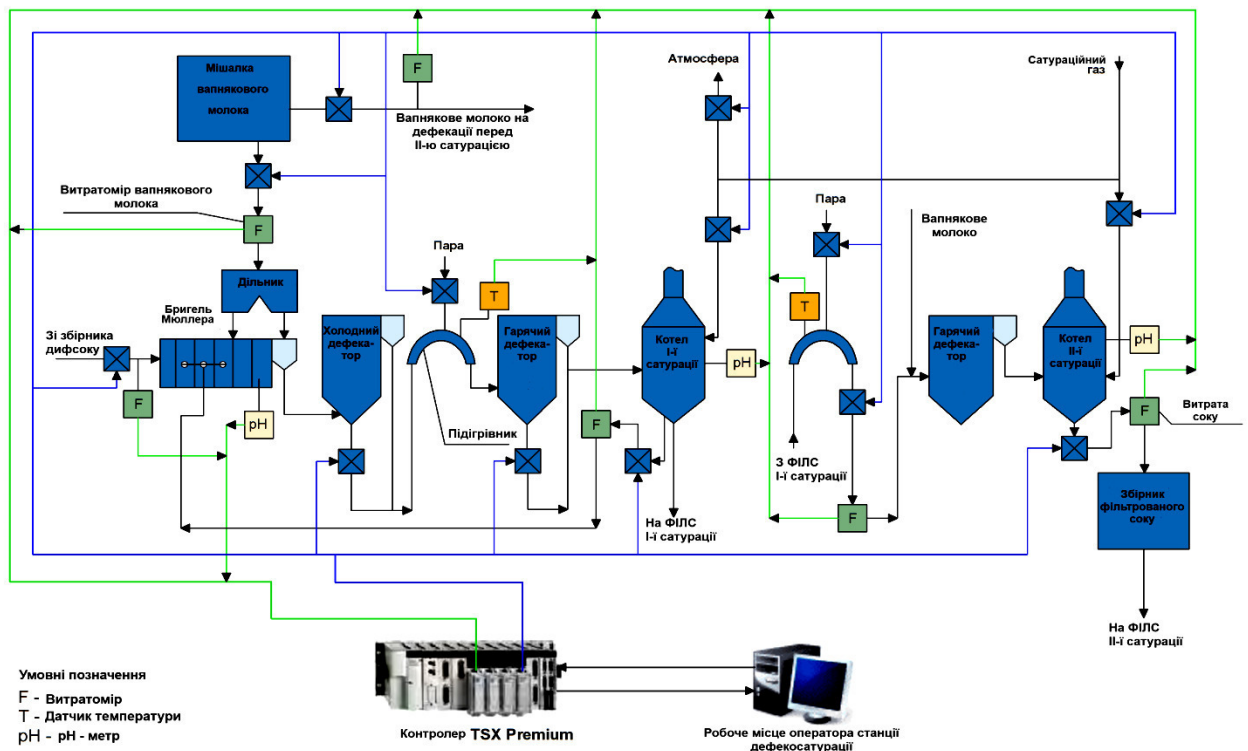


Рис. 1.6. Типова схема автоматизації відділення дефекосатурації.

1.3. Обґрунтування необхідності інтелектуального керування процесом дефекосатурації.

Розглядаючи станцію дефекосатурації у якості досліджуваного об'єкта можна виділити такі проблеми і відхилення, які виникають і вирішуються всередині досліджуваного об'єкту. Також можуть виникнути проблеми, які не пов'язані напряму з роботою станції дефекосатурації, а які виникають внаслідок порушень режимів роботи суміжних відділень. Наприклад сповільнена робота сатуратора і викидання соку в переливну коробку дефекатора може бути викликана як внутрішніми проблемами – відкладення осаду на решітках сатуратора, так і зовнішніми – низький вміст CO_2 в сатураційному газі, або низька щільність дифузійного соку. У випадку з низьким вмістом CO_2 вирішується шляхом налагодження роботи вапняково-газової печі. А у випадку з низькою щільністю – налагодити роботу дифузійної установки.

Проблема полягає в тому, що навіть правильно налагоджена робота системи управління станції дефекосатурації може не вирішувати покладені на неї задачі і, як наслідок, виникнення недопустимих відхилень, що призводять до порушення технологічного процесу. Тобто під час неперервного технологічного процесу необхідно постійно враховувати поточну ситуацію на всіх суміжних відділеннях і своєчасно переналаштовувати параметри роботи станції, забезпечуючи стабільну роботу всього цукрового заводу.

Тому ефективний вихід продукції цукрового виробництва залежить від системи управління відділенням дефекосатурації, заснованої на базі сучасних технічних засобів. Сучасні засоби автоматизації на базі програмно-технічних комплексів забезпечують управління технологічним процесом у відділенні дефекосатурації на основі централізовано обробленої в мікропроцесорі інформації по заданим технологічним і економічним критеріям, визначальним якісні та кількісні результати вироблення соку. Сучасна автоматизована система управління технологічним процесом (АСУТП) включає в себе технічні кошти, програмне забезпечення та оператора (людини), роль якого в

автоматизованому процесі виробництва зводиться до налагодження, регулюванню, обслуговуванні засобів автоматизації і спостереженню за їхньою дією.

АСУТП відділення дефекосатурації включає підсистеми збору і відображення інформації, автоматичного регулювання, дискретно-логічного управління, протиаварійних захистів і блокувань.

Автоматизована система управління відділенням дефекосатурації надає оператору детальну інформацію про протікання технологічного процесу, здійснює архівування основних технологічних параметрів, веде протокол подій, дозволяє формувати звіти в табличній і графічній формі і має можливість самодіагностики. Ці властивості підвищують надійність, зручність і безпеку експлуатації системи.

За допомогою АСУТП в відділенні дефекосатурації досягається: поліпшення термостійкості соку на наступних стадіях виробництва; поліпшення швидкості осадження і фільтрування зважених речовин в дифузійному соку; підвищення ефективності очищення соку, зниження втрат цукру на ділянці очистки і наступних ділянках виробництва; скорочення витрат вапна, сатураційного газу і супутніх витрат; стабілізація сокових потоків і синхронізація продуктивності ділянки очищення соку з продуктивністю ділянки дифузії (або клеровки). Крім того, підвищується продуктивність, безпека праці та поліпшуються умови роботи обслуговуючого персоналу[8].

Важливе місце в системі інтелектуального керування технологічним процесом займають алгоритми управління. Під алгоритмом управління розуміється опис процедури обробки інформації про спостережувані змінних стану з метою визначення керуючих впливів, що реалізуються для отримання необхідних показників керованого процесу як в сталому, так і в перехідному режимі.

Алгоритм управління повинен давати чітке уявлення про те, яку послідовність дій потрібно зробити, щоб найкращим чином вирішити поставлену задачу.

Зміни, які відбуваються у процесі дефекосатурації, мінливі настільки інтенсивно, а їхні якісні показники бувають настільки несподіваними, що для аналізу і прогнозування вихідних параметрів, тобто якості очищення дифузійного соку, синтез нових аналітичних і обчислювальних підходів, що беруть свій початок у різних областях людських знань, став насущною практичною необхідністю. Необхідно вивчати динамічні процеси, що відбуваються в незворотних багатокomпонентних інтерактивних адаптивних системах, розглядати причини та механізми виникнення нових режимів і структур, вивчати характерні масштаби і швидкості перехідних та сталих процесів, передбачувати ймовірні зміни системи з метою забезпечення можливості управління несподіваними кардинальними змінами в динамічному режимі, що виникають у складних системах

Враховуючи те, що підтримання технологічних параметрів станції дефекосатурації на оптимальних значеннях в умовах, що характеризуються віддаленістю від стану термодинамічної рівноваги та утворенням дисипативних просторово – часових структур, дає нам право дефекосатураційне відділення цукрового виробництва досліджувати як складну систему методами нелінійної динаміки.

1.4. Постановка задачі дослідження.

Аналіз стану галузі виробництва цукру, зокрема щодо технологічного процесу дефекосатурації, показав, що дане питання потребує подальших наукових досліджень.

Відокремленість автоматизованих систем управління технологічними процесами у відділеннях цукрового заводу сприяє тому, що вони модифікуються та розвиваються незалежно одна від іншої, що призводить до відособленості систем керування кожним з технологічних відділень. Тому завданням цього дослідження є розробка методів інтелектуального керування процесом переробки цукру на основі сучасних технологій, на прикладі відділення дефекосатурації.

Відповідно до кінцевої мети технологічних процесів виробництва цукру необхідно вирішити такі завдання:

- Провести аналіз параметрів технологічних процесів, що застосовуються у цукровому виробництві;
- Визначити продуктивні методи для аналізу та управління процесом дефекосатурації;
- Провести моделювання з використанням сучасних програмних засобів.

ВИСНОВКИ 1-го РОЗДІЛУ.

1. Розглядаючи станцію дефекосатурації у якості досліджуваного об'єкту можна виділити зовнішні і внутрішні проблеми і відхилення, які виникають в процесі сокоочистки.

2. Процеси дефекосатураційної очистки, що відбуваються в окремих апаратах, взаємопов'язані між собою, тому ефективність роботи всього відділення потребує суворого дотримання технологічного регламенту кожним апаратом

3. Аналіз процесу очистки соку вказує на те, що даний технологічний процес відноситься до фізико-хімічних та складається з обробки дифузійного соку активними речовинами, з подальшою фізичною очисткою сумішей.

4. Ефективність технологічного процесу виробництва цукру значною мірою залежить від досконалості процесу очищення дифузійного соку.

5. Важливе місце в системі інтелектуального керування технологічним процесом займають алгоритми управління, які повинні давати чітке уявлення про те, яку послідовність дій потрібно зробити, щоб найкращим чином вирішити поставлену задачу.

6. Процес дефекосатурації є складною системою, яку можливо досліджувати методами нелінійної динаміки.

РОЗДІЛ II. СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВІДДІЛЕННЯМ ДЕФЕКОСАТУРАЦІЇ ЯК СКЛАДНИМ НЕЛІНІЙНИМ ДИНАМІЧНИМ ОБ'ЄКТОМ

2.1. Концепція моделювання складних технологічних систем.

При розробці концепції моделювання складних технологічних систем в якості теоретичної основи використовувався загальний підхід теорії систем і системного аналізу[12, 34, 35]. Проблема полягає в тому, що на сьогоднішній день теорія систем пропонує цілий ряд визначень системи і кілька підходів до визначення складної системи. Елементи технологічних систем, що відносяться до одного класу, як правило, відрізняються один від одного типом і значеннями показників, що характеризують їх стан. Тому в визначення системи загального вигляду необхідно поряд з безліччю елементів ввести безліч властивостей елементів. У зв'язку з цим в подальшому викладі термін "система" буде використовуватися в наступному визначенні:

Система - це кінцева множина функціональних елементів разом з їх властивостями і відносинами між ними, виділена з середовища відповідно до визначеної мети в рамках певного часового інтервалу:

$$S \underset{def}{\equiv} \langle A, V, R, Z, SR, \Delta T \rangle,$$

де A - множина елементів системи (підсистем, компонентів),

V - множина векторів властивостей елементів системи,

R - множина відношень між елементами множини A ,

Z - мета, структура або множина цілей,

SR - зовнішнє середовище, з якого виділяється система,

ΔT - інтервал часу, протягом якого система зберігає свою цілісність.

Існує кілька підходів до визначення рівня складності системи. Ці підходи відрізняються один від одного тією характеристикою системи, яка береться за

основу класифікації. Так, цією основою може виступати кількість елементів системи, складність поведінки, рівень еволюційного розвитку. Найбільший інтерес представляє підхід, де за основу класифікації приймається ступінь організованості системи[12]. За цією ознакою системи підрозділяються на добре організовані, погано організовані або дифузні та системи, що самоорганізуються. Складність системи зростає при переході від добре організованих систем до погано організованих і при переході від дифузних систем до систем, що самоорганізуються.

Аналіз ознак систем, які відносяться до кожного класу, дозволяє зробити висновок, що більшість технологічних систем є здатними до самоорганізації, тобто складними системами. Основна відмінність таких систем полягає в присутності в системі активних елементів. Для моделювання добре організованих систем застосовуються традиційні методи аналітичного моделювання. При моделюванні погано організованих систем найбільш поширеними методами є статистичні методи, методи теорії випадкових процесів.

Моделювання технологічних систем, що самоорганізуються, вимагає новітніх методів і моделей, які враховують основні риси таких систем:

- нестационарність,
- непередбачуваність поведінки,
- здатність до адаптації,
- здатність протистояти руйнівним тенденціям,
- здатність до альтернативної поведінки та змінам власної структури
- здатність та прагнення до цілепокладання.

Для моделювання таких систем доцільно застосовувати методи та моделі нелінійної динаміки і теорії фракталів.

Як було зазначено, наявність в технологічній системі активних елементів - це не єдине джерело їх складності. Розглянемо джерела складності

технологічної системи, спираючись на визначення системи, що дозволить забезпечити повноту переліку цих джерел.

До множини A відносяться технологічні агенти та технологічні об'єкти. Активність технологічних агентів та варіативність застосування технологічних об'єктів є джерелами складності технологічної системи. Технологічні агенти мають певну незалежність в межах системи, яка дозволяє їм самостійно приймати рішення, прагнути досягти своїх індивідуальних цілей. Це призводить до конфліктності як між агентами, так і агентів з загальними цілями системи. Результати вирішення конфліктів залежать від великої кількості факторів, тому присутність активних технологічних агентів у системі є основним джерелом складності.

Властивості елементів технологічної системи V змінюються з плином часу, причому для деяких властивостей, як правило, властивостей технологічних об'єктів, ці зміни передбачувані і лінійні, в той час як більшість властивостей технологічних агентів змінюються в часі по складним нелінійним законам, що робить властивості елементів джерелом складності технологічної системи.

Структура зв'язків між елементами технологічної системи R теж може виступати джерелом складності. Особливо у випадках, коли таких зв'язків багато і вони відрізняються високим рівнем різноманітності - зв'язки різні за своєю "силою" та типом (породження, підпорядкування, управління, партнерство тощо). У разі, коли зв'язки змінюються в часі, можна говорити про динаміку структури системи.

Технологічні системи характеризуються тим, що їх мета Z не є однозначною, вона як допускає декомпозицію, тобто уявлення у вигляді багаторівневої ієрархії цілей, так і містить в собі конфліктність - протиріччя між підцілями системи. Таким чином, структура цілей технологічної системи також є джерелом її складності.

Кожна технологічна система функціонує у зовнішньому середовищі SR . Постійні зміни зовнішнього середовища та їх вплив на систему, нелінійність

відгуку системи на дію зовнішніх чинників є джерелом складності, що змушує систему адаптуватися, змінювати свою поведінку і структуру.

Таким чином, джерелами складності технологічних систем виступають всі компоненти, наведені у визначенні, причому вплив різних джерел на результуючу складність системи не незалежне: спостерігається своєрідний ефект посилення: наприклад, складність взаємодії із зовнішнім середовищем або складність структури цілей може посилювати процес зміни властивостей технологічних агентів.

На рис. 2.1 приведена схема класифікації джерел складності технологічних систем

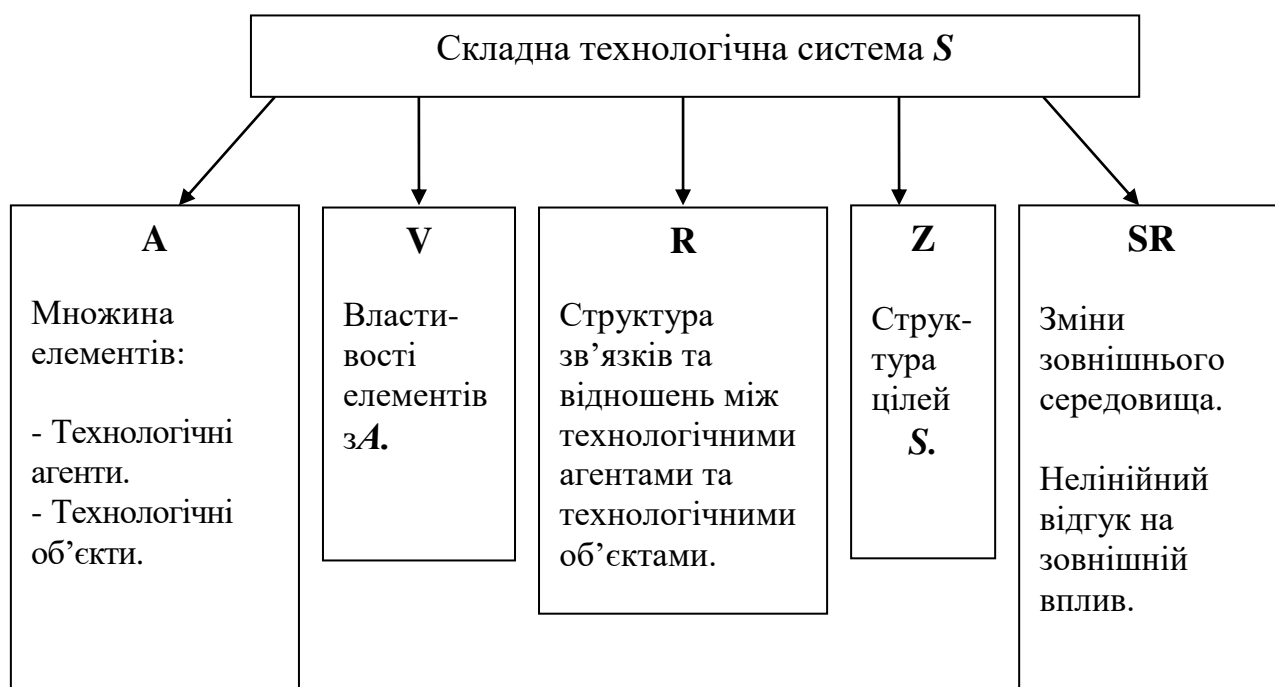


Рис. 2.1. Класифікація джерел складності технологічних систем.

Таким чином, джерела виникнення складності технологічних систем можна розділити на основне джерело - наявність в системі активних елементів, та додаткові, які розглянуті вище. Крім того, складність технологічної системи проявляється в її поведінці, що дозволяє сформулювати наступне визначення складної технологічної системи:

Складна технологічна система - це технологічна система, в складі якої присутні активні елементи, діяльність яких породжує додаткові джерела

виникнення складності, що призводить до нелінійної поведінки технологічної системи.

Аналіз переліку джерел складності технологічних систем дозволяє зробити висновок, що для повного і адекватного моделювання технологічної системи необхідно моделювати як її поведінку, так і її структуру. Проте не завжди перед дослідником стоїть мета (завдання) повного моделювання системи, як правило, функціонування технологічної системи породжує деяку технологічну проблему, яка вирішується шляхом моделювання.

Основними технологічними проблемами, які вимагають математичного моделювання складних систем, є:

Проблема 1 Отримання прогнозу поведінки системи (побудова неказуальних моделей).

Проблема 2. Ідентифікація внутрішнього устрою системи (побудова графіку структури системи).

Проблема 3. Ідентифікація причин, які викликають поведінку системи, що спостерігається (побудова казуальних моделей).

Проблема 4. Пошук ефективних станів системи як з точки зору поведінки, так і структури (побудова оптимізаційних моделей і методів знаходження оптимальних рішень).

Проблема 5. Зміна поведінки системи без зміни її структури (оптимальне управління).

Проблема 6. Зміна поведінки системи за рахунок зміни її структури (реструктуризація).

Першим етапом в концепції моделювання складних технологічних систем є етап визначення об'єкту моделювання. Так для вирішення проблем 1, 3 та 5 об'єктом моделювання є поведінка системи. Для проблеми 2 об'єктом моделювання є структура технологічної системи, для знаходження ефективних станів технологічної системи (*проблема 4*) і досягнення ефекту від реструктуризації (*проблема 6*) необхідно моделювати як поведінку, так і структуру.

Другий етап виконується, як правило, коли предметом моделювання є поведінка системи. На другому етапі аналізується, яка інформація про стан системи та її зміна в часі може бути доступною при моделюванні. Залежно від типу інформації здійснюється вибір методу моделювання. Виділимо три основних типи інформації про технологічну систему:

- часовий ряд спостережень за системою,
- постулати щодо загальної поведінки системи,
- гіпотези про поведінку технологічних агентів, які стосуються правил прийняття рішень, та їх зв'язків між собою із зовнішнім середовищем.

На рис. 2.2 приведена схема концепції моделювання складних технологічних систем, призначена для вирішення проблем 1 - 6.

Якщо інформація про систему представлена у вигляді часового ряду спостережень за одним або кількома показниками (перший тип подання інформації), то необхідно застосовувати комплексний аналіз технологічних часових рядів методами нелінійної динаміки, методи побудови предиктора на основі даних часового ряду.

Методологія проведення такого комплексного аналізу повинна включати в себе як адаптацію відомих методів і тестів, так і методи, створені і обґрунтовані з урахуванням особливостей технологічних часових рядів[38, 42].

Для підвищення точності прогнозів поведінки технологічної системи, доцільно використовувати метод побудови предиктора за даними часового ряду шляхом виділення траєкторій в псевдофазовому просторі станів системи[42].

У разі, коли інформація про систему якісна, і дозволяє висунути деякі загальні гіпотези про агреговану поведінку системи (другий тип подання інформації), можна здійснювати формалізацію поведінки системи у вигляді дискретних ітераційних відображень, наприклад, логістичного відображення і його модифікації у вигляді узагальненого логістичного відображення. Узагальнене логістичне відображення - це нова базова модель нелінійної динаміки, що дозволяє враховувати додаткові властивості технологічних систем, наприклад, асиметрію реакції на зміну свого стану[42].

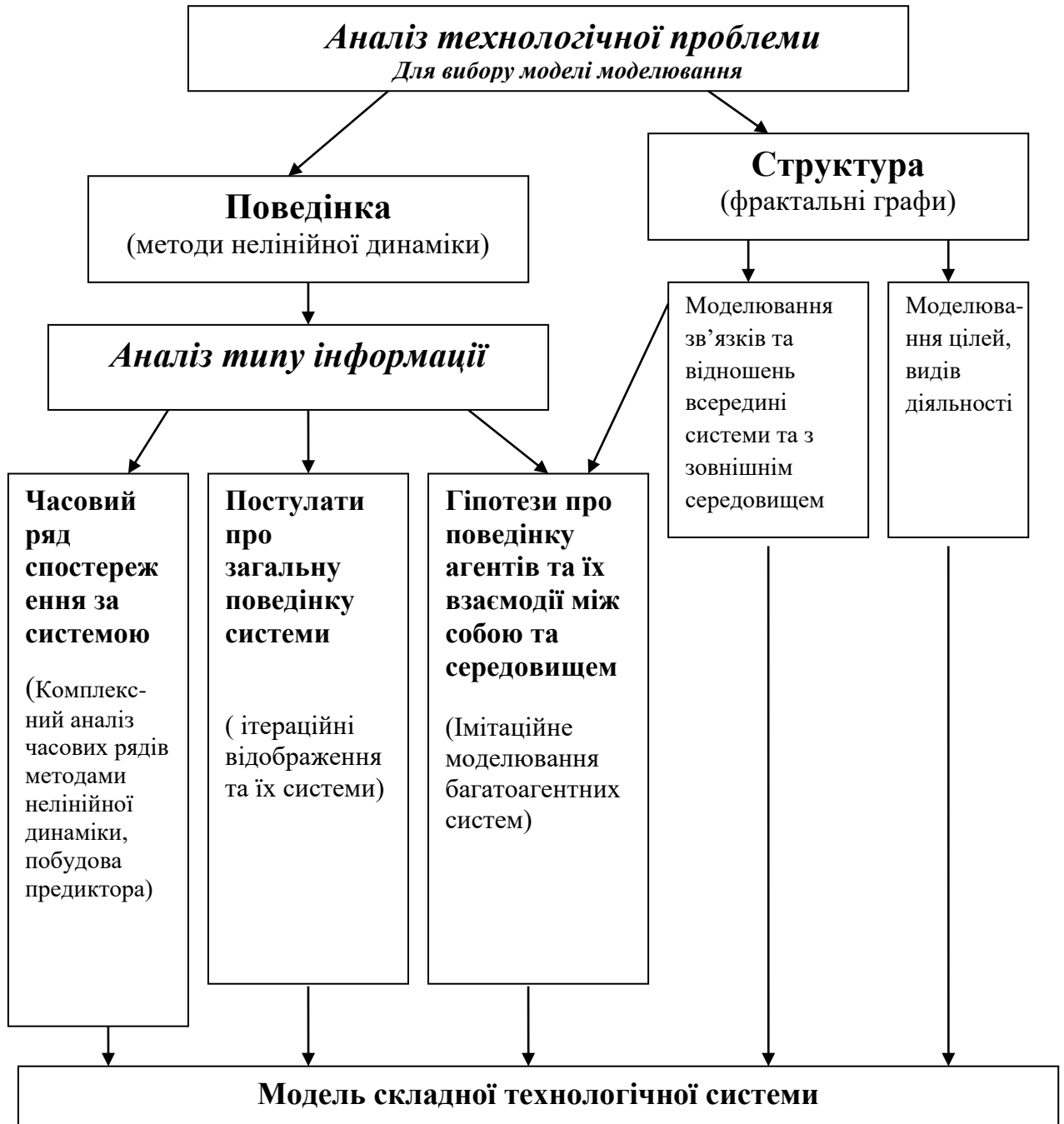


Рис. 2.2.Схема концепції моделювання складних технологічних систем

Вивчення властивостей узагальненого логістичного відображення, обґрунтування його переваг при моделюванні поведінки технологічних систем є актуальним завданням математичного моделювання складних технологічних систем.

Імітаційне моделювання застосовується для моделювання поведінки багатоагентних технологічних систем, коли інформація про систему дозволяє

сформулювати основні правила взаємодії між технологічними агентами та правила взаємодії агентів з зовнішнім середовищем. Якщо взаємодія агентів із середовищем є більш важливим, ніж взаємодія між агентами, пропонується використовувати клас імітаційних моделей «клітинні мережі з опосередкованою взаємодією».

Характерною особливістю складних технологічних систем є наявність в них багаторівневої ієрархічної внутрішньої структури, детальний аналіз якої дозволяє виявити властивість самоподібності. Для моделювання самоподібної структури пропонується використовувати спеціальний клас графіків - фрактальні дерева. Моделювання реалізується у вигляді схеми поетапного аналізу структури технологічних систем, в основі якої лежать алгоритми теорії фрактальних графіків.

Складні технологічні системи мають не єдину ціль, а структуру цілей, що володіє внутрішньою суперечливістю. Для таких систем необхідно застосовувати методи багатокритеріальної оптимізації[15]. В багатокритеріальних моделях виникає проблема побудови алгоритмів пошуку оптимальних рішень, а також проблема вибору компромісного рішення з безлічі парето оптимальних. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробляти спеціальні моделі, засновані на застосуванні методів нелінійної динаміки і математичної візуалізації[36].

2.2. Огляд моделей керування складними технологічними системами у цукровому виробництві.

Завдання керування складними технологічними системами ускладнене внаслідок нелінійності характеристик об'єкту, його багатомірності, наявності багаточисельних складних зв'язків, перебігання складних перехідних процесів, виникнення критичних та хаотичних режимів, і полягає в оперативному своєчасному розпізнаванні критичних станів в поведінці об'єкту та створенні превентивних дій, спрямованих на усунення причин появи цих змін.

Для ефективного керування складними нелінійними об'єктами виникає необхідність визначення наявності стійкого різноманіття (атракторів) – областей тяжіння фазових траєкторій об'єкту, а у випадку хаотичної поведінки – дивних атракторів, які мають фрактальну розмірність.

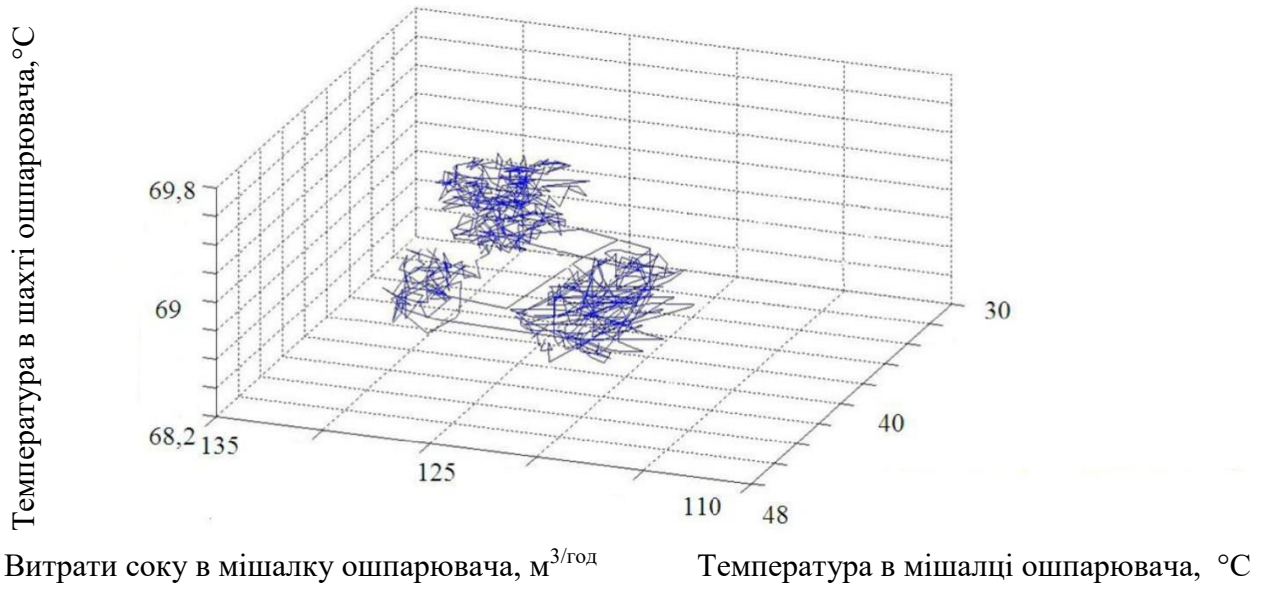
Найбільш перспективним додатком теорії нелінійних систем з хаотичною поведінкою є прогнозування динаміки породжуваних цими системами часових рядів. Часові ряди технологічних змінних – це, свого роду, модель поведінки об'єкту управління: у своєму складі визначає всілякі його особливості; являє структурні зв'язки об'єкту, його причинно-наслідкові відносини, характеризує не стаціонарність об'єкту, обумовлює вплив зовнішніх факторів тощо. Аналіз часових рядів суттєво ускладнюється нелінійністю динамічних характеристик складного об'єкту управління, які призводять до різноманітних проявів в поведінці, включаючи кардинальні зміни. Завдання виявлення цих особливостей потребує розробки та використання різних методів та технологій, спрямованих на оцінку характеристик об'єкту, адекватної ситуаційним проявам поведінки об'єкту та його розвитку. Причому, результати обробки часових рядів повинні в максимальній мірі забезпечувати оптимальну реалізацію прикладних функцій прогнозування та прийняття рішень по управлінню. Серед таких методів виділяють статистичні, ймовірнісні, логічні, нечіткі та нейромережеві, евристичні, методи нелінійної динаміки[10].

Нелінійна динаміка є науковою методологічною платформою, що дозволяє аналізувати рух різноманітних складних динамічних систем на основі об'єктивних законів їх розвитку. Теорія хаосу, як один з напрямків нелінійної динаміки, виключний інструмент, який дозволяє виявити глибинну сутність технологічних процесів, яка часто є скритною та неявною.

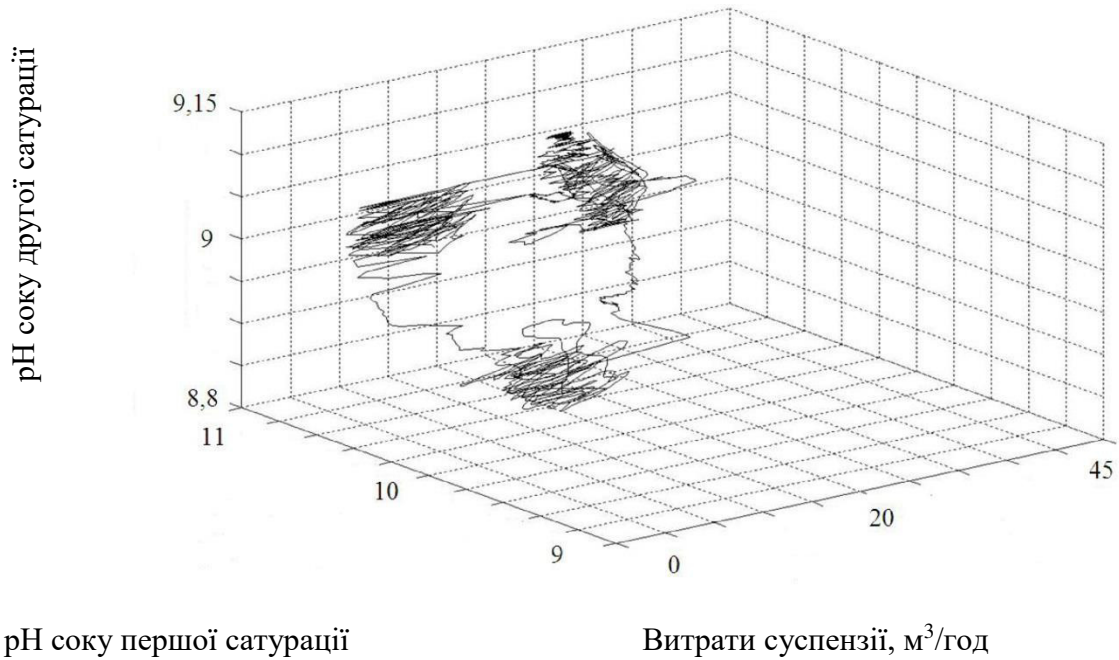
Розглянемо поведінку складного об'єкту на прикладі технологічного комплексу цукрового підприємства.

У процесі аналізу часових рядів методами нелінійної динаміки [13] найбільш важливим питанням є питання про те, чи містить фазова траєкторія об'єкту, що розглядається, атрактор[2]. На рис. 2.3 наведені фазові

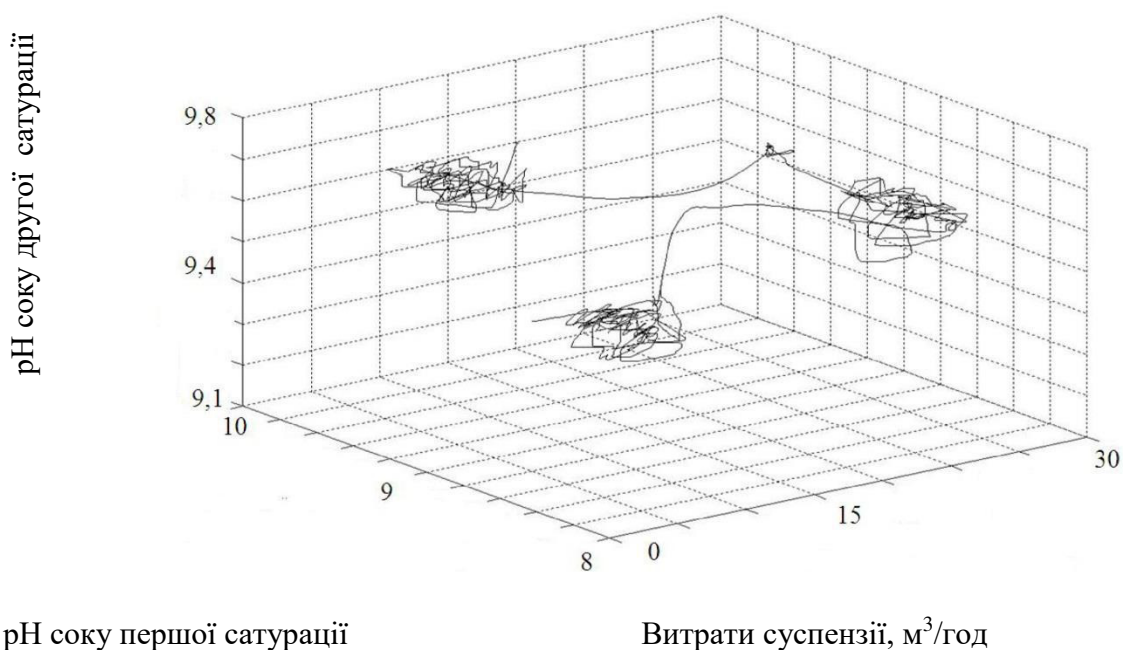
портрети об'єктів управління (дифузійного апарату та сатуратора), які підтверджують їх атрактивну поведінку.



a



б



в

Рис. 2.3. Фазові портрети об'єктів, що мають атрактивну поведінку: а – ошпарювача дифузійного апарату; б, в – сатуратора.

Суттєвою проблемою в моделюванні та прогнозуванні часових рядів, що містять хаотичну компоненту, є їх нестійкість до шумових збурень. Ця варіабельність призводить до необхідності фільтрації часових рядів від шуму, причому з урахуванням різноманіття та різної ступені інтенсивності дії шумів, їх нерівномірного спектру на різних часових проміжках. Потужним інструментом дослідження нестационарних сигналів є вейвлет-аналіз, спрямований на виділення сегментів, що мають суттєві локальні особливості за часом та частотою (розриви, біфуркації, зломи характеристик, наявність шумів), та виявлення їх характерних проявів[19].

Виходячи з теореми Такенна, за часовим рядом однієї змінної складної нелінійної системи, можна встановити багато властивостей поведінки системи, визначити топологію атрактора, оцінити розмірність (ємність) об'єкта, ідентифікувати структуру та параметри прогнозуючих предиктор-функцій.

У зв'язку з цим, одними з методів, що активно розвиваються, стали методи нелінійної динаміки. Моделювання в них здійснюється багатомірними різницевиими рівняннями:

$$X_{n+1} = F(X_n, C)$$

або диференціальними рівняннями

$$\frac{dx}{dt} = F(X, C)$$

де X – вектор стану; F – вектор-функція; C – вектор параметрів; n – дискретний час; t – неперервний час.

Традиційно модель створюється на основі найбільш суттєвих з точки зору каузальності факторів у відповідності з фундаментальними природними закономірностями та апріорними знаннями про об'єкт. Для складних об'єктів характерними є прояви локальної мінливості структури, що призводить до зміни ємності (розмірності вкладення) системи, й відповідно, до зміни структури та параметрів рівнянь моделей, що описують її поведінку.

Нелінійна динаміка згідно з теорією катастроф Тома[3] і концепцією русел і джокерів Малинецького [6] встановлює горизонти прогнозування тільки на визначених інтервалах часу (сегментах), від однієї точки біфуркації до іншої, або тільки на ділянках русел (Малинецький), де система змінюється більш-менш стабільно, а виникнення біфуркацій (джокерів) носить імовірнісний характер. Виходячи з цього, проблема коректного розбиття фазового простору складної динамічної системи з хаосом та ідентифікації на основі цього розбиття необхідних характеристик для завдань прогнозування та керування шляхом побудови локальних моделей, що оптимізуються для конкретного характеру поведінки об'єкту, є дуже актуальною.

Необхідне розбиття фазового простору на області визначення локальних моделей базується на методах виявлення змін деяких характеристик об'єкту. Для того, щоб успішно впоратися із задачами моделювання, прогнозування та управління складними нелінійними об'єктами була розроблена теорія «русел» та «джокерів». Так виник новий клас моделей – динамічні системи із джокером.

«Джокери» є областю в фазовому просторі, в якому поведінка системи є погано передбачуваною і носить випадковий характер. В протилежність «джокерам» «русла» - це області достатньо стійкої, і, відповідно, передбачуваної поведінки.

Як відомо, є такі причини появи джокерів в фазовому просторі в динамічній системі[39]:

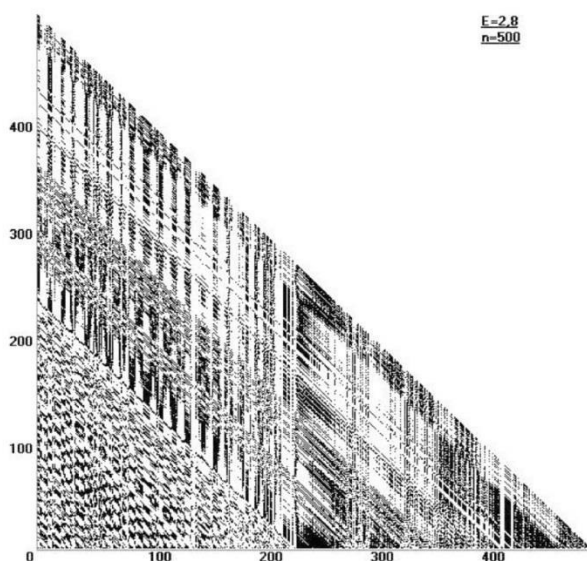
- локальна нестійкість системи, що має хаотичну поведінку, яка, чергуючись зі стійким рухом, формує дивні атрактори;
- сильна перемежовуваність, коли відбувається зміна режимів поведінки з відносно високою швидкістю;
- внаслідок впливу зовнішніх шумів в локальних областях;
- система характеризується високомодовим рухом;
- в об'єкті відбуваються швидкі системні зміни, в тому числі й критичні.

Для обґрунтування відповіді на важливе питання про зміст у траєкторії часового ряду, що розглядається, технологічної змінної дивного атрактора, у теперішній час розроблений ряд алгоритмів і тестів, які отримали назву метричних тестів (обчислення кореляційної розмірності, максимального показника Ляпунова, К-ентропії Колмогорова, BDS-тест, тест залишків Брока, фрактальний аналіз). Останнім часом намітилася тенденція використання так званих графічних тестів у процесі моделювання часових рядів методами нелінійної динаміки. Можна виділити в цьому графічний тест хаосу, запропонований Гілмором[52]. Цей тест виявляє нестійкі квазіперіодичні періоди, що замкнені у дивному аттракторі. Для виявлення таких орбіт у часовому ряді, що аналізується, найбільш зручним за своєю реалізацією є підхід, який можна назвати терміном «розкладання фазового портрету на квазіцикли». Цей метод забезпечує хорошу візуалізацію структурних особливостей часових рядів.

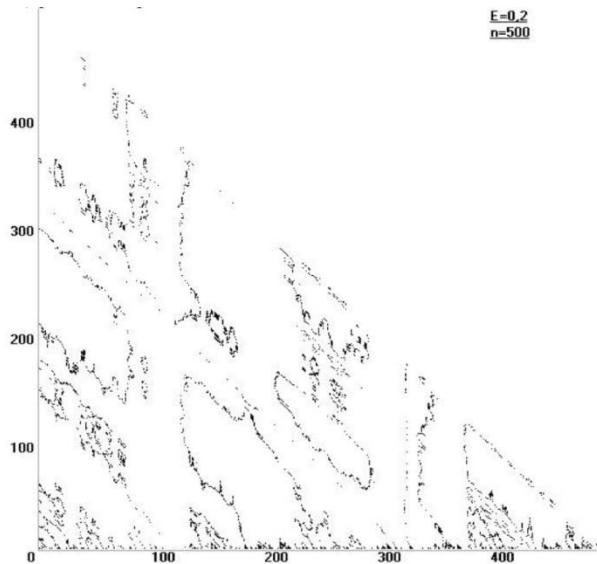
Графічний тест хаосу Гілмора виявляє нестійкі періодичні орбіти, замкнені у дивному аттракторі. Вихідним об'єктом для виконання тесту є часовий ряд $\{x_t\}$ [42]. Якщо яке-небудь спостереження x_t виявиться біля періодичної траєкторії, тоді наступні спостереження будуть просуватися

вздовж цієї траєкторії протягом деякого часу, поки не віддаляться від неї. Якщо спостереження просувається вздовж траєкторії значний час, тоді вони повернуться в площину точки x_t через деякий інтервал часу τ , де τ – вказує довжину циклу, яка вимірюється в одиницях вибірових інтервалів. Це означає, що $|x_t - x_{t-\tau}|$ буде малим. Далі x_{t+1} буде біля $x_{t+1+\tau}$, x_{t+2} буде біля $x_{t+2+\tau}$ і так далі. Таким чином, має сенс шукати серії послідовних даних, для яких $|x_t - x_{t-\tau}|$ мало. Для того щоб знайти ці області «тісного повернення» в множині даних, треба побудувати спеціальним чином розфарбований графік. Вираховуються усі різниці $|x_t - x_{t-\tau}|$. Якщо різниця менше чим ϵ , то це позначається на графіку чорним кольором, якщо більше, ніж ϵ , то позначається білим кольором.

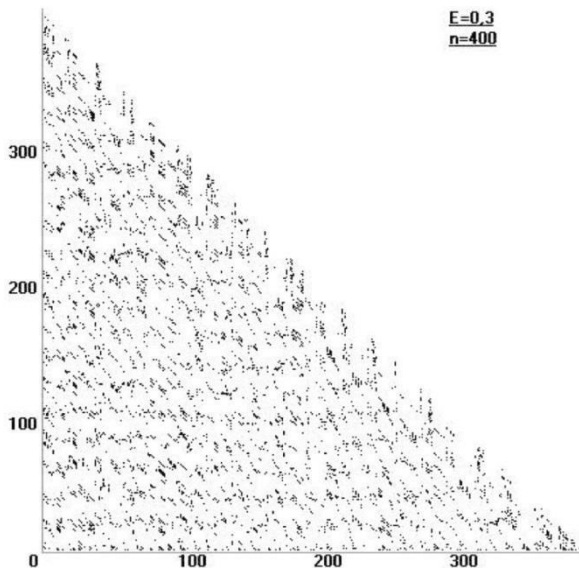
По горизонтальній вісі відкладається номер спостереження t , де $t = (1, 2, \dots, T)$, а вертикальна вісь позначається через τ , де $\tau = (1, 2, \dots, T - t)$. На наявність тісного повернення в даних вказують горизонтальні відрізки прямих. В той час як, якщо множина даних стохастична, виникне область рівномірно розподілених чорних точок[42]. На рис. 2.4 наведені результати проведення тесту Гілмора для ряду часових рядів технологічних змінних бурякоцукрового виробництва. Як бачимо, спостерігаються різні прояви в поведінці об'єкту керування: наявність інтервальних джокерів та русел (рис. 2.4а), існування квазіперіодичних орбіт (рис. 2.4б), стохастична поведінка (рис. 2.4в).



а) витрати дефекованого соку



б) температура соку в шахті ошпарювача



в) витрати дифузійного соку

Рис. 2.4. Результати проведення тесту Гілмора для ряду часових рядів технологічних змінних бурякоцукрового виробництва.

В залежності від правила та розмірності області джокера їх можна класифікувати на точкові та інтервальні (безперервні). Точковий джoker – це джoker першого роду, що дозволяє з деякою ймовірністю перевести систему у певну точку миттєво, чи в дві точки з різними ймовірностями (джoker другого роду)[21]. Інтервальний джoker – це джoker третього роду, що розглядається як узагальнення джокерів першого та другого родів і дозволяє перевести систему в певну точку за законом розподілу ймовірності.

Якщо на графічному тесті Гілмора виділяють суцільні лінії, це свідчить про наявність в системі детермінованого хаосу (рис. 2.5)

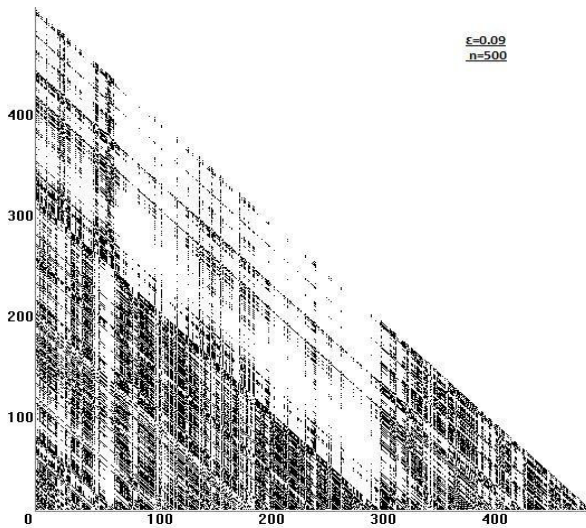


Рис. 2.5. Графічний тест витрати дифузійного соку, де $\varepsilon=0.9$, а кількість спостережень $n=500$

Якщо ж в системі наявні точкові та інтервальні джокери, то на графічному тесті відображаються порожні проміжки, що є свідченням розривів відображення (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Графічний тест температури дифузійного соку при $\varepsilon=0.5$ для кількості спостережень $n=600$

Якщо ж виділяється наявність лише інтервального джокера, тоді на графічному тесті можна виділити наявність складного частотного спектру у вигляді квазіперіодичних орбіт (рис. 2.7).

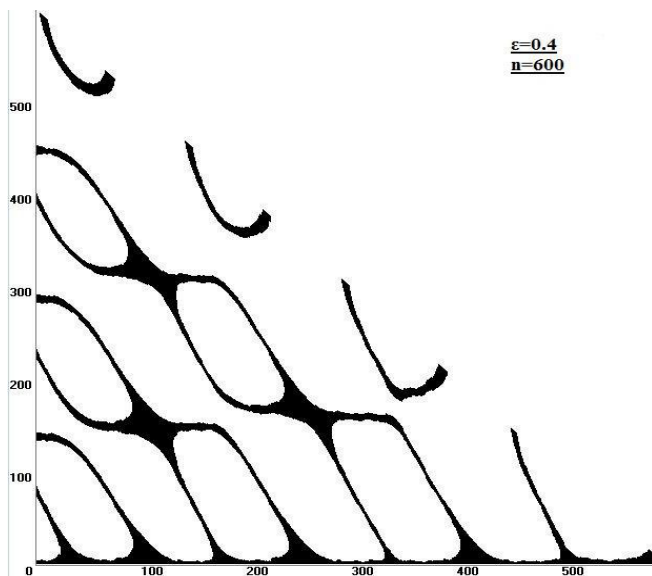


Рис. 2.7. Графічний тест значення pH при $\varepsilon=0.4$ для кількості спостережень $n = 600$

Існують методи, засновані на аналізі деяких метричних характеристик часових рядів, що спостерігаються, які забезпечують знаходження локальних областей різної поведінки, причому ідентифікація математичних моделей є необов'язковою. Одним з ефективних методів аналізу часових рядів за оцінкою характеру поведінки об'єкту управління є R/S -аналіз. Характеристикою типу поведінки в цьому випадку є показник Херста H , який визначається через розмах R зміни значень на відрізку часу Δt та розраховане на цьому відрізку стандартне відхилення S [37]:

$$H = \ln\left(\frac{R}{S}\right) / \ln(\Delta t)$$

показник Херста пов'язаний з фрактальною розмірністю D наступним чином:

$$D = 2 - H$$

Знаючи значення фрактальної розмірності D , можна оцінити розмірність вкладення m за формулою Такенна

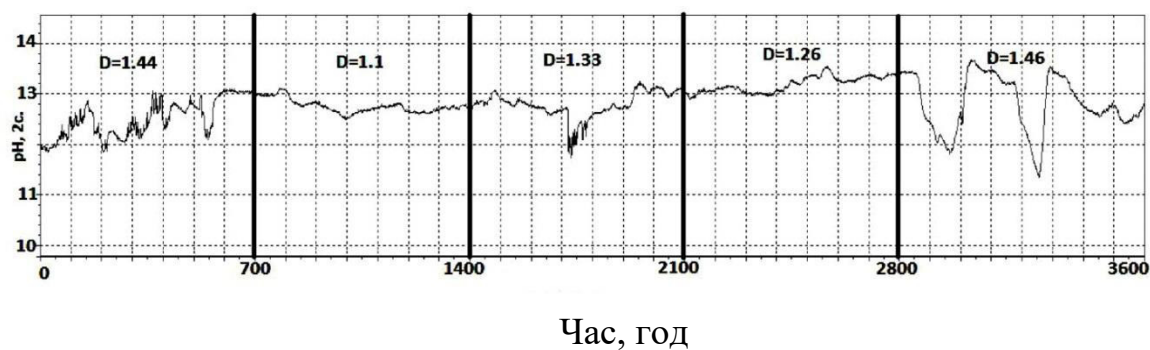
$$m > 2D + 1$$

Крім того, розмірність вкладення можна оцінити на основі кореляційної розмірності, а також методами ложних сусідів та головних компонентів.

Властивості часового ряду залежать від того, в який проміжок часу потрапляє оцінене значення показника Херста чи фрактальної розмірності.

Ряди з $0,5 < H < 1$ називаються персистентними, або рядами з підтримуючою поведінкою. У таких рядах, якщо значення спостережної величини збільшувалося протягом деякого періоду, тоді можна очікувати, що воно буде збільшуватися ще протягом деякого періоду часу. Говорять, що такі ряди володіють довготривалою пам'яттю.

Ряди з $0 < H < 0,5$ називаються антиперсистентними, для них характерно, що після зростання значення спостережної змінної зазвичай відбувається її зменшення. Ряди з $H=0,5$ є стохастичними. На рис. 2.8 показано, яким чином змінюється характер поведінки об'єкту: відбувається чередування режимів від детермінованого до стохастичного або хаотичного.



a

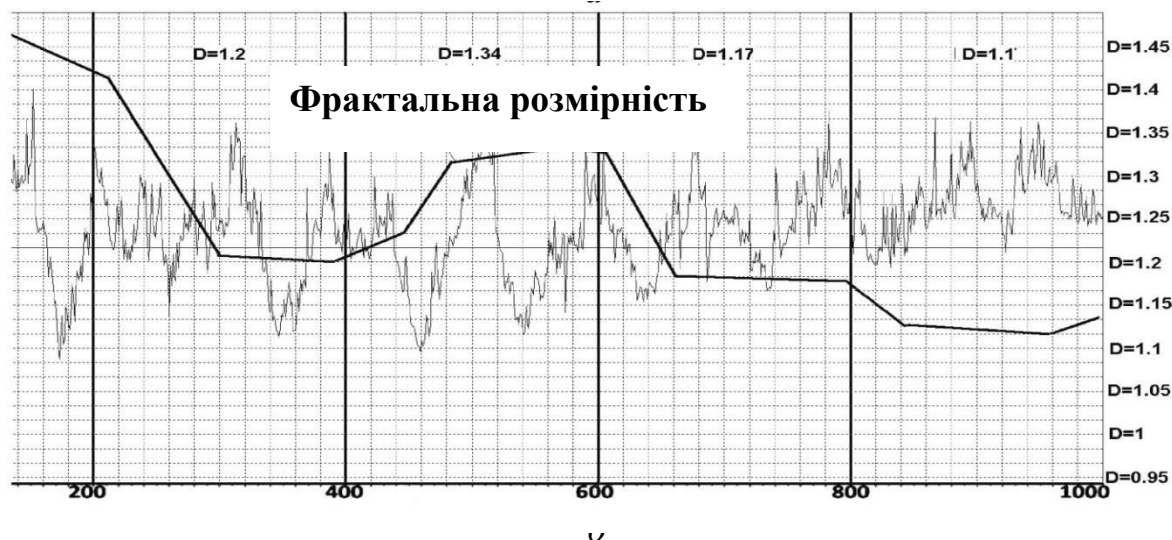


Рис. 2.8. Зміни фрактальної розмірності часового ряду рН другої сатурації: а – посегментні зміни; б – неперервні зміни.

Таким чином, методика аналізу часових рядів технологічних змінних дозволяє визначити характер поведінки складного нелінійного об'єкту та

вибрати у відповідності з ситуацією необхідний апарат ідентифікації моделей для мети прогнозування та інтелектуального керування процесом.

2.3. Методи дослідження даних цукрового виробництва.

Для аналізу випадкових процесів широко використовуються традиційні методи статистичного аналізу випадкових величин і функцій [29]. Поряд з ними в останні роки набувають поширення способи обробки сигналів, засновані на фрактальному і вейвлет перетвореннях [48]. Відмінна особливість останніх полягає в тому, що вони поряд з глобальними характеристиками випадкових процесів, дозволяють розкрити особливості їх локальної структури. Тому актуальність застосування фрактального та вейвлет аналізу часових рядів не викликає сумніву. Важливою характеристикою методів, заснованих на фрактальних уявленнях та вейвлет перетвореннях, є їх універсальність.

Основний алгоритм цих методів будується за умови існування часового ряду і полягає у визначенні показників хаотичності та аналізі особливих станів системи за допомогою вейвлет перетворення. Дане комплексне застосування дає більш повну інформацію про досліджуваний процес, описаний часовими рядами. Аналіз вейвлет коефіцієнтів дозволяє виявити нестационарності досліджуваного процесу на будь-яких частотно-часових масштабах, і тим самим отримати як якісні, так і кількісні характеристики нестационарності.

Вейвлети представляють собою особливі функції у вигляді коротких хвиль (сплесків) з нульовим інтегральним значенням і з локалізацією по осі незалежної змінної (t або x), здатних до зрушення по цій осі і масштабування (розтягненню / стиску). Будь-який з найбільш часто використовуваних типів вейвлетів породжує повну ортогональну систему функцій.

У разі вейвлет-аналізу (декомпозиції) процесу (сигналу) в зв'язку зі зміною масштабу вейвлети здатні виявити відмінність в характеристиках процесу на різних шкалах, а завдяки зсуву можна проаналізувати властивості процесу в різних точках на всьому досліджуваному інтервалі. Саме завдяки властивості повноти цієї системи, можна здійснити відновлення

(реконструкцію або синтез) процесу за допомогою зворотного вейвлет-перетворення.

Аналіз фрактальних розмірностей надає кількісну оцінку хаотичності досліджуваного процесу. Даний алгоритм дозволяє будувати оцінки з виділенням факторів (показників), які зумовлюють незадовільний стан даного процесу. Основним результатом є математична модель часового ряду для генерації від статистичних процесів до хаотичних, яка при використанні експериментальних даних враховує реальні умови аналізу часових процесів з різних предметних областей, в тому числі соціальних процесів.

Одним із сучасних інформативних методів візуалізації результатів вимірювальних експериментів є нелінійний рекурентний аналіз часових рядів, який заснований на фундаментальній властивості дисипативних динамічних систем - рекурентності, тобто повторюваності станів. Цю властивість процесів в природі було винайдено французьким математиком Пуанкаре і сформульовано у вигляді «теореми рекурентності».

У даному методі властивості процесів представляються у вигляді геометричних структур, і є інструментом для виявлення прихованих залежностей у спостережуваних часових рядах.

У цілому, математичне моделювання за часовими рядами є напрямком, що останнім часом активно розвивається. Так, дослідження часових рядів відіграє важливу роль при роботі з вже побудованими математичними моделями.

Коректність конкретизації моделі залежить від того, як повно була проаналізована сама модель. У випадку встановлення недостатньої адекватності моделі процес повторюється знову з одного з етапів, що тягне за собою додаткові тимчасові матеріальні затрати. При динамічному моделюванні основним критерієм адекватності математичної моделі є адекватність прогнозу поведінки вихідної реальної системи.

Таким чином, засоби аналізу часових рядів є одним з найважливіших інструментів дослідника при моделюванні за часовими рядами. Дослідник, який

оцінює апріорні дані, як правило, вирішує наступні основні завдання: визначення характеру процесів (стохастичність, хаотичність, періодичність, квазіперіодичність тощо), виявлення особливостей еволюції (зміни режиму, зміни рівня шуму, зміни трендів тощо), порівняння процесів (виявлення подібності, відхилення від еталону, синхронізація тощо).

Складні технологічні системи, до яких відноситься і цукрове виробництво, мають не єдину ціль, а структуру цілей, що володіє внутрішньою суперечливістю. Для таких систем необхідно застосовувати методи багатокритеріальної оптимізації. В багатокритеріальних моделях виникає проблема побудови алгоритмів пошуку оптимальних рішень, а також проблема вибору компромісного рішення з безліччю парето оптимальних. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробляти спеціальні методики, засновані на застосуванні методів нелінійної динаміки і математичної візуалізації.

2.3.1. Аналіз даних з використанням вейвлет-перетворення

Термін «вейвлет» (wavelet) в перекладі з англійської означає «Маленька (коротка) хвиля» або «сплеск». Вейвлети - це узагальнена назва сімейств математичних функцій певної форми, які локальні в часі і по частоті, і в яких всі функції виходять з одної базової (породжує) за допомогою її зрушень і розтягувань по осі часу. Вейвлет-перетворення розглядають аналізовані тимчасові функції в термінах коливань, локалізованих за часом і частотою[4].

Основна область застосування вейвлетного перетворення— аналіз і обробка сигналів і функцій, нестационарних в часі або неоднорідних в просторі.

Результат аналізу зміст не тільки загальної частотної характеристики сигналу (розподіл його енергії по частотним складовим), але і відомостей про певні локальні координати, на яких виявляють себе або швидко змінюються ті чи інші групи частотних складових сигналу.

При зміні масштабу вейвлети здатні виявити відмінність в характеристиці процесу (сигналу) на різних шкалах, а за допомогою зсуву можна проаналізувати властивості процесу в різних точках на всьому досліджуваному

інтервалі. Саме завдяки властивості повноти цієї системи можна здійснити відновлення (реконструкцію або синтез) процесу за допомогою зворотного вейвлет перетворення.

Завдяки високій швидкодії, ефективності алгоритмів та їх стійкості до дії перешкод, вейвлет-перетворення є потужним інструментом при використанні його в вимірювальних системах[23]. Так, використання вейвлет аналізу із застосуванням ортогональних базисів підходить для вирішення цілого кола завдань в області сучасних вимірювальних систем. Поведінка ряду вейвлет функцій спектрально схожа з деякими затухаючими періодичними коливаннями, такими як локальний сигнал виду загасаючий синус тощо.

Вейвлет-перетворення можуть надати розширену інформацію про результати вимірювання, отриманого в ході експерименту. Це досягається за рахунок фільтрації вихідних даних від випадкових перешкод, шумів, викидів, нелінійних спотворень в сигналі. Виявлення локальних особливостей або виділення окремих ділянок в сигналі необхідно на етапі аналізу. Локальний сигнал може служити в якості такого об'єкту виявлення та подальшого вимірювання його параметрів. Спільна робота в частотній та часовій області дозволяє істотно розширити можливості у напрямку обробки даних. Вейвлети представляють механізм обробки експериментальних даних, для вирішення завдань, пов'язаних з шумозаглушенням, обробкою зображень, відео потоків тощо. Використовуючи вейвлет-перетворення, стає можливим виділити цікаві з точки зору вимірювача, особливості сигналу та визначити їх основні параметри (амплітуду, тривалість і місце знаходження максимуму) та інші складові.

Вибір вейвлетів досить великий[47]. Їх різновиди дозволяють підбирати найбільш відповідні типи вейвлетів для вирішення конкретних завдань обробки локальних сигналів. Вейвлети можна класифікувати щодо наступних характеристик: ортогональність, базисні функції розкладання ψ і відновлення ϕ , наявність компактного носія і кінцевої імпульсної характеристики фільтра, симетричність, можливість реконструкції.

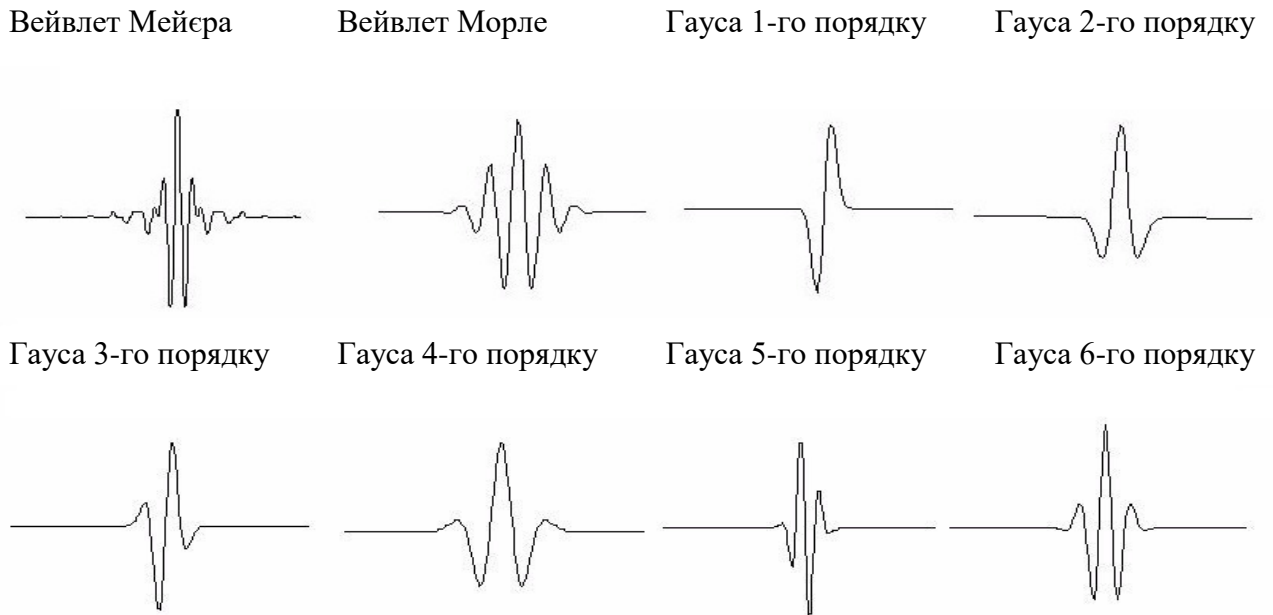


Рис. 2.9. Приклади найчастіше використовуваних вейвлетів

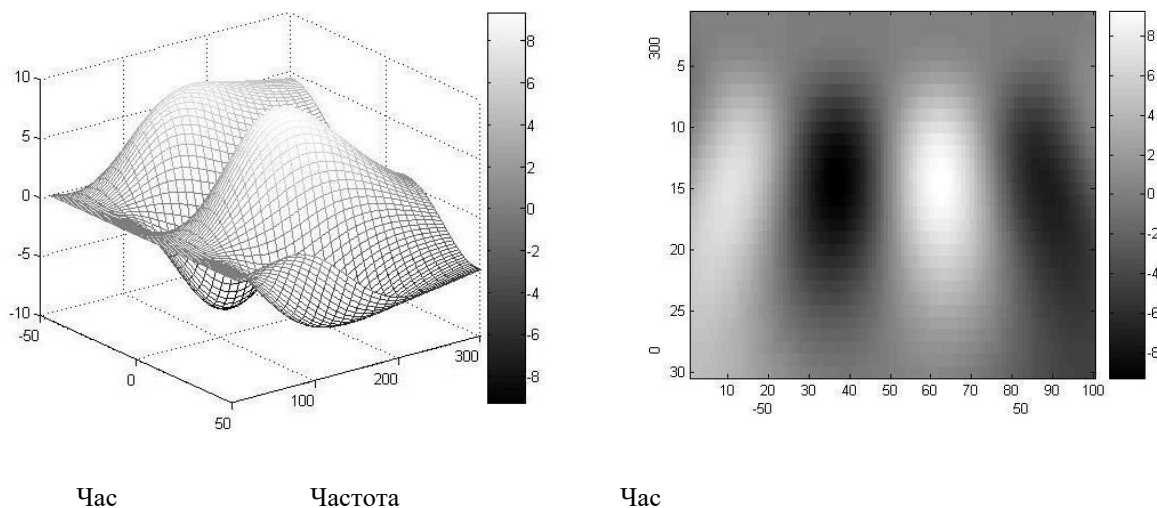
На практиці рекомендується використовувати ортогональні симетричні і асиметричні вейвлети. Властивість ортогональності полегшує аналіз і дає можливість реконструкції сигналу (повного і точного відтворення) і дозволяє реалізувати алгоритми швидких вейвлет перетворень.

Вейвлет перетворення одновимірного сигналу перетворює функцію однієї змінної в набір вейвлет-коефіцієнтів, який являє собою функцію двох змінних – масштабу a та зміщення b . Якщо при обчисленні перетворення ці параметри змінюються в достатніх межах, то коефіцієнти $W_{\psi}(a,b)$ містять в собі повну інформацію про вимірювальний сигнал. На прикладі простої гармонійної функції $f(t) = \sin(\omega \cdot t)$, де $\omega = 2\pi/T$, $T = 50$, а значення t лежить в інтервалі від -50 до $+50$ можна побудувати тривимірну площину вейвлет коефіцієнтів, що являє собою спектр.

Способи уявлення (візуалізації) $W_{\psi}(a,b)$ можуть бути різними. Спектр $W_{\psi}(a,b)$ є поверхнею у тривимірному просторі (рис. 2.10.а), що дозволяє відстежити зміну інтенсивності амплітуд вейвлет перетворення в різних масштабах та за часом.

Часто замість зображення поверхні уявляють її проекцію на площину (рис. 2.10.б), що дозволяє відстежити зміни інтенсивності амплітуд вейвлет

перетворення. Чорний колір відповідає мінімальному значенню вейвлет-коефіцієнтів, білий – максимальному. Проміжні значення відповідають відтінкам сірого різної інтенсивності.



а) трьохмірна поверхня спектру

б) проекція коефіцієнтів на поверхню

Рис. 2.10. Графічні схеми уявлення вейвлет-коефіцієнтів.

Вейвлет-перетворення сигналів є узагальненням спектрального аналізу, типовим представником якого є класичне перетворення Фур'є. Перетворення Фур'є вважається традиційним математичним методом, що застосовується для аналізу стаціонарних процесів. Сигнали представляються у вигляді суми функцій синусів і косинусів або комплексних експонент. Ці базисні функції визначені на всьому часовому проміжку $(-\infty, \infty)$. Якщо говорити про практичне застосування і проточності довільних сигналів, то у перетворення Фур'є є деякі недоліки і обмеження. Воно має, з одного боку, хорошу частотну локалізацію сигналу, з іншого - поганий дозвіл за часом [20].

Щоб застосувати таке перетворення, необхідна наявність сигналу не тільки зараз, але і в минулому, а також в майбутньому (при умові, що задана тільки одна частота). Це пов'язано з тим, що при розробці додатку в ряд Фур'є використовуються гармонійні функції (синусоїди), які визначені на всьому часовому інтервалі - від $-\infty$ до $+\infty$. Інша особливість цього методу полягає у відсутності можливості обліку змін частоти коливань у часі. Локальні особливості сигналу (розриви, сходинки, піки і т. п.) при такому перетворенні

створюють малопомітні складові спектра. Перетворення Фур'є не здатне виявити ці особливості сигналу. Тому стає неможливою і точна реконструкція вихідного сигналу (проявляється ефект Гібса).

Слід зазначити, що на практиці стаціонарні сигнали зустрічаються рідко, а для нестационарних перетворень Фур'є деколи не може бути застосовано.

Для дослідження функцій і сигналів, нестационарних в часі або неоднорідних в просторі, ефективний метод вейвлет перетворення (ВП)[28].

Вейвлет-перетворення одновимірного сигналу - це його представлення у вигляді узагальненого ряду або інтегралу Фур'є по системі базисних функцій:

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.1)$$

сконструйованих з материнського (вихідного) вейвлета $\psi(t)$, що володіє певними властивостями за рахунок операцій зсуву в часі (b) і зміни тимчасового масштабу (a).

Метод заснований на фундаментальній концепції виставлення довільних функцій на основі зрушень і розширення однієї локалізованої невеликої хвилі, або вейвлет-функції, яка швидко згасає у напрямку до нуля. Вейвлет формується таким чином, що утворює його функція (вейвлетоутворююча функція, або материнський вейвлет) характеризується певним масштабом (частотою) і локалізацією в часі за рахунок операцій зсуву в часі і зміни тимчасового масштабу. Останній аналогічний періоду осциляцій, оберненій частоті, а зрушення інтерпретує зміщення сигналу по осі часу[24].

Розрізняють два види вейвлет-перетворення: безперервні і дискретні.

Неперервні вейвлет-перетворення. Аналіз даних з використанням безперервного вейвлетперетворення (НВП або CWT) є зручним, надійним і потужним інструментом дослідження технологічних процесів і дозволяє представити результати в наочному вигляді, зручному для вивчення і інтерпретації.

Неперервні вейвлет-перетворення[50]дають можливість відобразити на одній діаграмі усі періоди, що нас цікавлять. Нехай $\psi(t)$ – деяка швидкоспадна функція, що задовольняє умові допустимості:

$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)dt = 0$ та умові нормування $\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1$. Неперервним вейвлет-перетворенням сигналу $x(s)$ є величина, що залежить від двох параметрів (t, a) , $a > 0$:

$$W_x(t, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(s) \cdot \psi\left(\frac{s-t}{a}\right) ds = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t+av) \cdot \psi(v) dv$$

(2.2)

t – момент часу, $a > 0$ – параметр масштабу, який в подальшому будемо називати «періодом». Величина (2.2) відображає поведінку досліджуваного сигналу в площині точки t з характерним масштабом варіацій a . Для сигналу з дискретним часом обрахування величин (2.2) може бути ефективно реалізовано за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Проте безпосередньою метою є побудова двомірної карти значень модуля величини (2.2): $|W_x(t, a)|$, яка дає наглядне уявлення про динаміку виникнення, еволюції та зникнення «характерних періодів» короткостроково живучих сплесків досліджуваного сигналу. Відповідно величина (2.2) сильно залежить від вибору функції $\psi(t)$. Вибір тієї чи іншої функції $\psi(t)$ визначається тим, якого виду короткостроково живучі сигнали ми хочемо вивчати.

Слід підкреслити, що для кінцевої виборки та для даного масштабу a на кінцях часового інтервалу існують «мертві» відрізки часу, такі, що для моментів часу t , що належать цим відрізкам, «не вистачає» даних або зліва, або справа від точки t для вирахування (2.2). При використанні швидкого перетворення Фур'є сигнал розглядається на кільці й тому, якщо він містить сильний низькочастотний тренд, то для моментів часу t , близьких до начала та кінця виборки, виникають сильні сплески значень $|W_x(t, a)|$, які можуть сильно маскувати «корисні» варіації величин (2.2) всередині інтервалу. Тому перед розрахунком неперервного вейвлет-перетворення рекомендується позбавлятися

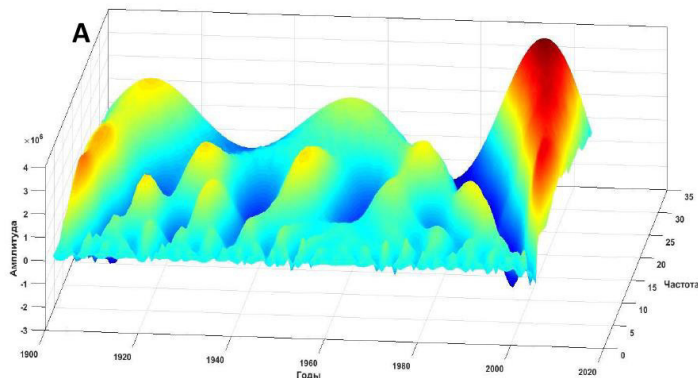
від низькочастотних трендів й, крім того, при інтерпретації неперервних вейвлет-діаграм вводити поправки на те, що значення $|W_x(t, a)|$ для моментів часу t , близьких до початку та кінця інтервалу завдання сигналу, насправді не відображають справжніх властивостей сигналу. Для даного масштабу a довжина «мертвих» відрізків часу, що примикають до кінців виборки зазвичай пропорційна масштабу. Для вейвлетів, швидкість затухання яких задається множиною у вигляді гаусівської функції, цю довжину можна задати рівною $3a$.

Серед комплексних вейвлетів найбільш часто використовується базис, оснований на добре локалізованому (і в тимчасовій і в частотній областях), який є однією з найбільш популярних функцій $\psi(t)$ вейвлет Морле або комплексозначний «модульований гаусіан»:

$$\psi(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}} \exp\left(-\frac{t^2}{2} - i\pi t\right) \quad (2.3)$$

Цей вейвлет найкращим чином пристосований для відокремлення короткостроково живучих гармонічних сплесків (цугів) та володіє певними властивостями оптимальності у пошуку компромісу між частотним та часовим розрішенням (виходить так звана гейзенбергівська межа).

Наведено аналіз даних виробництва цукру в Німеччині з застосуванням вейвлет-перетворення. Розглянемо сигнал, що складається з шести синусоїд різних частот і фаз. Виконаємо аналіз сигналу з використанням вейвлета Морле. Отримуємо вейвлетну площину (рис.2.12). Чітко видно поділ частот і фазові відносини між синусоїдами. Скалограма, представлена на малюнку 2.12, побудована на основі коефіцієнтів неперервного вейвлет-перетворення.



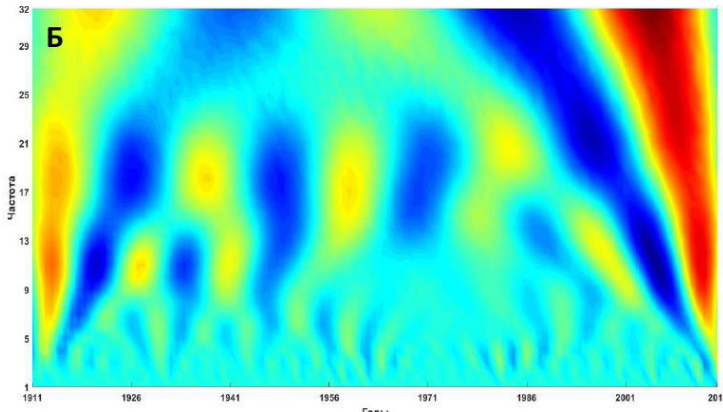


Рис. 2.12. - Графічне відображення виробництва цукру в Німеччині (1911-2015): в 3D-проекції (А) і його скалограми (Б)

Іншим сімейством функції $\psi(t)$ є так звані гаусівські вейвлети, які визначаються як похідні від гаусіана заданого порядку m :

$$\psi_m(t) = c \frac{d^m}{dt^m} e^{-t^2} = (-1)^m c_m H_m(t) e^{-t^2}, \quad m \geq 1 \quad (2.4)$$

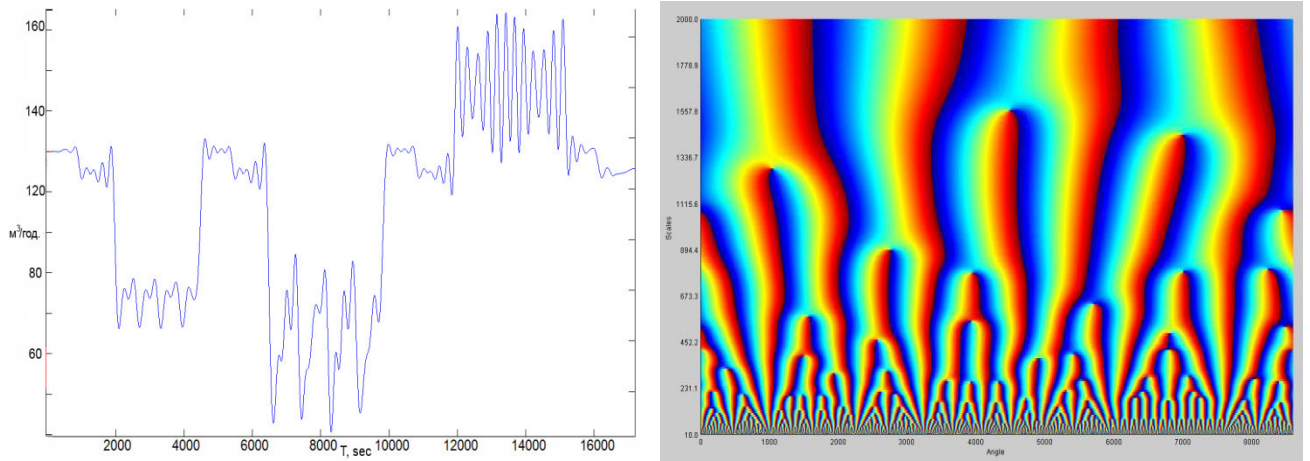
де c_m – нормувальні константи, що забезпечують одиничну квадратичну інтегральну норму для $\psi(t)$, $H_m(t)$ – поліноми Ерміта, $H_0(t)=1$, $H_1(t)=2t$, $H_{m+1}(t) = 2mH_{m-1}(t)$. З них найбільш відома «мексиканська шляпа» $\psi_2(t)$. Для даного порядку m функція (2.4) володіє властивістю обнуління перших m моментів:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi_m(t) dt = 0, \quad k = 0, 1, \dots, (m-1) \quad (2.5)$$

Звідси випливає, що якщо $x(s)$ – поліном порядку не вище $m-1$ включно, то його перетворення (2.2) буде тотожно рівним нулю.

Форма вейвлета $\psi_2(t)$ орієнтована на відокремлення симетричних сплесків «класичної» неосцілюючої форми. Інтерпретація таких діаграм менш змістовна ніж діаграма Морле, так як вони просто підкреслюють наявність сплесків різного масштабу, що виникають в різні моменти часу. Більш змістовна інтерпретація вейвлет-діаграм для сімейства (2.5) надається за допомогою ланцюгів скелету максимумів модулів величин $|W_x(t, a)|$.

На рис. 2.13 представлено сигнал з проміжками та спектр вейвлета Гауса.



а) сигнал з проміжками часового ряду б) спектрограма вейвлета Гауса

Рис. 2.13. Вейвлет-перетворення сигналу витрати дифузійного соку на сокоочистку.

На рис. 2.14 представлена декомпозиція нестационарного тимчасового ряду виробництва цукру в Німеччині.

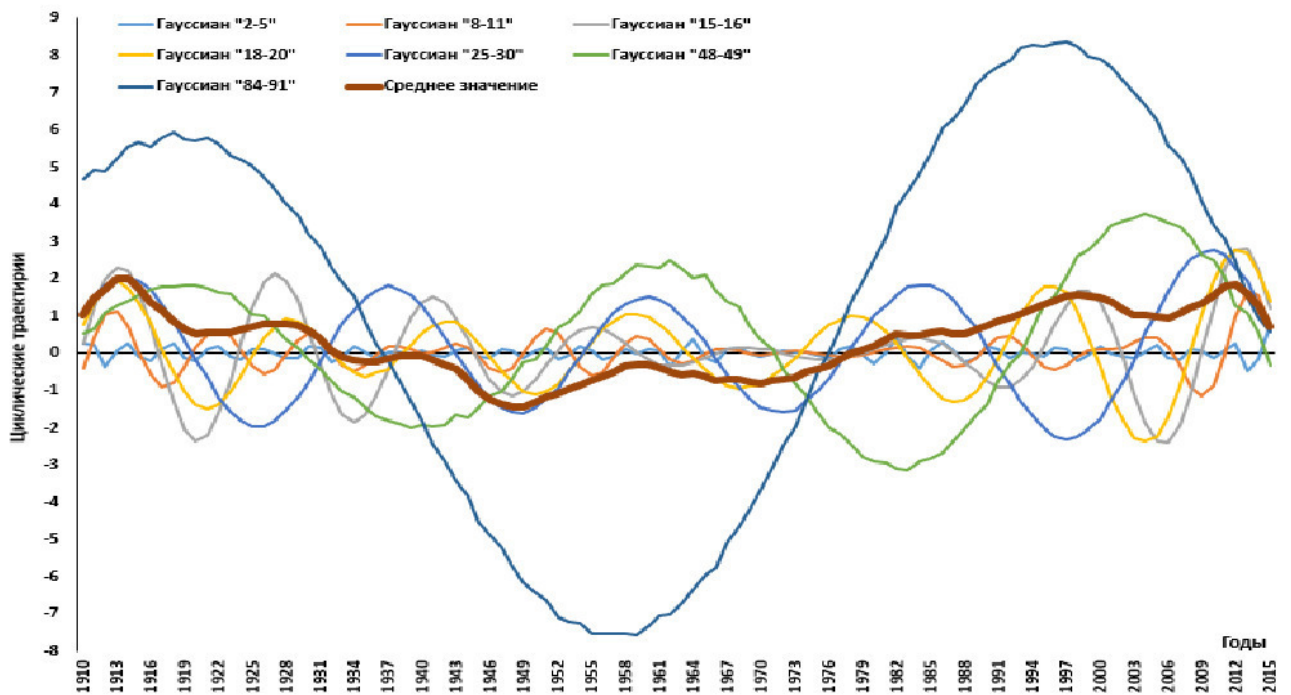


Рис. 2.14. Розкладання на гармоніки(поділ процесу (часу) на кілька потоків, в кожному з яких відбуваються свої події (цикли)) показників виробництва цукру в Німеччині (1910-2015)

Вибір вейвлета для аналізу багато в чому залежить від того, яку інформацію необхідно витягти з сигналу. З урахуванням характерних особливостей різних вейвлетів в часовому і в частотному просторі, можна виявляти в аналізованих сигналах ті чи інші властивості і особливості, які непомітні на графіках сигналів, особливо в присутності сильних шумів. Більш того, вейвлет може конструюватися безпосередньо під ту локальну особливість в сигналі, яка підлягає виділенню або виявленню, якщо її форма відома.

Серед основних привілеїв вейвлетних перетворень слід зазначити наступні:

- містять в собі усі привілеї перетворень Фур'є.
- на відміну від перетворення Фур'є, мають багато різноманітних базових функцій, властивості яких орієнтовані на вирішення різних завдань.
- при виділенні в сигналах добре локалізованих різномасштабних процесів можна розглядати тільки ті масштабні рівні розкладання, які представляють інтерес.

Недоліком вейвлетних перетворень є їх відносна складність, проте наразі цей недолік компенсується розвитком комп'ютерного програмного забезпечення[22].

2.3.2. Принципи аналізу даних за допомогою фрактального методу.

Аналіз фрактальних та мультифрактальних властивостей часових рядів моніторингу є одним з перспективних напрямків аналізу даних у різних технологічних процесах[44]. Це обумовлено здатністю фрактального аналізу досліджувати сигнали, які з точки зору коваріаційної та спектральної теорії є не більш ніж білим шумом або броунівським рухом. Однією з перших робіт по аналізу фрактальних властивостей часових рядів є роботи американського гідролога Херста по дослідженню середньорічного режиму розходу води у річках[53]. Емпіричний закон Херста полягає у виконанні співвідношення: $R(\tau)/\sigma(\tau) \sim \tau^H$, де $R(\tau)$ – різниця між максимальними та мінімальними значеннями приросту величини, яка спостерігається, на часовому інтервалі

довжиною τ , $\sigma(\tau)$ – стандартне відхилення, $0 < H < 1$ – постійна, значення якої для більшості метеорологічних і гідрологічних спостережень лежить в площині 0,7. Для самоподібного процесу $x(t)$ середнє значення квадрату приросту $M\{|x(t+\delta t)-x(t)|^2\} \sim |\delta t|^{2H}$, а залежність спектру потужності від частоти носить ступеневий характер $S_{xx}(\omega) \sim \omega^{-(2H+1)}$, $\omega \rightarrow 0$.

Подальше узагальнення цієї моделі полягає у припущенні залежності постійної Херста від часу, тобто у розгляді такого випадкового процесу, для якого $M\{|x(t+\delta t)-x(t)|^2\} \sim |\delta t|^{2H(t)}$, $0 < H(t) < 1$. Це узагальнення було запропоновано Мандельбротом [55] та має назву мультифрактальний броунівський рух, який описується щільністю розподілення ймовірності тих чи інших значень $H(t)$ – так званий мультифрактальний спектр сингулярності. Спектр сингулярності являє собою інформативну статистику, що характеризує режим хаотичних флуктуацій досліджуваної величини[49].

Основна ідея фрактальної теорії полягає в тому, що об'єкт, в точності або приблизно, збігається з частиною себе самого, тобто ціле завжди зберігає ту ж форму, в будь-який з його частин. Ця характеристика називається самоподібністю.

Будь-яку поверхню об'єкта можна розглядати як поверхню, що складається з певних текстур, так, і кожне зображення складається з поверхонь, які містять кілька областей текстури. Текстури зображення можуть бути описані за допомогою фрактальної моделі. Зміна особливості текстури може містити інформацію про межі зображення, і таким чином, фрактальну теорію можна використовувати для виявлення меж об'єктів.

Площа фрактальної поверхні двовимірного зображення може бути визначена як

$$A(\varepsilon, i, j) = K(i, j) \varepsilon^{2-D} \quad (2.6)$$

де $\varepsilon = 1, 2, 3, \dots$, - масштабний коефіцієнт, $A(\varepsilon, i, j)$ - площа фрактальної поверхні в масштабі ε , D - фрактальна розмірність, $K(i, j)$ - фрактальні коефіцієнти.

Обчислити фрактальну розмірність двовимірного зображення можна на основі методу «ковдри».

Виявляємо дві фрактальні поверхні, які можуть повністю покривати поверхню зображення. Відстань міжфрактальною поверхнею і поверхнею зображення буде ϵ . визначимо верхню поверхню "ковдри" як u_ϵ , а нижню поверхню "ковдри" позначимо як b_ϵ .

Початкова фрактальна поверхня $u_0(i, j)$ та $b_0(i, j)$ збігаються з поверхнею зображення $g(i, j)$. При зміні $\epsilon = 1, 2, 3, \dots$, значення u_ϵ і b_ϵ можуть бути обчислені з виразів,

$$u_0(i, j) = b_0(i, j) = g(i, j),$$

$$u_\epsilon(i, j) = \max \{u_{\epsilon-1}(i, j) + 1, \max_{|(m, n) - (i, j)| \leq 1} u_{\epsilon-1}(m, n)\}$$

$$b_\epsilon(i, j) = \min \{b_{\epsilon-1}(i, j) - 1, \min_{|(m, n) - (i, j)| \leq 1} b_{\epsilon-1}(m, n)\}, \dots \dots \dots (2.7)$$

де $|(m, n) - (i, j)| \leq 1$ відстань між точками. Вираз (2.7) визначає нульовий фрактальний масштаб.

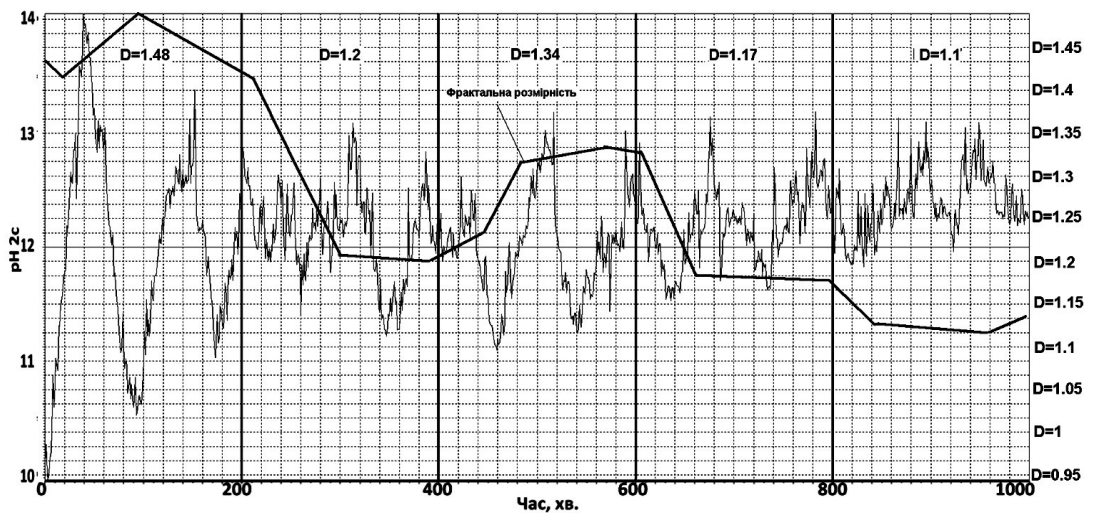


Рис. 2.15. Фрактальна розмірність для ряду величини рН II-ї сатурації

Виявлення меж за допомогою фрактальних коефіцієнтів. Таким чином, обсяг області, що покривається "ковдрою" в масштабі ϵ , можна оцінити за допомогою виразу,

$$V_\epsilon(i, j) = \sum_{(i, j) \in R} \{u_\epsilon(i, j) - b_\epsilon(i, j)\} \quad (2.8)$$

де R є областю прямокутника з центром в точці (i, j) в початковому зображенні. Чим більше діапазон RR , тим буде вище точність розрахункових фрактальних коефіцієнтів, але при цьому різко зростає обчислювальний об'єм. В роботі дисертації була обрана прямокутна область $R = 3 \times 3$, при цьому площа поверхні може бути представлена як,

$$A(\varepsilon, i, j) = \frac{V_{\varepsilon}(i, j)}{2\varepsilon} \quad (2.9)$$

Прологарифмуємо рівняння і обчислимо фрактальні коефіцієнти для $\varepsilon = 1, 2, \dots, 10$,

$$\log(A(\varepsilon, i, j)) = (2 - D) \log \varepsilon + \log K(i, j) \quad (2.10)$$

Наближаючись до лінії методом найменших квадратів, обчислюємо фрактальний коефіцієнт $K(i, j)$ для кожної точки зображення і встановимо поріг, нижче якого всі фрактальні показники дорівнюватимуть нулю.

Розподіл над ділянкою можуть бути отримані шляхом великих значень фрактальних коефіцієнтів K (рис.2.16).

Середньоквадратичні помилки між отриманими і фактичними кордонами з використанням фрактального методу складають $6,87 \times 10^3$. Таким чином, фрактальний метод менш схильний до впливу шуму і визначає межі зображення з необхідною точністю, яка пропорційна обсягу обчислень.

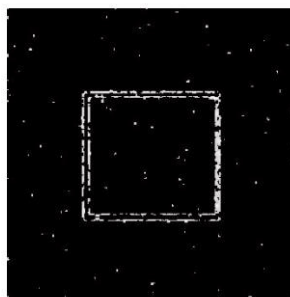


Рис. 2.16. Межа, визначена фрактальним методом.

Останнім часом був розроблений й активно використовується у різних додатках метод аналізу флуктуацій після виключення масштабно-залежних трендів – DetrendedFluctuationAnalysis (DFA) [54]. Порівняльний досвід використання методів показує, що метод DFA є більш надійним та стійким. В той же час для спеціального виду само подібних сигналів, які можуть містити

плато постійних значень (типу відомих «чортових сходів», зконструйованої на базі канторовської множини), метод DFA не застосовується й оцінка, що базується на неперервних вейвлет-перетвореннях, має переваги. Основні конструкції методу DFA.

Нехай $x(t)$ – випадковий процес. Визначимо в якості міри $\mu_x(t, \delta)$ поведінка сигналу $x(t)$ на інтервалі $[t, t+\delta]$ модуль його приросту: $\mu_x(t, \delta) = |x(t+\delta) - x(t)|$ та обчислимо середнє значення модуля таких мір в степені q :

$$M(\delta, q) = M\{(\mu_x(t, \delta))^q\} \quad (2.11)$$

Випадковий процес має назву масштабно-інваріантний, якщо $M(\delta, q) \sim |\delta|^{\rho(q)}$ при $\delta \rightarrow 0$, тобто є існуюча межа:

$$\rho(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln M(\delta, q)}{\ln |\delta|} \quad (2.12)$$

Зауважимо, що у визначенні (2.11-2.12) величина міри $\mu_x(t, \delta)$ може бути визначена також як розмах, що ближче до традиційних конструкцій Херста:

$$\mu_x(t, \delta) = \max_{t \leq u \leq t+\delta} x(u) - \min_{t \leq u \leq t+\delta} x(u) \quad (2.13)$$

Якщо залежність $\rho(q)$ є лінійною: $\rho(q) = Hq$, де $H = \text{const}$, $0 < H < 1$, то процес має назву монофрактальний. Зокрема, для класичного броунівського руху $H = 0,5$. Зведення в ступінь q підкреслює різні типи поведінки сигналу: якщо $q > 0$, то у визначення міри (2.11) основний внесок вносять інтервали часу з більшими відхиленнями від тренду, а якщо $q < 0$, то інтервали часу з малими варіаціями.

Для вираховування функції $\rho(q)$ [54] за кінцевою виборкою з часового ряду $x(t)$, $t = 1, \dots, N$ можна застосувати метод DFA. Нехай s – число відліків, асоційоване з варійованим масштабом δ_s : $\delta_s = s \Delta t$. Розіб'ємо виборку на малі інтервали, що не перетинаються, довжиною s відліків:

$$I_k^{(s)} = \{t: 1 + (k-1)s \leq t \leq ks, k = 1, \dots, [N/s]\} \dots \dots \dots (2.14)$$

й нехай

$$y_k^{(s)}(t) = x((k-1)s + t), t = 1, \dots, s \dots \dots \dots (2.15)$$

ділянка часового ряду $x(t)$, що відповідає інтервалу $I_k^{(s)}$. Нехай $p_k^{(s,m)}(t)$ – поліном порядку m , підігнаним методом найменших квадратів до сигналу $y_k^{(s)}(t)$. Розглянемо відхилення від локального тренду:

$$\Delta y_k^{(s,m)}(t) = y_k^{(s)}(t) - p_k^{(s,m)}(t), \quad t = 1, \dots, s \quad (2.16)$$

й обчислимо значення:

$$Z^{(m)}(q, s) = \left(\sum_{k=1}^{[N/s]} (\max_{1 \leq t \leq s} \Delta y_k^{(s,m)}(t) - \min_{1 \leq t \leq s} \Delta y_k^{(s,m)}(t)) / [N/s] \right)^{1/q}$$

(2.17)

яке будемо розглядати як оцінку для $(M(\delta_s, q))^{1/q}$. Процедура усунення тренду на кожній малій ділянці довжиною s відліків необхідна у випадку наявності у сигналі трендів зовнішнього походження (сезонного, припливних тощо). Визначимо тепер функцію $h(q)$ як коефіцієнт лінійної регресії між значеннями $\ln(Z^{(m)}(q, s))$ та $\ln(s): Z^{(m)}(q, s) \sim s^{h(q)}$. Вочевидь, що $\rho(q) = qh(q)$, а для монофрактального процесу $h(q) = H = const$.

Наступним кроком в мультифрактальному аналізі після визначення функції $\rho(q)$ є розрахунок спектру сингулярності $F(\alpha)$, який є з фрактальної розмірності множини точок, в площині яких показник Гельдера-Ліпшиця для випадкових реалізацій процесу $x(t)$ дорівнює α , тобто таких точок t , для яких $|x(t+\delta) - x(t)| \sim |\delta|^\alpha, \delta \rightarrow 0$.

Стандартний підхід полягає у вирахуванні статистичної суми Гібса:

$$W(q, s) = \sum_{k=1}^{[N/s]} (\max_{1 \leq t \leq s} \Delta y_k^{(s,m)}(t) - \min_{1 \leq t \leq s} \Delta y_k^{(s,m)}(t))^q$$

(2.18)

та визначення показника маси $\tau(q)$ з умови $W(q, s) \sim s^{\tau(q)}$, після чого спектр $F(\alpha)$ вираховується відповідно формулі:

$$F(\alpha) = \max_q \{\min(\alpha q - \tau(q), 0)\}$$

(2.19)

Порівнюючи (2.17) та (2.18), можна зазначити, що $\tau(q)=\rho(q) - 1 = qh(q) - 1$. Таким чином, $F(\alpha) = \max\{\min_q(q(\alpha - h(q))) = 1, 0\}$

Для монофрактального процесу, коли $h(q)=H=const$, отримуємо, що $F(H)=1$ та $F(\alpha)=0 \quad \forall \alpha \neq H$. Зокрема, положення та ширина носія спектру $F(\alpha)$, тобто значення α_{min} , α_{max} , $\Delta\alpha = \alpha_{max} - \alpha_{min}$ та α^* - те значення, яке доставляє функції $F(\alpha)$ максимум:

$$F(\alpha^*) = \max_{\alpha} F(\alpha),$$

Є характеристиками шуму. Величину α^* можна назвати узагальненим показником Херста. Для монофрактального сигналу значення $\Delta\alpha$ повинно бути рівним нулю, а $\alpha^*=H$. Стосовно значення $F(\alpha^*)$ - воно дорівнює фрактальній розмірності точок, для площини яких виконується масштабує співвідношення $M(\delta, q) \sim |\delta|^{\rho(q)}$.

Якщо оцінювати спектр $F(\alpha)$ у кожному тимчасовому вікні, то його еволюція може дати інформацію про зміни структури хаотичних пульсацій ряду. Зазвичай $F(\alpha^*)=1$, проте зустрічаються вікна, для яких $F(\alpha^*) < 1$. У загальному випадку (не тільки для аналізу часових рядів) величина $F(\alpha^*)$ дорівнює фрактальній розмірності носія мультифрактальної міри.

Перехід від похідних часових рядів до характеристик їх мультифрактальних спектрів сингулярності є важливою попередньою обробкою даних, яка вивільнює їх від специфіки, пов'язаної з різною фізичною природою, розмірністю, масштабом вимірів та, одночасно, виокремлюючи загальні властивості статистичних флуктуацій.

Слід зазначити, що часто інтерес являють лише варіації показника Херста. Нехай $x(t)$, $t=1, \dots, N$ - часовий ряд, що аналізується; $L < N$ - довжина ковзного тимчасового вікна; τ - номер відліку правого кінця ковзного вікна, тобто розглядаємо моменти часу t , які відповідають умові $\tau-L+1 \leq t \leq \tau$. Нехай s - довжина внутрішнього часового вікна, яке використовується всередині поточного основного вікна для операцій усереднення. Розглядаємо довжину внутрішніх вікон, що задовольняє умові: $s \leq L/5$. Нехай

$$\bar{x}_{s,u}^{(\tau)} = \frac{1}{s} \sum_{t=1}^s x(u+t-1)$$

(2.20)

- вибіркова оцінка середнього значення на інтервалі довжиною s відліків, якій лежить всередині поточного основного вікна та починається в точці u . Наступний шаг полягає в обчисленні відхилень від середнього значення (2.20), їх накопиченої суми та розмаху накопиченої суми:

$$\Delta x_{s,u}^{(\tau)}(t) = x(t) - \bar{x}_{s,u}^{(\tau)}, \quad \xi_{s,u}^{(\tau)}(t) = \sum_{v=1}^t \Delta x_{s,u}^{(\tau)}(v),$$

$$R_{s,u}^{(\tau)} = \max_t \xi_{s,u}^{(\tau)}(t) - \min_t \xi_{s,u}^{(\tau)}(t)$$

(2.21)

для $t \in [u, u+s-1]$, $u \in [\tau-L+1, \tau-s+1]$. Далі оцінюються дисперсія та середнє значення відношення розмаху до стандартного відхилення:

$$(\sigma_{s,u}^{(\tau)})^2 = \frac{1}{s} \sum_{t=1}^s (\Delta x_{s,u}^{(\tau)}(t))^2, \quad RS^{(\tau)}(s) = \frac{1}{(L-s+1)} \sum_{u=\tau-L+1}^{\tau-s+1} \frac{R_{s,u}^{(\tau)}}{\sigma_{s,u}^{(\tau)}}$$

(2.22)

Показник Херста $H(\tau)$ в поточному часовому вікні оцінюється як нахил кривої прямої лінійної регресії між значеннями $\ln(RS^{(\tau)}(s))$ та $\ln(s)$. Цей спосіб формально більш простий ніж метод DFA та потребує меншої довжини вікон, однак він схильний до наявності в сигналі низькочастотних трендів, які зміщують оцінку показника Херста.

2.3.3. Рекурентний метод та його особливості.

В останні десятиріччя набір традиційних (лінійних) методів дослідження часових рядів був суттєво доповнений нелінійними методами, які були отримані з теорії нелінійної динаміки і хаосу; багато досліджень були присвячені оцінці нелінійних характеристик та властивостей природних та штучних систем. Однак більшість методів нелінійного аналізу потребують або

достатньо довгих, або стаціонарних рядів даних, які далеко не завжди можливо отримати на практиці при дослідженні реальних систем.

Позбавленим вказаних недоліків та одним з найбільш цікавих сучасних методів є рекурентні діаграми, які отримали в останнє десятиріччя широкий теоретичний розвиток та практичне визнання.

Рекурентний метод аналізу базується на фундаментальній властивості дисипативних динамічних систем - рекурентності (повторюваності станів). Даний метод аналізу, заснований на поданні властивостей процесів у вигляді геометричних структур, є інструментом для виявлення прихованих залежностей в спостережуваних часових рядах. Методи рекурентного аналізу дозволяють працювати з рядами різних типів. Крім того, перевага використовуваного графічного інструменту полягає в тому, що він дозволяє досліджувати n -мірну траєкторію фазового простору за допомогою двовимірного представлення його рекурентності і, отже, наочно представляти динамічну картину в цілому

Динамічна система характеризується станом системи в деякий момент часу та її динамікою (правила, що описують еволюцію системи в часі). Еволюцію можливо спостерігати в фазовому просторі – абстрактному просторі, в якому координатами слугують компоненти стану. При цьому координати вибираються в залежності від контексту. У випадку механічної системи це може бути й положення й швидкість, у випадку, наприклад, екологічної моделі – популяції різних біологічних видів.

Як відомо, стан системи описується параметрами стану:

$$x^1(t), x^2(t), \dots, x^d(t), \quad (2.23)$$

де верхні індекси вказують на нумерацію компонент. Набір параметрів стану в момент t формує вектор $x(t)$ у d -мірному просторі, який має назву фазовим. Цей вектор змінюється у часі та на пряму:

$$\dot{x}(t) = dx(t)/dt = F(x), \quad (2.24)$$

а часовий хід векторів фазового простору визначає так звану фазову траєкторію, причому поле швидкостей $F(t)$ буде дотичним до цієї траєкторії. Для автономних систем така траєкторія є самонеперетинаючою. Подібна

графічна реалізація у часі дає безпосередню інформацію про динаміку системи, тобто вказує на атрактор системи. Знаючи $F(t)$, стан системи в даний момент часу може бути визначено інтегруванням системи рівнянь (2.24). Однак графічна візуалізація фазової траєкторії дозволяє визначити стан системи без інтегрування рівнянь, вказуючи, наприклад, на періодичну або хаотичну поведінку.

Маючи справу з реальним процесом і реальним його спостереженням приходиться мати справу тільки з одним спостереженням $u(t)$ або одним дискретним часовим рядом u_i , де $t=i\Delta t$ та Δt – мінімальних шаг за часом. Слід зауважити, що на практиці не завжди вдається провести виміри через рівні проміжки часу Δt . Це ускладнює аналіз отриманих часових рядів або взагалі робить неможливим використання цілих рядів стандартних методів аналізу, що потребують рівномірної часової шкали. Однак при цьому не покладаються суттєві обмеження на використання рекурентного аналізу, який можна використовувати також і для нестационарних рядів даних. Оскільки складні системи містять багато компонентів ті їх поведінка визначається більшим числом взаємодій, то навіть одна з цих компонент ті їх поведінка визначається більшим числом взаємодій. Таким чином, завдяки побудові фазової траєкторії (базуючись тільки на одному вимірі) можна відновити топологію повної фазової траєкторії, як якщо би ми використовували для цього усі компоненти системи. Такий підхід був вперше запропонований у 1980 році групою американських вчених[59], які показали, що можна отримати задовільну картину дивного атрактора невеликої розмірності, якщо замість змінних x , що входять у рівняння динамічної системи, використовувати m – мірні вектори, що отримують з елементів часового ряду. У тому ж році голландський математик Такенс доповів про свою відому теорему, що була опублікована роком пізніше. Ця теорема покладена в основу усіх алгоритмів аналізу часових рядів методами нелінійної динаміки, як спосіб реконструкції фазової траєкторії за методом відображення аргументів, що запізнюються:

$$x_i = (u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+(m-1)\tau})$$

де m – розмірність вкладення та τ – запізнення за часом (реальне запізнення за часом визначається як $\tau\Delta t$). Збереження топологічних структур вихідної траєкторії гарантовано, якщо $m \geq 2d+1$, де d – розмірність атрактора [60].

Існує цілий ряд методик по визначенню розмірності вкладення. Зокрема, у роботі Марвана використана методика по виявленню «помилкових» точок навколо фазової точки, як функцію розмірності вкладення. Оскільки зменшення величини розмірності вкладення призводить до збільшення числа «помилкових» точок, то необхідно визначати розмірність вкладення так, щоб число «помилкових» точок прагнуло до нуля. Інші методи використовують відношення відстаней між прилягаючими точками при різних величинах розмірності вкладення. Існують й інші методи визначення розмірностей атракторів, наприклад, кореляційні суми, методи по визначенню величини запізнення, такі як визначення автокореляційної функції або взаємної інформації, а також методі сингулярного розкладення або аналізу незалежних компонент.

На порозі XXI сторіччя був запропонований метод визначення розмірностей вкладення вже з використанням рекурентних діаграм (РД) [56, 61].

У 1880-х роках Анрі Пуанкаре був отриманий ряд важних результатів, які в подальшому склали основу сучасної теорії динамічних систем. Зокрема, їм була відмічена складність поведінки системи навколо так званої гомоклінічної траєкторії, (траєкторія прагне до деякої нерухомої точки або періодичної траєкторії як при $t \rightarrow \infty$, так і при $t \rightarrow -\infty$) [33], що у 1980 році було опубліковано, як «теорема рекурентності» [57].

Дана теорема лежить в основі сучасного вчення про перетворення, які зберігають міру, відому як ергодична теорія. При її доказуванні Пуанкаре передбачив як поняття міри так і поняття категорії.

Розглянемо обмежену відкриту область X в n – вимірному просторі з гомеоморфізмом T для X на себе, зберігаючим об'єм, тобто для будь-якої відкритої множини $G \subset X$ вводиться припущення рівності об'ємів G та $T(G)$.

При багаторазовому використанні T будь-яка точка x породжує послідовність $x, Tx, T^2x, \dots, T^i(x), \dots$, що має назву позитивної напіворбіти x . Коли $x \in G$ для нескінченної множини цілих позитивних значень i , то говорять про точку x , що повертається, відкритої множини G .

Теорема Пуанкаре говорить, що для будь-якої відкритої множини $G \subset X$ точками, що повертаються відносно G , є всі точки G , окрім деякої множини першої категорії міри нуль.

Отже, рекурентність станів в тому розумінні, що вони (стани) є такими, що повторюються через деякий час, є фундаментальна властивість дисипативних динамічних систем.

Формально має місце теорема [57]. Нехай T – перетворення простору, що зберігає міру, з кінцевою мірою (X, μ) та нехай $A \subset X$ – множина, що вимірюється. Тоді для будь-якого натурального $N \in \mathbb{N}$

$$A(\{x \in A : \{T^n(x)\}_{n \geq N} \subset (X \setminus A)\}) = 0 \quad (2.25)$$

де T – рекурентний час; X – довільна вимірنا множина; $\mu(\cdot)$ – ймовірнісна міра; x – параметр нормалізованого ряду; \mathbb{N} – множинність натуральних чисел.

Замінімо T на T^n в формулі (2.25) і в достатності виразу при $N=1$.

Множина

$$\tilde{A} := \{x \in A \mid \{T^n(x)\}_{n \in \mathbb{N}} \subset (X \setminus A)\} = A \cap (\bigcap_{n=1}^{\infty} T^{-n}(X \setminus A))$$
 є вимірною.

Запишемо

$$T^{-n}(\tilde{A}) \cap \tilde{A} = \emptyset$$

Для всіх n , так як протилежність $T^{-n}(\tilde{A}) = B$ з $B \neq \emptyset$, маючи на увазі $T^n(B) \subset A$

Це несумісне з визначенням \tilde{A} , так як $B \subset \tilde{A}$.

До того ж

$$T^{-n}(\tilde{A}) \cap T^m(\tilde{A}) = \emptyset, \quad m, n \in \mathbb{N},$$

Так як приймається $T^{-n}(\tilde{A}) \cap T^{-m}(\tilde{A}) = B$ з $B \neq \emptyset$, ураховуючи, що $T^n(B) \subset \tilde{A}$ та $T^m(B) \subset \tilde{A}$.

Не втрачаючи загальності, приймається $m > n$. Тоді $T^n(B) = C \subset \tilde{A}$ та $T^m(B) = T^{m-n}(T^n(B)) = T^{m-n}(C) \subset \tilde{A}$, яке з іншого боку суперечить визначенню \tilde{A} .

Крім того, $\mu(T^{-n}(\tilde{A})) = \mu(\tilde{A}) \subset T$, зберігаючим μ . Таким чином, $\mu(\tilde{A}) = 0$, так як

$$I = \mu(X) \geq \mu\left(\bigcup_{n=0}^{\infty} T^{-n}(\tilde{A})\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \mu(T^{-n}(\tilde{A})) = \sum_{n=0}^{\infty} \mu(\tilde{A})$$

Таким чином, маємо зберігаючу міру перетворення, де траєкторія при відомих обставинах прагне повернутися в режим достатньо близький до попереднього або проходить через схожі ступені розвитку.

Подальший розвиток теорії, зберігаючих міру перетворень, призвело до суттєвого поліпшення теореми Пуанкаре. Наприклад, ергодична система Дж. Д. Биркгофа стверджує, що при зберігаючих міру відображеннях множини кінцевої міри на себе, майже всі точки будь-якої вимірної множини не тільки повертаються в дану множину нескінченно багато разів, але це відбувається з частотою, що прагне до визначеної позитивної межі.

Однак можливості такого аналізу дуже обмежені, так як часто системи володіють багатомірними фазовими траєкторіями, що робить можливим відображати тільки проекції таких траєкторій в двох або трьохмірних просторах.

Діагностичний інструмент, розроблений у 1987 році Екманом, Камхорстом та Рюелем, так звані РД (RecurrentPlots–RP), дозволяє працювати практично з будь-якими рядами [51]. Крім того, перевага графічного інструменту полягає в тому, що він дозволяє досліджувати m -розмірну траєкторію фазового простору за допомогою двомірного уявлення його рекурентності та, відповідно, бачити динамічну картину в цілому.

Нехай точка $x(i)$ відповідає i -й точці фазової траєкторії, що описує вибрану динамічну систему в m -мірному просторі, для $i = 1, \dots, N$, тоді

рекурентний графік є масив точок $N \times N$, де нульовий елемент з координатами (i, j) відповідає випадку, коли $x(j)$ достатньо близький до $x(i)$.

Іншими словами, сучасною мовою можна дати наступне визначення[58]:

- Рекурентність стану в момент i при різних значеннях часу j відтворюється всередині двомірної квадратної матриці з чорними та білими точками, де чорні точки позначають наявність рекурентності, а на обох осях відкладається час. Таке уявлення має назву рекурентної діаграми. Математично це може бути виражено наступним чином:

$$R_{i,j} = \theta (\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|), \quad x_i \in R^m, i, j = 1, \dots, N, (2.26)$$

де N – число станів x_i , що розглядаються, ε_i – гранична відстань або відстань до центру обраної площі (точка $x(i)$) до її межі, $\|\cdot\|$ – норма, та $\theta(\cdot)$ – функція Хевисайда.

Згідно визначенню основна діагональ $R_{i,j} = 1$ ($i = 1, \dots, N$) (під кутом $\pi/4$) повністю складається з чорних точок та має назву лінія тотожності. Слід підкреслити, що окремі рекурентні точки (i, j) не несуть жодної інформації о поточних станах в моменти i та j , однак у сукупності дозволяють реконструювати властивості процесу.

На практиці марно, та й неможливо, виявити абсолютно рекурентні стани в тому сенсі, що $x_i \equiv x_j$. Внаслідок цієї причини стан x_i рекурентний стану x_j , якщо вони виявляються достатньо близькими один одного. Це означає, що вектори x_j , що потрапили в m – мірну площину (наприклад, шар у L_2 – нормі або квадрат у L_∞ - нормі) радіусу ε_i з центром на значенні x_i , є рекурентними, а такі x_j мають назву рекурентних точок.

Ще в першій роботі, присвяченій РД [51], було відмічено, що при визначенні площини в формі шару фіксованого радіусу, РД будуть демонструвати симетричні структури відносно головної діагоналі, оскільки, якщо x_i близько до x_j , то вірно й зворотнє: x_j близько до x_i . Однак картина ускладниться, якщо не накладається умова на рівність радіусів i -ої та j -ої

площин. Іншими словами, математично це можна пояснити наступним чином [58].

При визначенні площини у формі шару з таким радіусом, що він охоплює суворо фіксовану кількість станів x_j . Іншими словами ε_i обирається для кожного $x_i (i = 1, \dots, N)$ окремо. $R_{i,j} \neq R_{j,i}$, оскільки площина, визначена для x_i необов'язково співпадає з площиною для x_j . Це й призводить до асиметрії РД, однак всі його колонки (колонки масиву) мають однакову щільність рекурентності.

Отже, використовуючи такий критерій як ε_i можна легко визначити щільність рекурентності в тому сенсі, що, обравши $\varepsilon = 0,15$, локально визначений радіус ε_i вводиться таким чином, що площина, яка йому відповідає, покриває 15% усіх векторів фазового простору. Таким чином, щільність рекурентності дорівнює 0.15. Такий підхід має назву як фіксування числа найближчих точок (ФНТ), (fixed amount of nearest neighbors – FAN), тобто, обумовлений фіксованою кількістю векторів фазового простору, що потрапляють у вибрану площину. Таким чином є два підходи до визначення площини:

- $\varepsilon_i = \varepsilon, \forall_i, R_{i,j} = R_{j,i}$
- $\varepsilon_i \neq \varepsilon, R_{i,j} \neq R_{j,i}$

Той чи інший тип площини вибирається дослідником в залежності від його переваг або якоїсь специфіки прикладного використання РД.

Наступним кроком в побудові РД є вибір норми, найбільш відомими серед яких є L_1 - норма, L_2 – норма (Євклидова норма) та L_∞ - норма (Максимальна норма). У залежності від норми будуть розрізнятися й форми площини (рис.2.17).

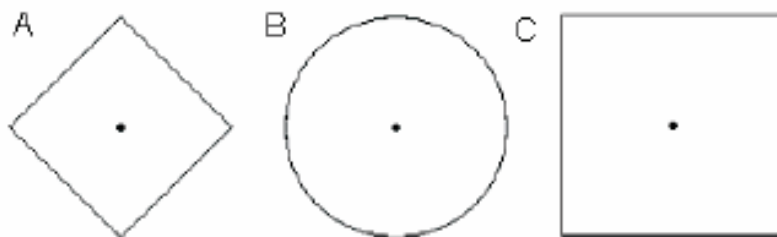


Рис. 2.17. Типи норм. А - L_1 , В - L_2 , С - L_∞

При побудові РД з фіксованим значенням ε , у площину з L_∞ - нормою може потрапити найбільша кількість довколишніх векторів фазового простору у порівнянні з L_1 та L_2 – нормами, а при виборі L_2 – норми навпаки – найменша. Переваги у виборі норми залежать від мети, яку переслідує дослідник у своїй праці. Зокрема, L_∞ - норма не залежить від розмірності фазового простору та легка у вирахуванні, у порівнянні з двома іншими, тому особливо підходить для теоретичного дослідження самого інструменту РД [58]. L_1 - норма забезпечує найбільш стійку рекурентність станів, тому що якщо вектори фазового простору рекурентні для L_1 - норми, то вони будуть рекурентні й при використанні двох інших норм [62].

Слід зупинити увагу й на виборі значення порогової величини ε . Безумовно, бажано підібрати найбільш маленьке з можливих значень. Однак на практиці, в умовах присутності шумової компоненти, приходиться дещо збільшувати порогову величину. У випадку, коли $\varepsilon_i = \varepsilon$, \forall_i , рекомендується обирати порогове значення не більш 10% від значення максимального діаметру фазового простору – σ , якщо ж $\varepsilon_i \neq \varepsilon$, порогове значення розраховується по відношенню до щільності рекурентності [58, 61]. У випадку використання нестационарних даних величина ε може зменшуватися до 1 %.

Графічний інструмент КРД (крос-рекурентних діаграм, Cross Recurrent Plot – CRP) дозволяє проводити аналіз вже для двох часових рядів. Вперше узагальнення РД на їх двомірний аналог був зроблений Збилутом у 1998 році та незалежно від нього Марваном [58].

Вочевидь, оскільки ми розглядаємо два ряди, то не можемо говорити про рекурентність їх станів відносно один одного, а лише від кон'юнкції (збігом за часом) станів обох сторін, тим не менше, термін «крос-рекурентна діаграма» використовується в даному випадку для зручності та наочності з РД.

Отже, нехай є одна траєкторія x_i довжини N_x та друга - y_i довжини N_y , тоді математично КРД визначається наступним чином:

$$CR_{i,j}^{m,\varepsilon_i} = \theta (\varepsilon_i - \|x_i - y_j\|), x_i, y_i \in R^m, i = 1, \dots, N_x, j = 1, \dots, N_y \quad (2.27)$$

Система визначень аналогічна тій, що використовувалася при визначенні РД. Якщо стан першої системи в момент i наближається до стану другої системи в момент j , тоді на КРД з координатами (i, j) з'являється точка. Оскільки не визначаються вимоги щодо рівності довжини векторів x та y , тоді й масив КРД не повинен бути квадратним.

Обидві траєкторії, які представлені КРД, повинні відображати одну й ту ж саму динамічну систему при однакових параметрах станів, оскільки аналіз відбувається в одному й тому ж фазовому просторі. Це особливо важливо, якщо часові ряди відносяться до різних серій вимірів (наприклад, температурний часовий ряд та дані щодо вимірів тиску). Використання інструменту КРД для повністю сторонніх один одному станів (наприклад баржеві індекси та коди молекулярної біології) не мають фізичного змісту.

У випадку різномасштабних амплітуд траєкторій, що аналізуються, та , якщо порогове значення ε фіксовано, виникає проблема зведення цих фазових траєкторій до одного розряду величин, наприклад завдяки нормалізації за стандартним відхиленням. Однак використання методу при якому фіксується кількість векторів фазового простору x_j , що потрапляють у площину вектору x_i , вирішує цю проблему автоматично, й необхідність модифікування ряду даних відпадає. Такий підхід особливо добре застосовувати при аналізі траєкторій, що повільно змінюються (наприклад, адіабатичний дрейф).

Оскільки величини $CR_{i,j}$ ($i=1 \dots N$), як правило не дорівнюють одиниці, лінія тотожності деформується, (для КРД вона має назву лінії синхронізації) та може не лежати під кутом $\pi/4$, проте, всі структурні одиниці та їх фізичне значення зберігаються. Так лінії, орієнтовані більш-менш діагонально, мають не меншу зацікавленість, чим у випадку з РД, а частота та довжина цих ліній, вочевидь, зв'язана з деякою подібністю між динамікою систем, що розглядаються. Довгі діагональні структури на полотні КРД виявляють аналогічні еволюції у часі обох фазових траєкторій в тому сенсі, що збільшення

схожості двох процесів, викликає зріст щільності рекурентних точок впродовж головної діагоналі $CR_{i,j}$ ($i=1 \dots N$). Таким чином, за скупченням рекурентних точок вздовж основної діагоналі або наявності інших діагональних ліній визначають схожість та синхронізованість процесів.

Спільні рекурентні діаграми (jointrecurrenceplot – JRP) призначені для спільного вивчення двох процесів $\{x_i^{d_x}\}_1^N$ та $\{y_i^{d_y}\}_1^N$ шляхом об'єднання РД кожного досліджуваного процесу:

$$JR_{i,j}^{\{x\},\{y\}} = \theta(\varepsilon^{\{x\}} - \|x_i - x_j\|) \cdot (\varepsilon^{\{y\}} - \|y_i - y_j\|), i, j = 1, \dots, N$$

Даний вираз може бути узагальненим для більшої кількості систем: більш того, вираз для РД є його окремим випадком. Коли точці траєкторії $\{x\}$ в деякий час i сусідствує інша точка цієї ж траєкторії в час j , та одночасно з цим точці траєкторії $\{y\}$ в деякий час i сусідить інша її точка в час j , на діаграмі з'являється рекурентна точка у відповідній позиції: $JR_{i,j} = 1$.

Розмірності d_x та d_y можуть не співпадати. Змінні стани обох систем можуть мати різну фізичну природу й не повинні бути синхронізовані між собою. Спільні рекурентні діаграми (СРД) інваріантні відносно перестановки координат.

Діаграма нев'язок. Спільні діаграми відображають тільки ті рекурентні точки, що породжуються всіма рядами, які приймають участь у побудові. Таким чином виявляється загальне у структурі рекурентності досліджуваних рядів. У завданнях пошуку синхронізації або налаштування моделей має місце застосування визначення невідповідності одного ряду іншому. Невідповідність рекурентної поведінки одного процесу рекурентній поведінці іншого процесу математично може бути записано наступним чином:

$$RR_{i,j} = (1 - \theta(\varepsilon^{\{x\}} - \|x_i - x_j\|)) \cdot \theta(\varepsilon^{\{y\}} - \|y_i - y_j\|), i, j = 1, \dots, N$$

Дана матриця має назву діаграма рекурентних нев'язок (recurrence residuals plot). Іншими словами, матриця RR відображує

невідповідність рекурентних структур траєкторії $\{y\}$ рекурентним структурам траєкторії $\{x\}$. LOI на діаграмі нев'язок завжди являє собою білу лінію, так як

$$\left(1 - R_{i=j}^{\{x\}}\right) \cdot R_{i=j}^{\{y\}} = 0 \text{ за визначенням.}$$

Найважливішою перевагою інструменту РД є здатність візуалізувати багатомірні фазові траєкторії, навіть у випадках коротких і нестационарних даних, а по виду геометричних структур можна прослідкувати еволюцію в часі обраного процесу.

Оскільки РД є графічним інструментом то можливо виявити ряд основних структур, які відповідають за той чи інший характер розвитку системи. Ще у своїй першій роботі по РД Екманом [51] були виділені два основні класи структур:

- топологія
- текстура

Топологія відповідає великомасштабним структурам на діаграмах та розподіляється на наступні підвиди:

1. Характеристичні часи (часи релаксації) маленькі по відношенню довжини ряду (тобто у порівнянні з інтервалом часу, що залучається до побудови РД). Приклад такої топології наведений на рис.2.18.

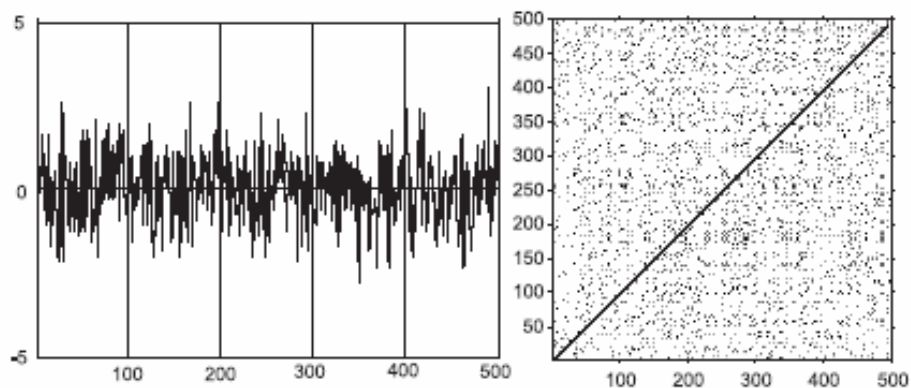


Рис. 2.18. Структура РД у випадку однорідної топології

2. Дрейф – характерний для динамічних систем, що не володіють однорідністю, проте тих, які містять параметри, що адіабатично (повільно) змінюються. На рекурентному графіку даний факт відмічається характерною

зміною яскравості зображення від нижнього правого та верхнього лівого кутів (рис. 2.19).

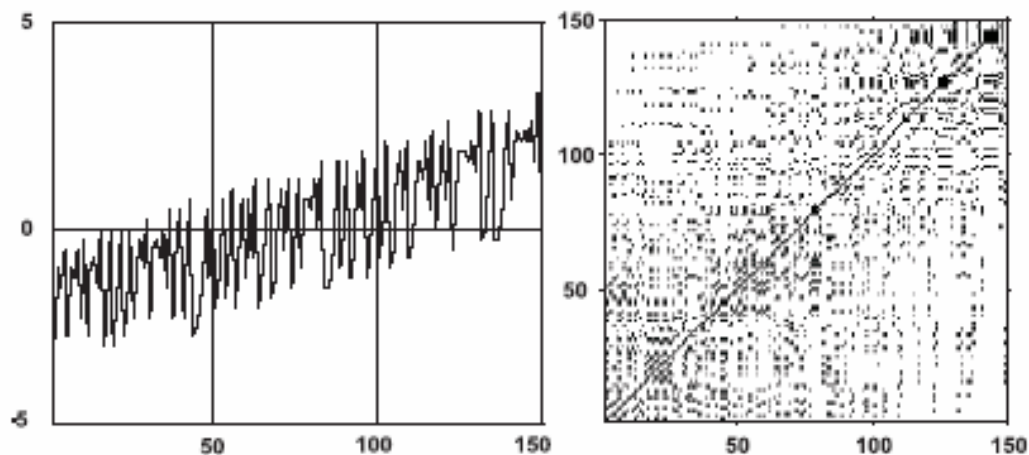


Рис. 2.19. Топологія дрейфу для логістичного відображення.

Осцилюючі системи на РД відображаються через діагонально орієнтовані, періодичні структури – діагональні лінії та структури, що нагадують шахову дошку, які для наочності виділені іншим кольором на наступній ілюстрації (рис.2.20)

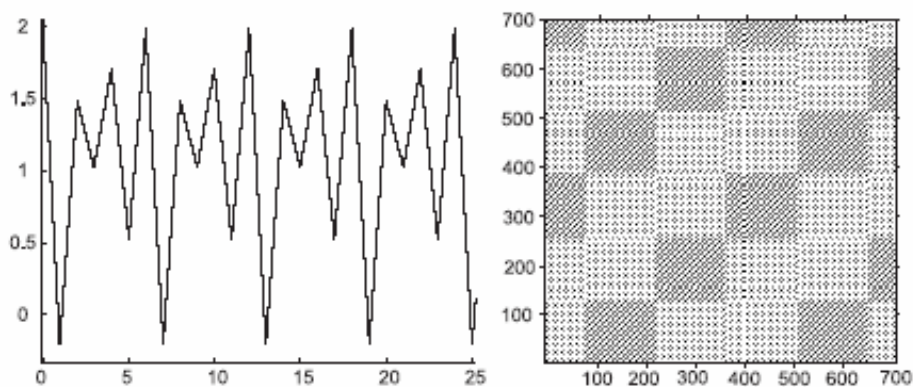


Рис. 2.20. Топологія рекурентності у випадку осцилюючої поведінки структури.

Дана структура отримана для відображення виду $X[n+1] = \alpha + X[n] - \alpha X^2[n]$, яке при $\alpha = 1,7289$ демонструє періодичність рівну шести, що можна виявити і на рекурентному графіку, крім того, часовий масштаб циклічних структур відповідає періоду процесу.

4. Контрастна топологія – характеризує різкі зміни динаміки процесу, не стаціонарність, внаслідок чого з’являються характерно виражені білі зони в структурі рекурентного графіку (рис. 2.21).

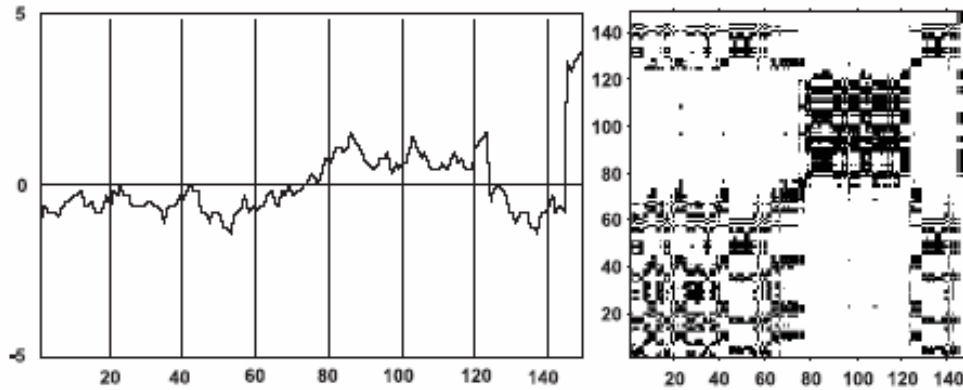


Рис. 2.21. Контрастна топологія розривного броунівського руху.

Базуючись на частоті рекурентності таких екстремальних та рідкісних подій, по діаграмі можна відстежити та оцінити їх.

Геометричні структури РД, що відносяться до класу текстур, характеризуються малими масштабами. До них відносяться:

1. Окремі точки в структурі РД характеризують «рідкісні стани», що нетривало існують в часі або якщо вони схильні до сильних флуктуацій. Якщо діаграма повністю складається з окремих точок, тоді процес є випадковим (рис. 2.18).

2. Діагональні лінії математично визначаються наступним чином:

$$R_{i+k, j+k} = 1, k = 1, \dots, l \quad (2.28)$$

де l – довжина діагональної лінії .

Така текстура відповідає ситуації, коли деяка частина фазової траєкторії пролягає паралельно іншій. Іншими словами, траєкторія, що розглядається, повторює саму себе, проходячи по одній і тій же області фазового простору у різні відрізки часу. Характер діагональної лінії визначає еволюцію процесу. Так її довжина відповідає часовому масштабу локальної близькості ділянок траєкторії, а нахил - часовому рознесенню, направленню послідовності станів даних ділянок часового ряду і характеризує внутрішній час даних під процесів.

Якщо діагональні лінії паралельні головній діагоналі, означає, що частини траєкторії паралельні одна одній даних частин траєкторій (рис. 2.20).

Якщо ж вони перпендикулярні головній діагоналі, то напрямлення їх розвитку протилежне (тобто один з під процесів якби відображається в дзеркалі). Однак нерегулярне проявлення діагональних ліній характеризує хаотичний процес (рис. 2.22)

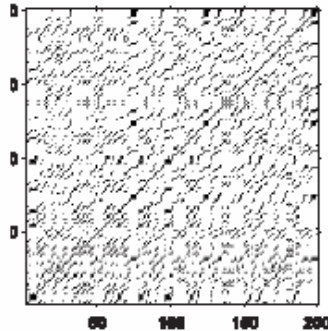


Рис. 2.22. Текстура рекурентності у випадку хаотичної поведінки системи.

3. Вертикальні (та горизонтальні) лінії та їх скупчення:

$$R_{i, j+k} = 1, k = 1, \dots, v \quad (2.29)$$

де v – довжина горизонтальної лінії.

- відповідають інтервалам часу, протягом яких стан системи не змінюється або змінюється незначно, система якби залишається замороженою на деякий час, іншими словами – ламінарність (рис. 2.23).

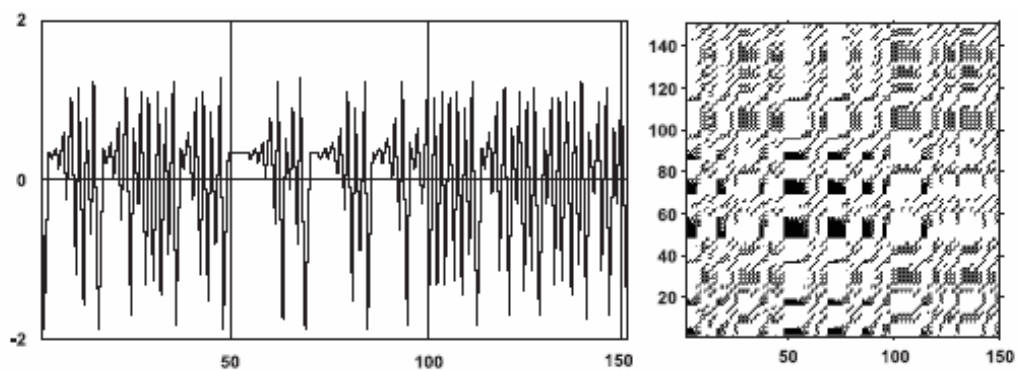


Рис. 2.23. Ламінарний характер поведінки системи.

Крім того, нерегулярна поява чорних зон, що відповідають скупченням вертикальних та горизонтальних ліній, а також білих зон, вказує на

нерегулярність процесу, який може означати, наприклад, корельованість шумів (рис. 2.21).

В загальному випадку лінійні структури РД являють собою локальний часовий зв'язок між поточними сегментами траєкторії.

Слід зазначити, що в реальних даних завжди присутній шум, інколи настільки сильний, що аналіз картини РД потребує певного досвіду та набуває вже відтінку мистецтва.

Для репрезентативного аналізу РД поряд з ідентифікацією топології і текстури проводиться й оцінка кількісних характеристик ознак поведінки (табл. 2.1) за такими показниками: міри рекурентності, детермінованості, середній час передбачуваності, дивергенції, замирання, ентропії та інші.

Показник	Часовий ряд 1	Часовий ряд 2	Часовий ряд 3
RR	0,199	0,096	0,125
DET	0,653	0,481	0,517
L	2,859	3,553	2,848
DIV	0,028	0,023	0,036
ENTR	1,361	1,473	1,264
RATIO	4,676	5,393	4,535
LAM	0,464	0,632	0,583
TT	4,130	2,734	3,786

Табл. 2.1 Кількісний аналіз рекурентних діаграм витрати дифузійного соку

Практична цінність рекурентних діаграм, що характеризують різні аспекти поведінки технологічного комплексу цукрового заводу, полягає в акумулюванні великої кількості інформації шляхом її візуалізації і дозволяє оцінити характерні особливості поведінки технологічних процесів.

Розглянемо підхід, який базується на аналізі РД за двома множинами ознак – основним та додатковим. До основних будемо відносити фрактальну (ляпунівську) розмірність Каплана-Йорке D_{KY} , ляпунівську розмірність L та кореляційну розмірність $C(\epsilon)$ [11].

До додаткових кількісних ознак слід віднести інструментарій вирахування мір складності структур РД, що використовують щільність рекурентних точок та діагональних структур [56].

Ряд досліджень показав, що ці міри можуть використовуватися для виявлення точок біфуркації та переходів хаос-порядок.

Пізніше були запропоновані міри, які використовують щільність вертикальних структур, що дозволили виявляти перехід хаос-хаос і нечутливі до стаціонарності та довжини досліджуваних рядів.

Для обчислення мір використовують РД побудовані з фіксованим значенням порогу ε .

Міра рекурентності (recurrence rate, RR)

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} \quad (2.30)$$

показує щільність рекурентних точок підраховуючи їх та включаючи LOI в межах

$$P_0 = \lim \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}$$

Дана міра показує ймовірність знаходження рекурентної точки в РД (ймовірність повторення стану).

Наступна міра розглядає діагональні лінії. Частотне розподілення довжини l діагональних ліній в $RPP^\varepsilon(l) = \{l_i; i=1 \dots N_l\}$, де N_l – абсолютна кількість діагональних ліній (кожна лінія рахується тільки один раз). Процеси зі стохастичною поведінкою можуть породжувати дуже короткі діагоналі або взагалі не породжувати їх, в той час як детерміністські процеси дають довгі діагоналі та малу кількість окремих рекурентних точок. Таким чином, відношення рекурентних точок

$$DET = \frac{\sum_{l=1}^N \min l P^\varepsilon(l)}{\sum_{i,j}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}} \quad (2.31)$$

має назву мірою детермінізму (determinism, DET) або передбачуваності системи. Слід відмітити, що ця міра не має значення реального детермінізму

процесу. Порогове значення l_{min} виключає діагональні лінії, утворені тангенціальним рухом траєкторії у фазовому просторі. При $l_{min} = 1$ $DET = RR$. Діагональні структури вказують час, протягом якого ділянка траєкторії підходить достатньо близько до іншої ділянки траєкторії. Таким чином, ці лінії дозволяють судити про розходження елементів траєкторії. Середня довжина діагональних ліній

$$L = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N l P^\varepsilon(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P^\varepsilon(l)} \quad (2.32)$$

- це середній час, протягом якого дві ділянки траєкторії проходять близько одна до одної та можуть розглядатися як середній час передбачуваності. В RQA, однак, використовується максимальна довжина діагональних структур або її інверсія – дивергенція (divergence, DIV):

$$L_{max} = \max(\{l_i; i = 1, \dots, N_l\}, \quad DIV = \frac{1}{L_{max}} \quad (2.33)$$

Встановлено, що довжина діагональних ліній співвідноситься з найбільшим позитивним показником Ляпунова, якщо він існує для системи, що розглядається. Різними авторами були запропоновані методи оцінки максимального позитивного показника Ляпунова з використанням довжини діагональних ліній.

Міра ентропії (entropy, ENTR) співвідноситься з ентропією Шенона (Shannon) частотного розподілення довжини діагональних ліній.

$$ENTR = - \sum_{l=l_{min}}^N p(l) \ln p(l), \quad \text{де } p(l) = \frac{P^\varepsilon(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P^\varepsilon(l)}$$

(2.34)

та відображає складність детерміністської складової в системі.

Тренд (trend, TREND) – міра, що являє собою лінійний коефіцієнт спадання особистої щільності рекурентних точок RR, діагоналей, паралельних до LOL, як функцію часу (відстані) між цими діагоналями та LOI

$$TREND = \frac{\sum_{i=1}^{\tilde{N}} (i - \frac{\tilde{N}}{2})(RR_i - \langle RR_i \rangle)}{\sum_{i=1}^{\tilde{N}} (i - \frac{\tilde{N}}{2})^2} \quad (2.35)$$

Тренд характеризує не стаціонарність процесу, особливо – дрейф. Вираз виключає межі RP ($\tilde{N} < N$). Вибір значення \tilde{N} залежить від процесу, що вивчається.

Розглянемо точку траєкторії x_i та множину асоційованих з нею рекурентних точок $R_i = \{x_j : R_{i,j} = 1; j \in [1 \dots N]\}$. Визначимо підмножину цих рекурентних точок

$$R_i = \{x_k \in R_i : (R_{i,k} \cdot R_{i,k+1}) + (R_{i,k} \cdot R_{i,k-1}) > 0; 1 \in [1 \dots N] : R_{j,0} = R_{i,N+1} = 0\}$$

яке містить рекурентні точки, що формують вертикальні лінії на RP в колонці j $\{x_j \notin s_i; x_{j+1}, \dots, x_{j+v} \in s_i; x_{j+v-1} \in s_i\}$. Позначимо $P_i(v) = \{v_k; k = 1, 2, \dots, K\}$ множину довжини присутніх в s_i підмножин, та з виразу $\bigcup_{i=1}^N P_i(v)$ визначаємо розподілення довжини вертикальних ліній $P^\varepsilon(v)$ для всього RP в цілому.

Міра завмирання (*laminarity, LAM*)

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{min}}^{\tilde{N}} v P^\varepsilon(v)}{\sum_{i,j}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}} \quad (2.36)$$

визначається відношенням кількості рекурентних точок, що формують вертикальні лінії, до загальної кількості рекурентних точок. LAM характеризує наявність станів завмирання системи (тобто коли рух систем по фазовій траєкторії зупиняється або рухається дуже повільно). Середня довжина вертикальних структур

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{min}}^{\tilde{N}} v P^\varepsilon(v)}{\sum_{i,j}^N P^\varepsilon(v)} \quad (2.37)$$

має назву *міра часу зупинки (trappingtime, TT)* та характеризує середній час, який система може провести у визначеному стані.

Міра максимальної довжини вертикальних структур

$$V_{max} = \max(\{v_k; k = 1 \dots K\}) \quad (2.38)$$

аналогічна мірі максимальної довжини діагональних структур.

При експлуатації систем автоматичного управління параметри об'єкта можуть бути відомі не точно, або вони можуть змінюватися з часом. Тому

визначення параметрів об'єкта в процесі роботи системи з метою налаштування параметрів регулятора для більш якісного функціонування об'єкта є актуальним завданням. Одним із шляхів вирішення даної задачі - це вплив на систему тестовим сигналом, оптимальним в деякому сенсі.

Розглянемо послідовність обробки сигналу рекурентним аналізом (рис.2.24). На вхід системи аналізу подається d_X -мірний часовий ряд $X_{N_X}^{d_X}$ довжиною N_X відліків. Якщо $d=1$ тоді попередньо може бути проведена реконструкція фазового простору (секція RPS). Потім проводиться побудова рекурентної діаграми та обчислення її мір. Отримані міри у сукупності з самою діаграмою формують характеристичний вектор (CV) часового ряду, який далі може бути використаний не тільки для виводу про характер процесу, але й збережений у базу даних для подальшого використання.

Аналогічно будується обробка двох сигналів з використанням крос-рекурентних діаграм. Тепер на вході системи аналізу є ще один d_Y -мірний часовий ряд $Y_{N_Y}^{d_Y}$ довжиною N_Y відліків. Якщо використовується реконструкція фазового простору обох рядів, тоді розмірність вкладення повинні співпадати ($m_X=m_Y$). Якщо реконструюється тільки один ряд, тоді його слід приводити до розмірності другого. Побудована крос-рекурентна діаграма та вирахування на її основі міри формують характеристичний вектор подібності, який також може бути збережений в базу даних для подальшого використання.

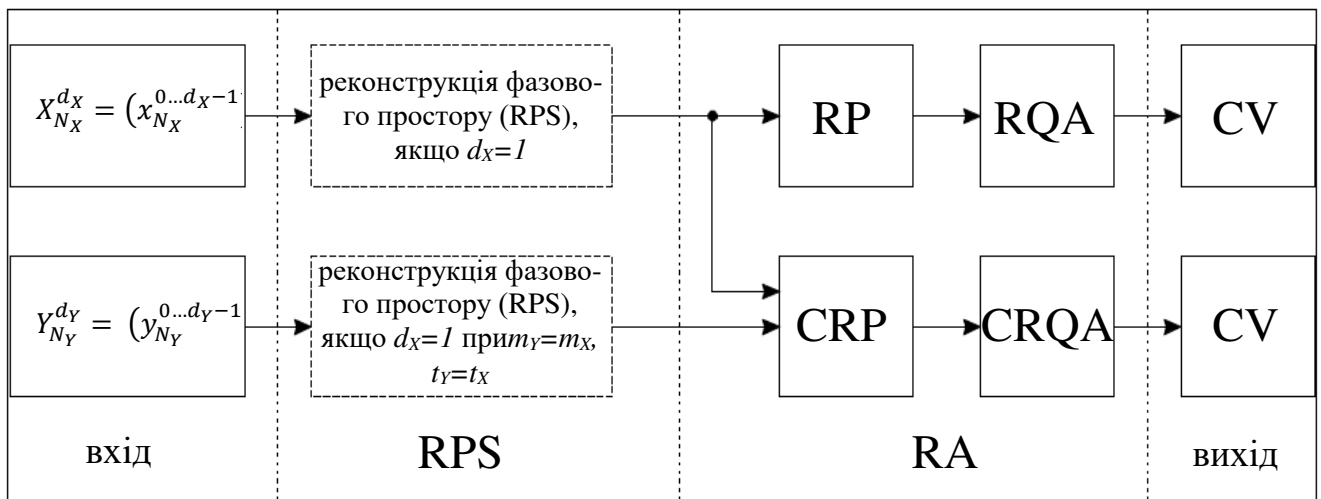


Рис. 2.24. Послідовність обробки сигналу при рекурентному аналізі.

Таким чином, нелінійний рекурентний аналіз дозволяє візуально досліджувати поведінку хаотичних часових рядів. Крім того, областями використання рекурентного аналізу є: вивчення динамічних систем, моніторинг стану складних систем, моніторинг протікання технологічних процесів, визначення несправностей складних систем, фільтрація, верифікація вхідних та вихідних даних, перевірка відповідності результату деяким обов'язковим критеріям тощо.

ВИСНОВКИ 2-го РОЗДІЛУ.

1. З боку нелінійного аналізу проведена характеристика технологічних процесів відділення дефекосатурації цукрового виробництва. Показано, що такі процеси мають всі характерні ознаки складної нелінійної динамічної системи, що характеризується явищами самоорганізації через утворення дисипативних просторово-часових структур

2. У рамках проведення кількісного аналізу здійснено дослідження часових рядів, визначені характеристики хаотичних інформаційних потоків обчисленням кореляційної розмірності та визначенням показнику Херста.

3. Розглянуто відновлення атракторів динамічної системи. Дана технологія застосовується для вирішення завдань моделювання складних систем, результати якої дозволяють судити про нелінійність системи і виділити атрактор з областями притягування, що характеризує граничний цикл траєкторії руху системи.

4. Проаналізовано переваги рекурентного методу аналізу. Зокрема, перевагами даного методу є те, що він дозволяє працювати з даними будь-якої розмірності, не критичний щодо походження та якості даних, маргінальний (не вносить додаткову інформацію), має наглядні візуальні результати. Все це дозволяє використовувати його для дослідження складних динамічних систем різної природи.

РОЗДІЛ III. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ВІДДІЛЕННЯМ ДЕФЕКОСАТУРАЦІЇ

3.1. Функціональні структури інтелектуальної системи керування відділенням дефекасації.

Для ефективного функціонування інтелектуальної системи керування технологічним комплексом важливою є умова скоординованості та сумісності підзадач керування. Ця умова гарантує розв'язання загальної задачі, якщо існує розв'язок кожної з підзадач. Визначення сумісності можна сформулювати так: підзадачі системи сумісні, якщо реалізація рішень підзадач нижнього рівня завжди забезпечує досягнення загальної мети функціонування системи. Проблеми створення інтелектуальних систем керування охоплюють не тільки питання розроблення відповідних методів і алгоритмів, а й коректності підзадач керування, стійкості алгоритмів до обчислювальних похибок та керування комплексами стохастичних підсистем[16, 25].

Умови сумісності підзадач ієрархічної системи керування технологічним комплексом передбачають такі основні положення:

- підзадачі нижнього рівня, тобто задачі керування підсистемами мають бути коректними;
- алгоритм розв'язання задачі координації забезпечує пошук таких дій координації, за яких розв'язок підзадач нижнього рівня відповідає екстремуму загального показника ефективності ТК;
- алгоритми розв'язання підзадач нижнього рівня та підзадачі координації мають бути стійкими до обчислювальних похибок.

Розглянемо перетворення вектора матеріального потоку станції дефекасації та її суміжних ділянок з точки зору розв'язування задачі інтелектуального керування та координації. Структуру технологічного показано на рис. 3.1.

Як видно із структурної схеми суміжними для станції дефекосатурації є дифузійна станція, випарна станція і вапняково-випалювальне відділення. Кожна суміжна станція, включаючи станцію дефекосатурації управляється за допомогою своєї автоматизованої системи управління відповідно – АСУТП дифузії, АСУТП дефекосатурації, АСУТП випарної станції і АСУТП вапняково-випалювального відділення. Кожною системою управління керує відповідний оператор. Усі дані про перебіг технологічного процесу потрапляють до центрального архіву.

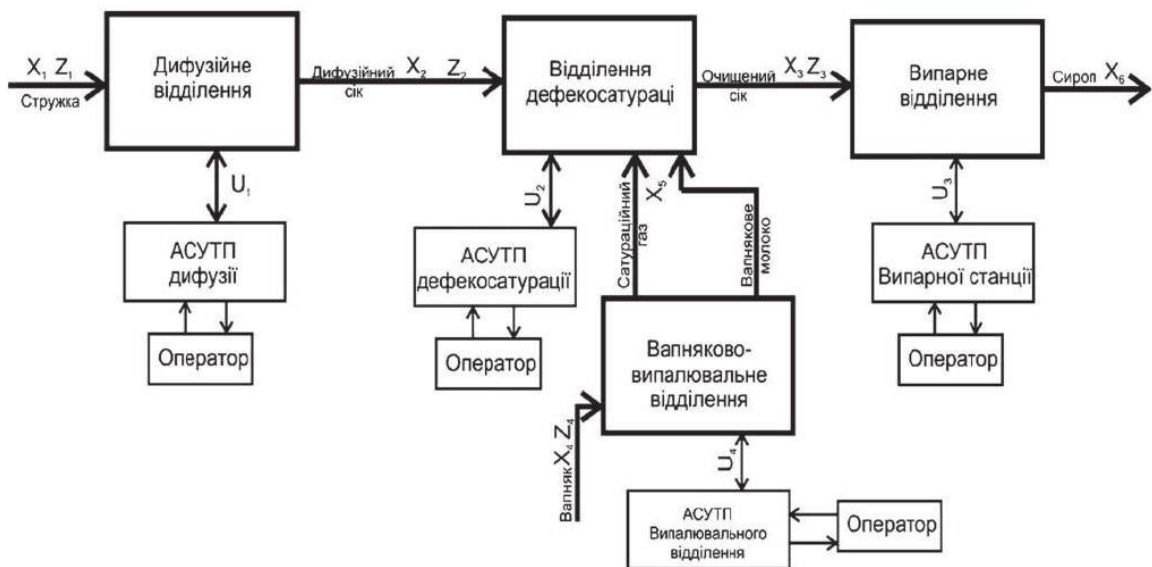


Рис.3.1. Структурна схема управління, а також матеріальні потоки станції дефекосатурації і суміжних ділянок.

Виходячи з ситуацій, які можуть виникати в технологічному процесі – явно існують взаємозв'язки між технологічними змінними кожного відділення.

Структуру матеріальних потоків технологічного комплексу показано на рис. 3.1 де X_i – вектор вхідних величин; U_i – вектор керувань; Z_i – вектор збурень.

Розглянемо окремо відділення дефекосатурації. Для відділення дефекосатурації вектор вхідних змінних складається з вектора $X_2 = [x_{2.1}, x_{2.2}, \dots, x_{2.n}]$, що містить такі параметри як витрата соку (відкачування) з дифузійного апарату; вміст цукру в соку; вміст сухих речовин тощо. А

також вектор $X_5 = [x_{5.1}, x_{5.2}, \dots, x_{5.n}]$, що містить такі параметри як вміст CO_2 в сатураційному газі з вапняково-випалювального відділення; густина вапнякового молока та ін. Вектор збурень $Z_2 = [z_{2.1}, z_{2.2}, \dots, z_{2.n}]$ і складається з таких параметрів як температура соку; рН соку тощо. На станції сокоочистки система автоматизації виконує такі функції; регулювання витрати вапняного молока в предефектор, холодний дефектор і дефектор перед 2-ю сатурацією по відношенню до витрати дифузійного соку; регулювання витрати суспензій соків 1-й і 2-й сатурації в предефектор; регулювання витрати дефекованого соку на 1-у сатурацію; регулювання витрати фільтрованого соку 1-ї сатурації на 2-гу сатурацію регулювання рН соку на 1-й та 2-й сатурації. Ці управляючі дії реалізуються за допомогою вектора управління $U_2 = [u_{2.1}, u_{2.2}, \dots, u_{2.n}]$.

Параметрична схема технологічного комплексу дефекосатурації, яка дає можливість оцінити взаємозв'язок між технологічним обладнанням та характерними параметрами процесу, наведена на рисунку 3.2,

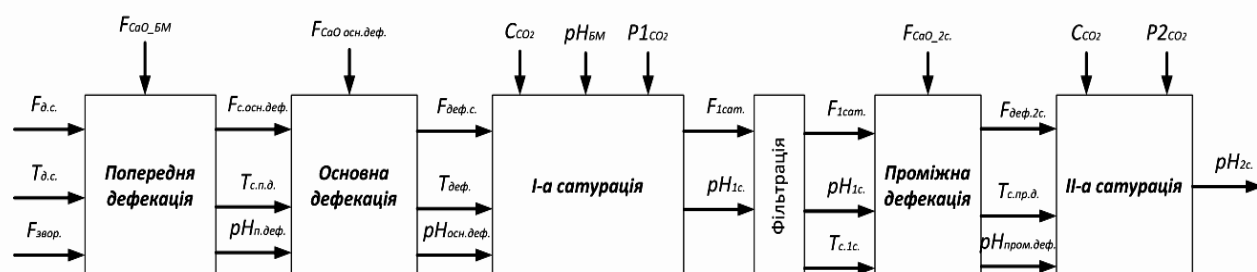


Рис. 3.2. Параметрична схема технологічного комплексу очистки дифузійного соку цукрового заводу.

де $F_{CaO_БМ}$ - витрата вапняного молока на попередню дефекацію, $\text{м}^3/\text{год}$; $F_{д.с.}$ - витрата дифузійного соку на попередню дефекацію, $\text{м}^3/\text{год}$; $F_{звор.}$ - витрата “повернення” на попередню дефекацію, $\text{м}^3/\text{год}$; $F_{с.осн.деф.}$ - витрата соку попередньої дефекації на основну дефекацію, $\text{м}^3/\text{год}$; $F_{CaOосн.деф.}$ - витрата вапняного молока на основну дефекацію, $\text{м}^3/\text{год}$; $F_{двфс.}$ - витрата соку основної дефекації на 1-шу сатурацію, $\text{м}^3/\text{год}$; $F_{CaO_2с.}$ - витрата вапняного молока на проміжну дефекацію перед 2-ю сатурацією, $\text{м}^3/\text{год}$; $F_{1сат.}$ - витрата соку 1-ї

сатурації, м³/год; $F_{\text{двф.2.с}}$ - витрата соку проміжної дефекації на 2-гу сатурацію, м³/год; $T_{\text{д.с}}$ - температура дифузійного соку, °С; $T_{\text{с.п.д}}$ - температура соку попередньої дефекації, °С; $T_{\text{двф.с}}$ - температура соку основної дефекації, °С; $T_{\text{с.1с}}$ - температура соку 1-ї сатурації, °С; $T_{\text{с.пр.д}}$ - температура соку проміжної дефекації, °С; $P1_{\text{CO}}$ - тиск сатураційного газу на 1-й сатурації, кПа; $P2_{\text{CO}}$ - тиск сатураційного газу на 2-й сатурації, кПа; C_{CO} - газовміст сатураційного газу, %; $pH_{\text{п.двф}}$ - рН на попередній дефекації, од.рН; $pH_{\text{осн.двф}}$ - рН на основній дефекації, од.рН; $pH_{\text{пром.двф}}$ - рН на проміжній дефекації, од.рН; $pH_{1с}$ - рН на 1-й сатурації, од.рН; $pH_{2с}$ - рН на 2-й сатурації, од.рН.

При функціонуванні підсистем можуть виникати конфліктні ситуації. Так, у разі послідовного з'єднання підсистем економічність E залежно від навантаження Q може мати вигляд кривих 1 і 2, а робоча точка A – змінювати своє положення внаслідок деформування та дрейфу кривих (рис. 3.3).

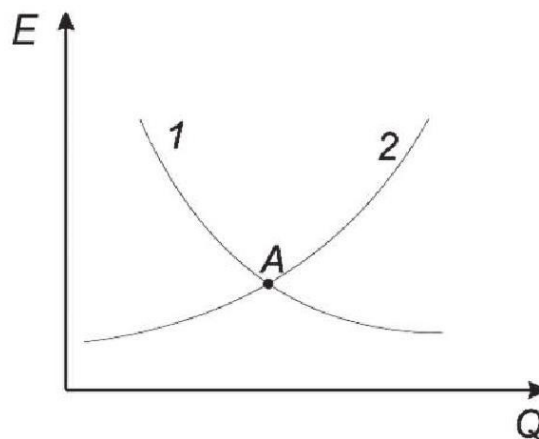


Рис. 3.3. Залежність економічності підсистем E від навантаження Q

Очевидним є зведення задачі інтелектуального керування багатостадійним виробництвом до задачі оптимального керування окремими стадіями з урахуванням взаємодії між ними.

Відділення дефекосатурації цукрового заводу є складним об'єктом керування. Одним із характерних проявів цієї складності є наявність переміжності: детермінована поведінка (русла) змінюється на стохастичну (джокери) з утворенням дисипативних просторово – часових структур (атракторів). Успішний моніторинг та керування процесом сокоочистки

вимагає проведення ефективного прогнозування атрактивної поведінки з урахуванням явищ самоорганізації та еволюції структур.

Необхідним є визначення ієрархічних моделей поведінки технологічного процесу відділення дефекосатурації, які задають систему атракторів як інваріантних багатообразів в області параметрів порядку, і реалізації на їх основі керуючих стратегій, що організують направлений рух фазових траєкторій об'єкта в оптимальному руслі між атракторами, забезпечуючи при цьому завдяки самоорганізації значну економію ресурсів виробництва.

На рисунку 3.4 приведено структуру інтелектуальної системи керування відділенням дефекосатурації цукрового заводу.



Рис. 3.4. Структура інтелектуальної системи керування відділенням дефекосатурації цукрового заводу.

З точки зору теорії керування, відділення дефекосатурації є складним технологічним об'єктом, питання синтезу систем керування яким розглядалися в основному в лінійній постановці задачі.

Дія різноманітних збурюючих факторів призводить до необхідності стабілізації величини pH при одночасному впливі на інші параметри окремого технологічного процесу, тобто необхідне розв'язання задачі векторного керування на кожному етапі виробництва.

Під час технічної реалізації алгоритмів інтелектуального керування використовуються такі процедури:

1. Розв'язання задачі координації має гарантувати розв'язок загальної задачі керування технологічним комплексом у результаті розв'язування підзадач нижнього рівня.

2. Для формування процедур координації потрібно мати адекватні математичні моделі підсистем.

3. В умовах дефіциту машинного часу доводиться отримувати часткові розв'язки. Можна використовувати проміжну ітерацію, яка забезпечує істотне підвищення ефективності роботи технологічного комплексу. Для кожної з підсистем розроблено підзадачу оптимізації як результат декомпозиції загальної задачі керування технологічним комплексом.

Задача координації розв'язується з використанням принципу прогнозування взаємодії підсистем на основі ітераційного алгоритму (рис.3.5).

На реалізацію алгоритмів координації значно впливає також наявність обчислювальних похибок. Крім того точний розв'язок задачі можливий лише за нескінченного числа ітерацій. Під час реалізації алгоритмів координації обчислювальні похибки виникають у разі:

- знаходження екстремумів цільових функцій;
- реалізації математичних моделей;

– визначення комплексу змінних взаємодії підсистем. Для розв'язання задачі використовуються два види алгоритмів координації: ітеративні та безітеративні. В ітеративних оптимальне розв'язання визначається у ході ітеративного обміну інформацією між центром й елементами, а на кожному кроці ітеративного процесу розв'язуються локально-оптимальні задачі елементів і координуюча задача центру. У безітеративних алгоритмах

розв'язки ухвалюються в результаті однократного обміну інформацією між рівнями.

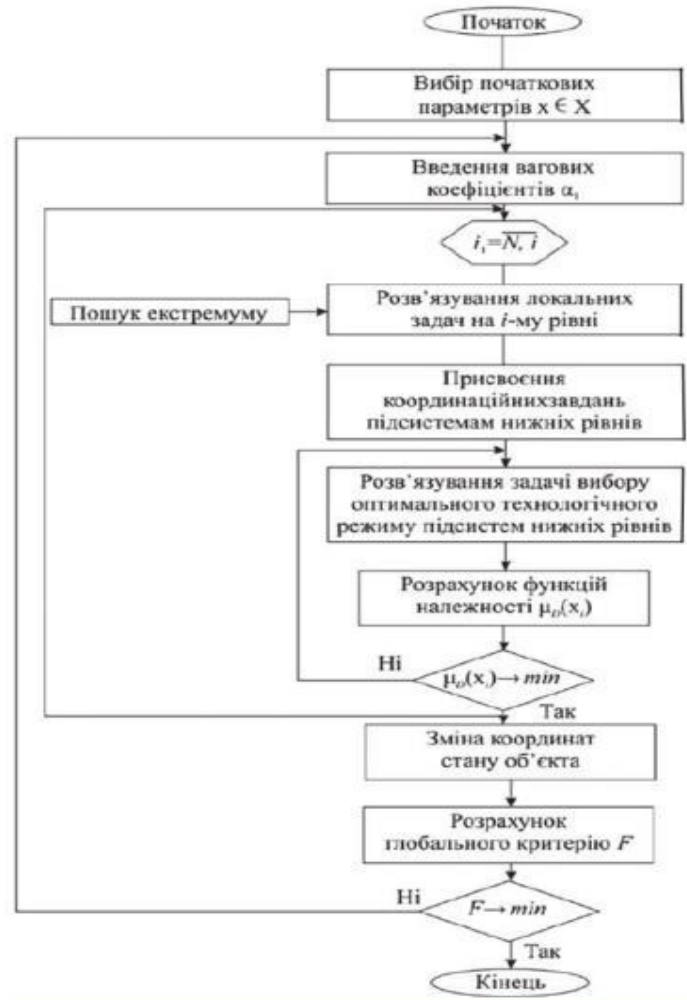


Рис. 3.5. Блок-схема алгоритму інтелектуального керування станцією дефекосатурації з розв'язуванням задач оптимізації суміжних підсистем і координації їхньої роботи.

Відділення дефекосатурації розглядається як динамічний об'єкт, який в загальному вигляді можна виразити таким чином:

$$\begin{aligned}
 x_{k+1} &= \Phi x_k + \psi u_k + w_k \\
 y_{k+1} &= H x_{k+1} + v_{k+1}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

де x_{k+1} - вектор стану, u_k - вектор управління; w_k - вектор збурення, y_{k+1} - вектор вимірювання, v_{k+1} - вектор помилки вимірювання, Φ - матриця стану, ψ - матриця управління, H - матриця спостереження.

Параметри $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$, які потрібно визначити, знаходяться в матрицях $\Phi(\theta)$ $\Psi(\theta)$. Пропонується рекурентна схема методу найменших квадратів для визначення параметрів лінійних динамічних об'єктів в уставленому режимі, тобто всі перехідні процеси закінчилися.

Найтипівішим алгоритмом оцінювання невідомих параметрів є рекурентний алгоритм методу найменших квадратів

$$\hat{\theta}_{N+1} = \hat{\theta}_N + K_{N+1}(y_{N+1} - x_{N+1}^T \hat{\theta}_N) \quad (3.2)$$

$$K_{N+1} = P_N x_{N+1} / (1 + x_{N+1}^T P_N x_{N+1})$$

$$P_{N+1} = \left(I - P_N \frac{x_{N+1} x_{N+1}^T}{1 + x_{N+1}^T P_N x_{N+1}} \right) P_N \quad (3.3)$$

де k_{N+1} - вектор-стовпець коефіцієнтів підсилення розміром N , P_N , P_{N+1} - матриці, забезпечує оцінку дисперсії помилки оцінювання, обчислені за результатами N і $N+1$ вимірювань відповідно, I - одинична матриця розміром $n \times n$, y_{N+1} - скаляр, θ_N , θ_{N+1} , X_{N+1} - вектори-стовпці розміром N . Моделювання рекурентної процедури методу найменших квадратів організовано у вигляді блоків декількох рівнів. Кожен блок є певною формулою, що входить в алгоритм оцінювання невідомих параметрів. Даний спосіб моделювання дозволяє компактно відобразити весь процес визначення параметрів об'єкта.

У загальному випадку подання використовуваної процедури є дуже великим і складним, тому вона ілюструється на моделі (рис. 3.6), яка може бути використана при описі перевернутого маятника, Ця модель часто використовується при аналізі і синтезі систем управління [46].

У роботі побудована модель в просторі станів:

$$\begin{pmatrix} x_{k+1}^1 \\ x_{k+1}^2 \\ x_{k+1}^3 \\ x_{k+1}^4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & d & 0 & -(ad+c) \\ 1 & 1-d & 0 & (ad-a-b) \\ 0 & \theta_1 & 0 & -(1+\theta_1 a) \\ 0 & \theta_1 & 1 & (\theta_2 - \theta_1 a) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_k^1 \\ x_k^2 \\ x_k^3 \\ x_k^4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} ad+c \\ -ad+a+b \\ \theta_1 a \\ \theta_1 a \end{pmatrix} u_k + \begin{pmatrix} w_{k+1}^1 \\ w_{k+1}^2 \\ w_{k+1}^3 \\ w_{k+1}^4 \end{pmatrix}$$

$$y_{k+1} = (0 \ 0 \ 0 \ 1) x_{k+1} + v_{k+1} \quad (3.4)$$

де $a=135$, $b=-216$, $c=87,5$, $d=0,37$. Здійснивши підстановку зазначених значень, отримаємо наступний опис об'єкта в просторі станів:

$$\begin{pmatrix} x_{k+1}^1 \\ x_{k+1}^2 \\ x_{k+1}^3 \\ x_{k+1}^4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0.375 & 0 & -138.125 \\ 1 & 0.625 & 0 & 131.875 \\ 0 & \theta_1 & 0 & -1 + 135\theta_1 \\ 0 & \theta_1 & 1 & \theta_2 - 135\theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_k^1 \\ x_k^2 \\ x_k^3 \\ x_k^4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 138.125 \\ -131.875 \\ 135\theta_1 \\ 135\theta_1 \end{pmatrix} u_k + \begin{pmatrix} w_{k+1}^1 \\ w_{k+1}^2 \\ w_{k+1}^3 \\ w_{k+1}^4 \end{pmatrix}$$

$$y_{k+1} = (0 \ 0 \ 0 \ 1)x_{k+1} + v_{k+1} \quad (3.5)$$

У середовищі ToolboxSimulink виконано загальне моделювання динамічного об'єкта (рис.3.7).

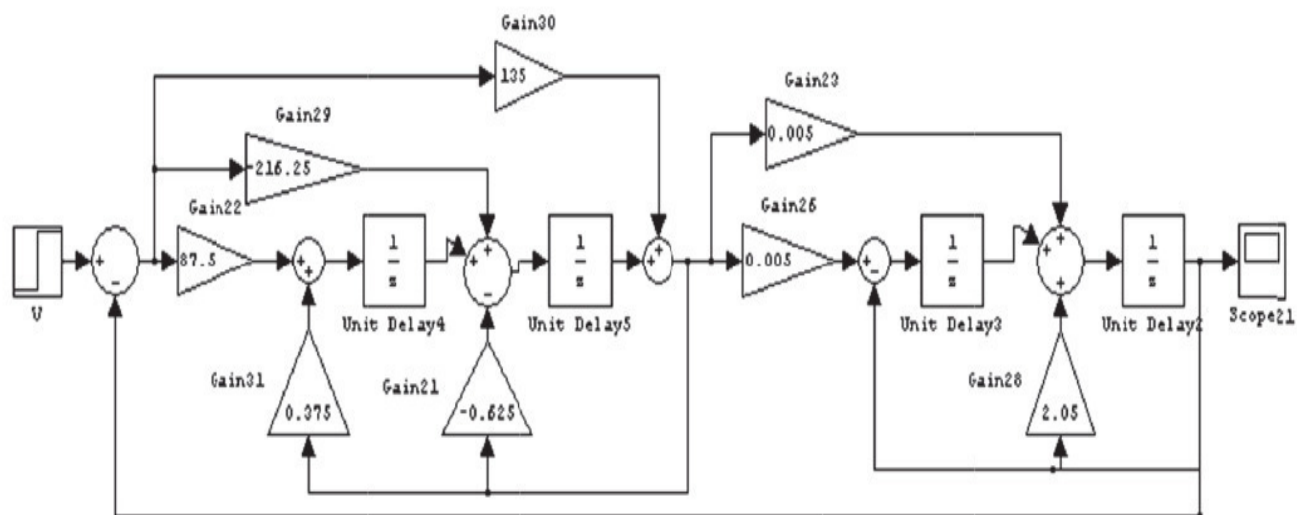


Рис. 3.6. Модель об'єкту.

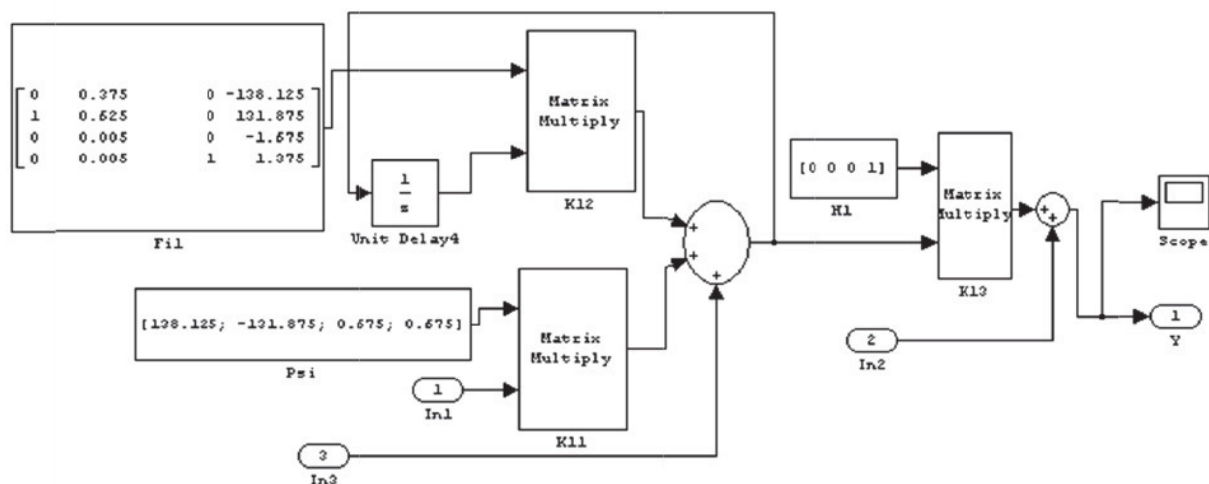


Рис. 3.7. Моделювання об'єкту.

На підставі цього та для проведення імітаційного моделювання технологічного комплексу дефекосатурації розроблено узагальнену схему підсистеми імітаційного моделювання (рис. 3.8) та побудовано імітаційну модель (рис. 3.9.) дослідження станції сокоочистки цукрового заводу.



Рис. 3.8. Структура підсистеми імітаційного моделювання

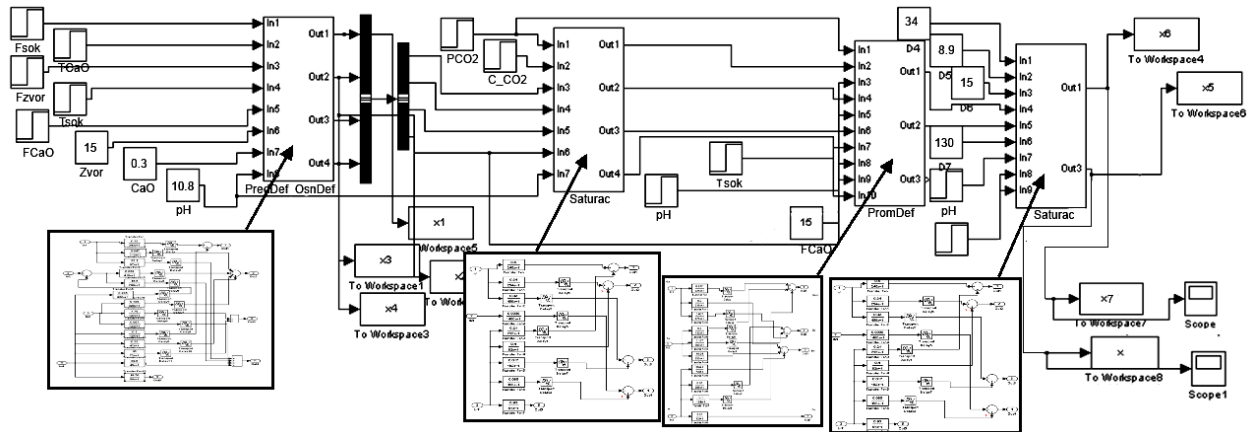


Рис. 3.9. Імітаційна модель відділення дефекосатурації.

Розглянемо розподіл сингулярних значень вихідного зображення, отримані розрахунковим шляхом за допомогою MATLAB.

На рисунках(3.10, 3.11, 3.12) представлено результати моделювання динамічної системи з синтезованими регуляторами. При моделюванні використовувались усереднені технологічні показники параметрів процесу дефекації. Якість керування оцінювався за інтегральним квадратичним критерієм.

Було виявлено, що система стійка до збурень, а час регулювання залежить лише від величин T_1 , T_2 . При чому, характер перехідних процесів не змінюється при зміні часу регулювання, відповідно і не залежить від нього.

Похідні $\frac{\partial v}{\partial T_{д.с.}}$ не дали істотного впливу на процеси регулювання,

відповідно, їх значенням можна знехтувати.

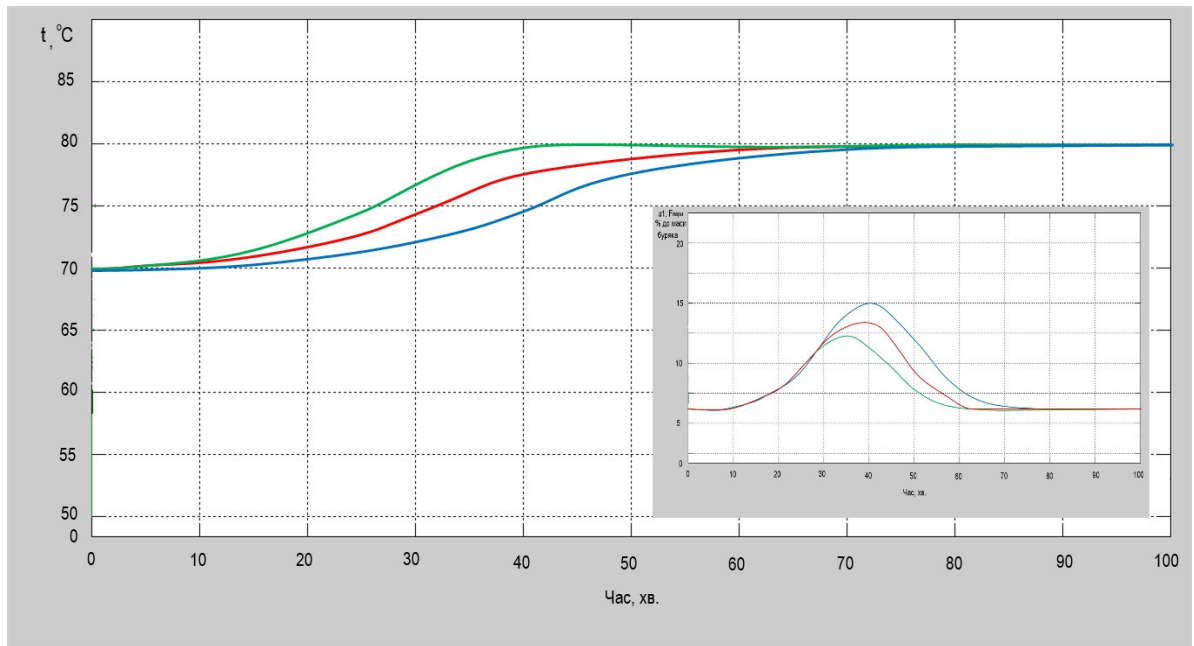


Рис. 3.10. Процес регулювання температури дифузійного соку з урахуванням збурення по величині рН ($\Delta pH_{БМ}=+2$): а) при $T_1=T_2=200$; б) при $T_1=T_2=100$; в) при $T_1=T_2=10$

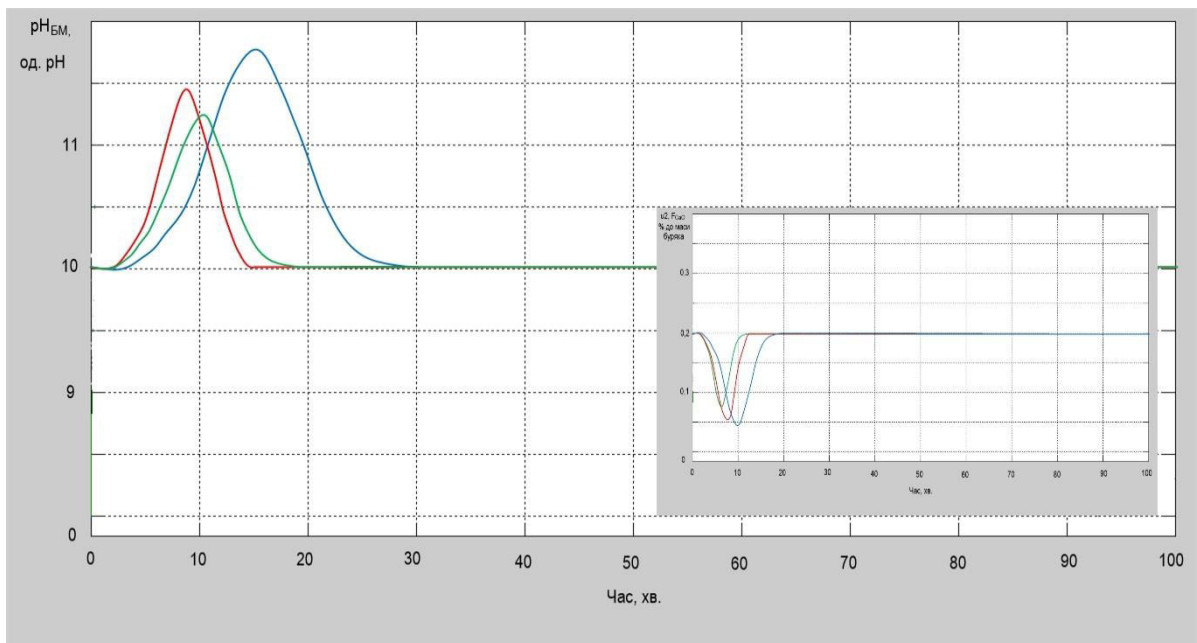


Рис. 3.11. Процес регулювання величини рН дифузійного соку з урахуванням збурення по температурі ($\Delta T_{\text{д.с.}} = 12^{\circ}\text{C}$): а) при $T_1 = T_2 = 200$; б) при $T_1 = T_2 = 100$; в) при $T_1 = T_2 = 10$

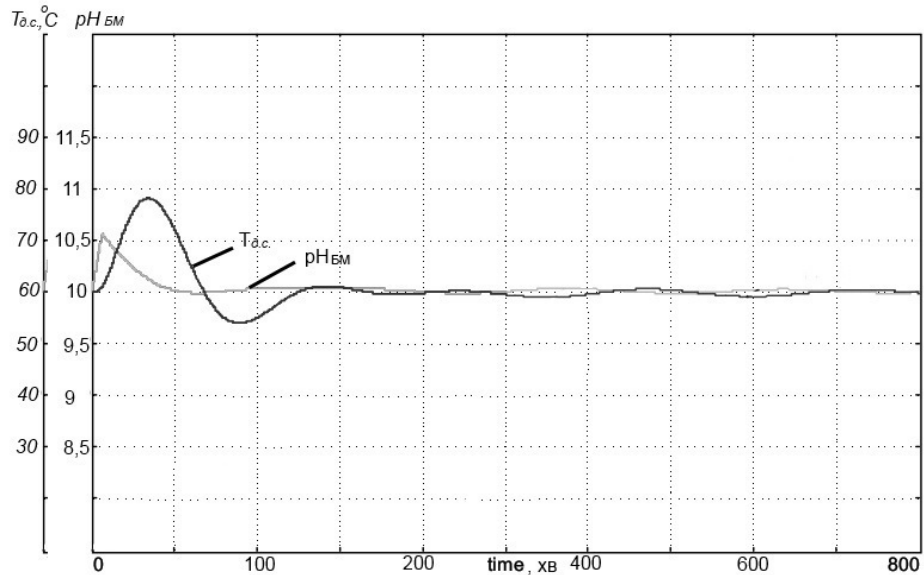


Рис. 3.12. Процес регулювання величини $pH_{\text{БМ}}$ та температури $T_{\text{д.с.}}$ дифузійного соку при взаємозв'язаному керуванні за умови $T_1 = T_2 = 12$

Синтезована синергетична система керування показала свою працездатність, стійкість та ефективність.

На основі вищезазначеного можна синтезувати закони взаємного управління для математичної моделі дефекосатурації:

$$\begin{aligned} \frac{dpH_{1c.}}{\partial \tau} &= \frac{F_{\text{аао.н.}} \cdot \tilde{N}_{\text{НаІ}}}{V} - k_3 \cdot C_{\text{CO}_2} \cdot P1_{\text{CO}_2} \cdot V, \\ \frac{dC_{\text{CaCO}_3}}{\partial \tau} &= \frac{F_{1\text{н\text{а}o.}} \cdot \tilde{N}_{\text{НІ}_2} \cdot \text{ДІ}_{\text{НІ}_2}}{V} \cdot k_3 - \frac{F_{\text{аао.н.}} \cdot \tilde{N}_{\text{НаІ}}}{V}, \\ \frac{d\dot{O}_{\text{аао.}}}{\partial \tau} &= \frac{F_{\text{аао.н.}} \cdot \dot{O}_{\text{НІ}_2} + F_{\text{аао.н.}} \cdot \dot{O}_{\text{аао.}}}{V} - \frac{F_{1\text{н\text{а}o.}} \cdot Q}{V} \end{aligned} \quad (3.6)$$

де, C_{CO_2} - концентрація сатураційного газу, %; k_3 - коефіцієнт реакції осадження; $Q = \Delta H / (\rho \cdot C_{\text{CO}_2})$, ΔH - тепловий ефект реакції (віднесений до швидкості по компоненті концентрації сатураційного газу); V - об'єм сатуратора, м^3 .

3.2. Розробка систем інтелектуального керування процесом дефекосатурації та вибір засобів реалізації програм.

Автоматизація цукрових заводів повинна бути підпорядкована єдиній концепції та стратегії, яка повинна забезпечити окрім автоматизації окремого обладнання, об'єднання діючих комплексів в єдину лінію виробництва. В іншому випадку виникає несумісність апаратних і програмних засобів, закритість систем тощо, що не дозволяє поєднати їх в єдину систему.

У зв'язку з цим концепція інтелектуального керування повинна перш за все опиратися на стандартизоване і уніфіковане апаратне і програмне забезпечення, забезпечити злиття інформаційних потоків в єдине інформаційне поле, а управління процесом повинно формуватися з урахуванням не тільки технологічних параметрів, але й даних системи обліку і контролю матеріально-технічних ресурсів підприємства.

Сучасний етап розвитку АСУТП характеризується створенням і впровадженням АСУТП на базі серійних промислових контролерів, сумісних з персональними комп'ютерами, і потужних програмно-технічних комплексів підтримки програмування АСУТП - SCADA систем, а також розвитку і стандартизації мережевих технологій. Побудова АСУТП на основі концепції відкритих систем дозволяє апаратно-програмні засоби різних виробників поєднувати в єдину лінію виробництва і забезпечувати перевірку всієї системи.

Кожна ділянка виробництва оснащена АРМ (автоматизованим робочим місцем) на базі єдиної для всіх ділянок SCADA-системи, функціями якої є контроль і візуалізація частини (в рамках ділянки) технологічного процесу, формування тривоги та аварійних повідомлень. Інформація в SCADA-систему стікається від програмованих логічних контролерів, що відповідають за безпосереднє управління технологічним процесом в рамках конкретної одиниці автоматизованого обладнання. Найбільш популярні SCADA-системи сьогодні - GENESIS 32 (Iconics), RSView32 (RockwellSoftware), WinCC (Siemens), VipWin (Festo). Серед розробників контролерів можна назвати Alen Bradiey, Schneider,

Siemens, Advantech та ін. Проблема зв'язку різних контролерів успішно вирішується за допомогою технології OPC (OLE for Process Control).

SCADAсистема RSVIEW32. Програма RSVIEW32 використовується як людино-машинний інтерфейс. У RSVIEW32 можна створювати графічні об'єкти та текст. Програма дозволяє використовувати прості об'єкти, як еліпси і прямокутники, або ж більш складні, наприклад, тренди або зведення за сигналами тривоги. Бібліотеки RSVIEW32 містять безліч графічних об'єктів, які можна перетягувати на графічні дисплеї (рис. 3.13). Програма також дозволяє використовувати об'єкти, створені за допомогою інших графічних редакторів, таких як AutoCAD, CorelDraw тощо.

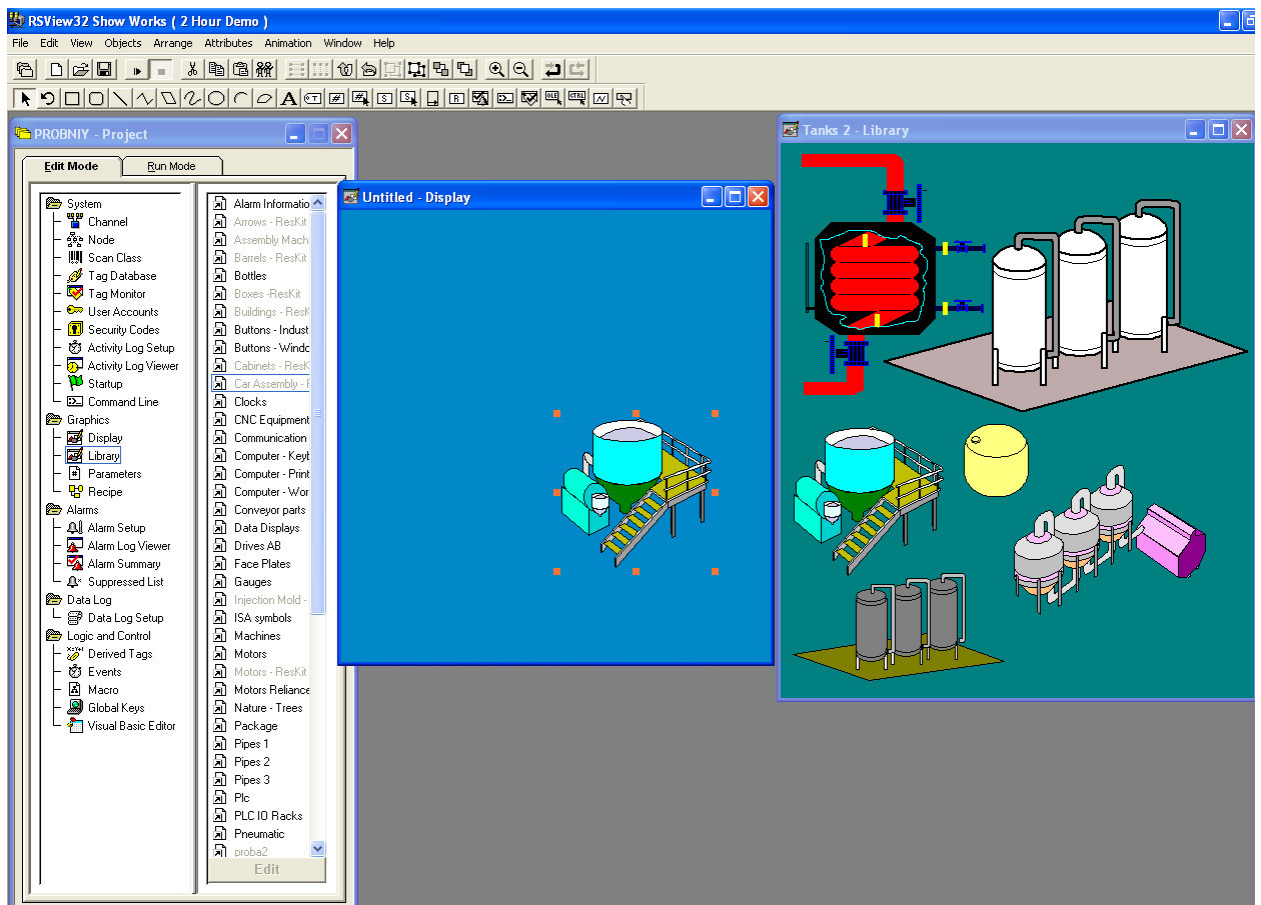


Рис. 3.13. Вікно програми RSVIEW32

Програма так само дозволяє використовувати тренди. Тренди є візуальним представленням значень тегів (в реальному часі або історичних), яке дає операторам можливість безпосередньо відстежувати роботу установки. За

допомогою RSVIEW32 можна будувати графіки аж до 16 тегів на один тренд, а також будувати графіки на основі значень, а не тегів.

У програмі реалізована функція виявлення подій. В даному випадку події - це вираження RSVIEW32, які ініціюють будь-які дії. Ці вислови є рівняння, що містять значення тегів математичні операції, умовну логіку та інші вбудовані функції.

RSVIEW32 - перший пакет людино-машинного інтерфейсу який дозволяє впроваджувати технологію ActiveX в графічні дисплеї. ActiveX - стійка, комплексна, високопродуктивна технологія, широко використовується в вітчизняних бізнес-додатках. Технологія ActiveX спрощує створення інтеграцію і повторне використання компонентів програмного забезпечення.

Разом з керуючими елементами ActiveX, RS View 32 забезпечує максимальну гнучкість при постійному контролі й експлуатації системи управління. У RSVIEW32 організований простий інтерфейс для Microsoft Windows, з усіма його характеристиками і функціональними можливостями, які необхідні для ефективного контролю і управління обладнанням і процесами автоматизації[40].

Розробка алгоритмів повинна ґрунтуватися на управлінні апаратами, як окремо, так і процесом дефекосатурації в цілому, так як даний процес є не переривчастим. Також необхідно враховувати специфіку SCADA системи, яка повинна буде управляти процесом дефекосатурації, формуючи керуючі впливи і проводити збір необхідної інформації для відображення на дисплеї оператора. Алгоритм основної програми повинен будуватися на трьох основних етапах. Перший етап - це збір необхідної інформації з датчиків і занесення її в осередок пам'яті, для подальшої обробки. Другий етап - безпосередньо обробка даних отриманих з датчиків і формування керуючих впливів. Третій етап - повинен являти собою подачу керуючих впливів на регулюючі органи, для зміни параметрів згідно з технологічним регламентом процесу. Внаслідок вищевикладеного, алгоритм основної програми буде мати вигляд представлений на рис. 3.14.



Рис. 3.14. Алгоритм основної частини програми

Так як програма в контролері повинна буде виконуватися циклічно в алгоритмі необхідно організувати цикл, що повторює основні етапи програми, що і показано на попередній блок-схемі.

Програма повинна бути правильно організована і бути зрозумілій для інших програмістів - це дозволяють зробити підпрограми. Опис кількох основних алгоритмів підпрограм наведені нижче. Алгоритм підпрограми Sr1 - дозволяє організувати збір значень змінних, що характеризують передані в контролер параметри технологічного процесу (рис. 3.15). Алгоритм являє собою послідовне з'єднання блоків рішення, в яких організовані операції присвоєння значень, що надходять з датчиків на модулі входу, в певні осередки пам'яті. Алгоритм підпрограми Sr3 (рис. 3.16) являє собою розгалужену структуру, що містить цикл з додатковими підпрограмами, який реалізує обчислення значень керуючих впливів. На рис.3.17 та рис.3.18 наведені

алгоритми підпрограм Sr16 та Sr4 відповідно, що дозволяють здійснювати подачу значень керуючих впливів на виходи.

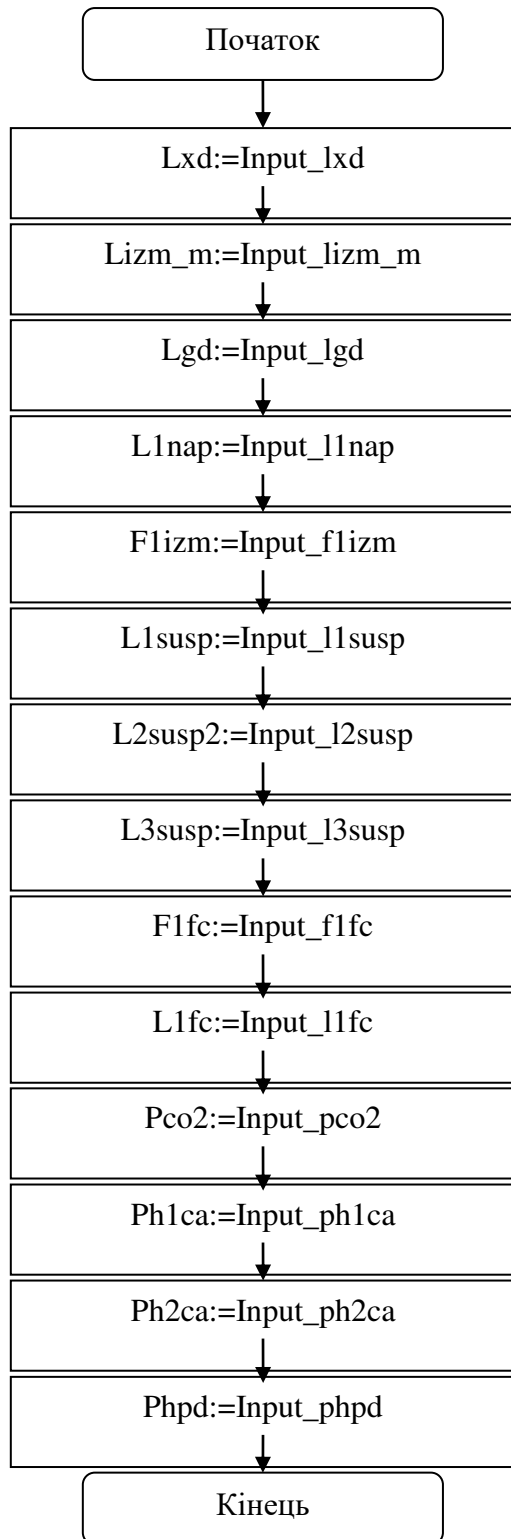


Рис. 3.15. Алгоритм підпрограми Sr1

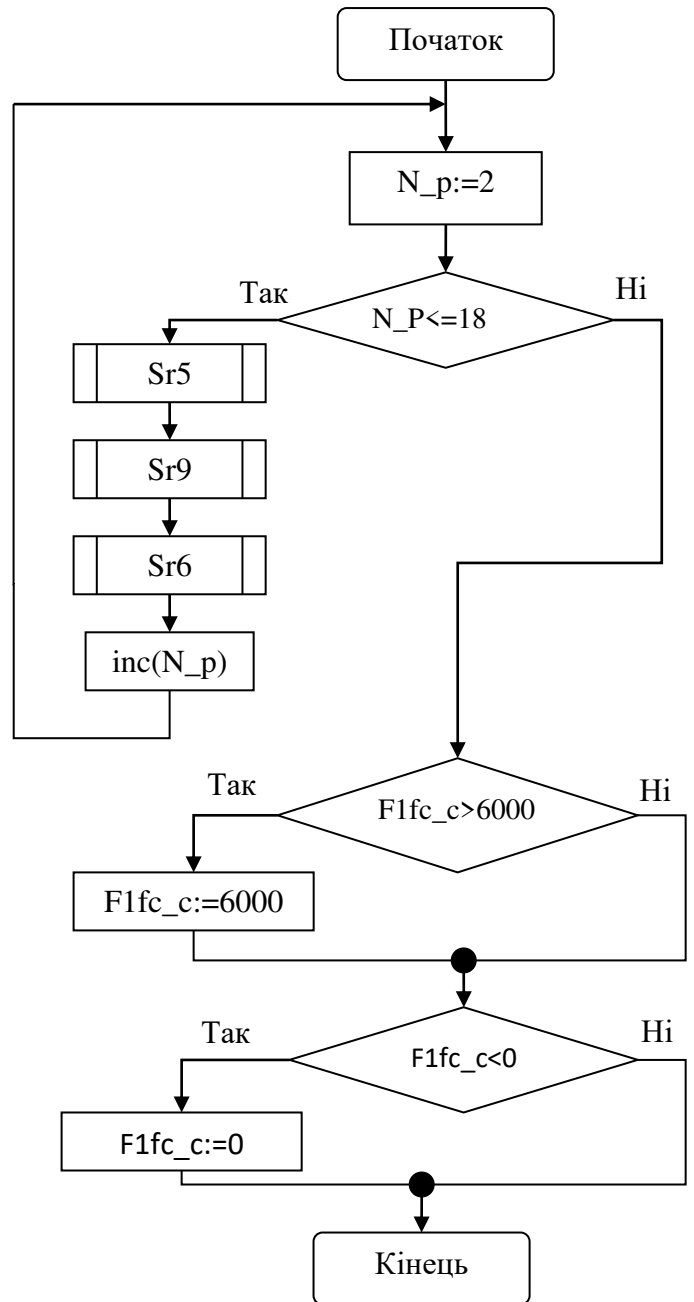
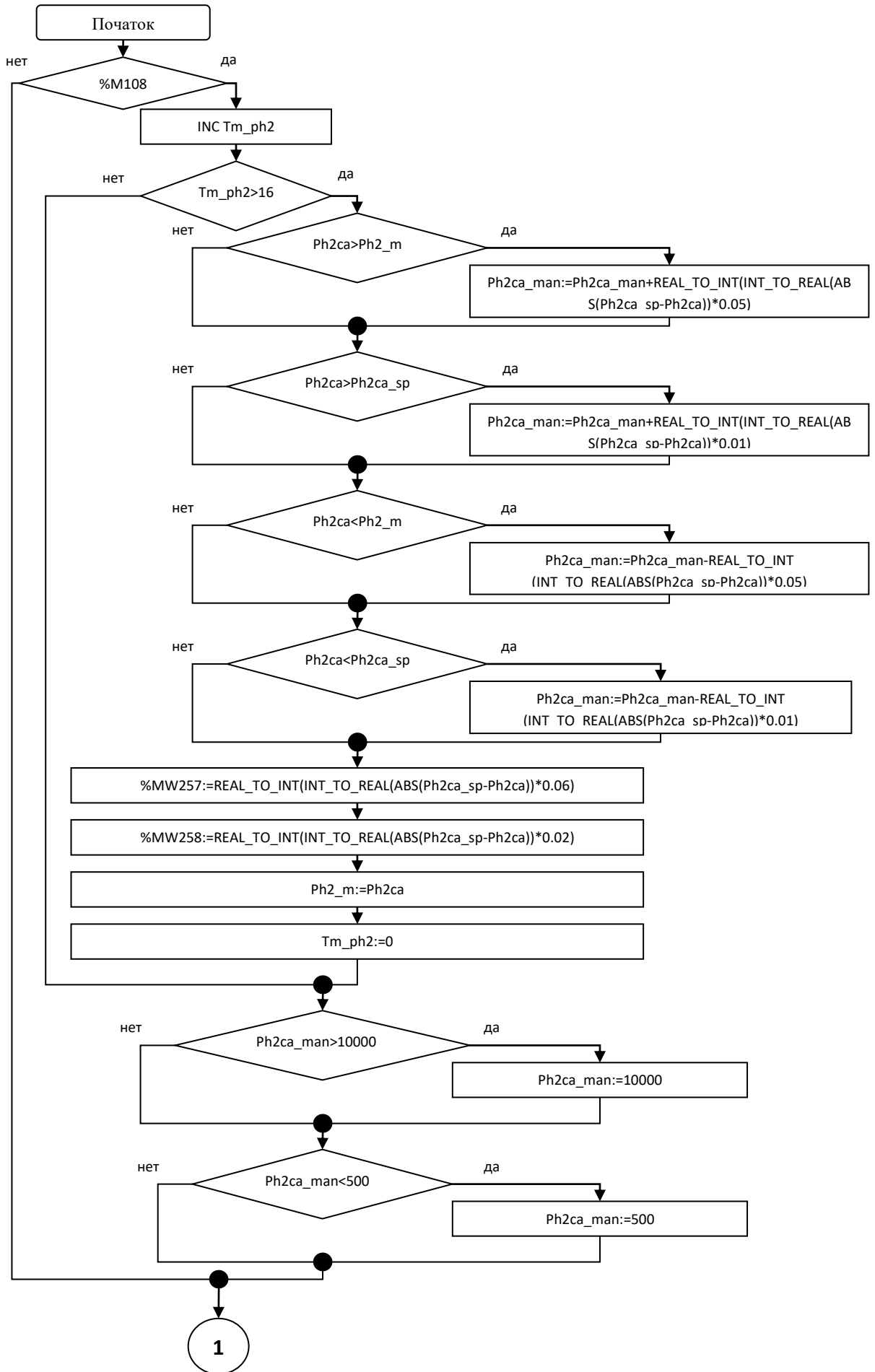


Рис. 3.16. Алгоритм підпрограми Sr3



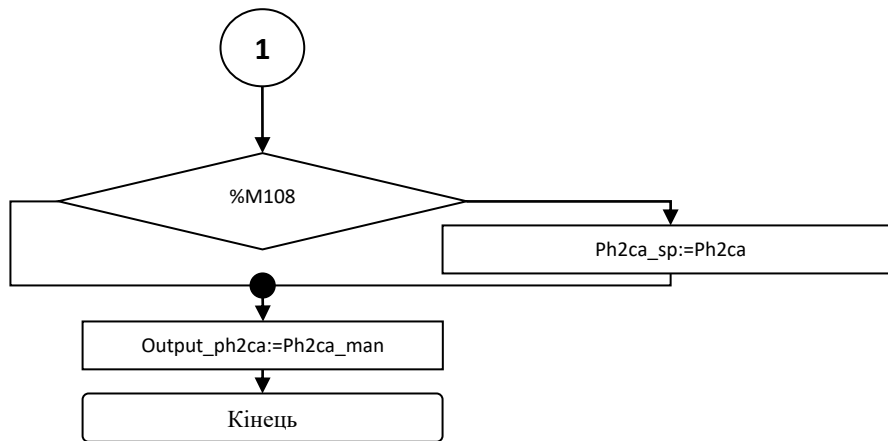


Рис. 3.17. Алгоритм підпрограми Sr16

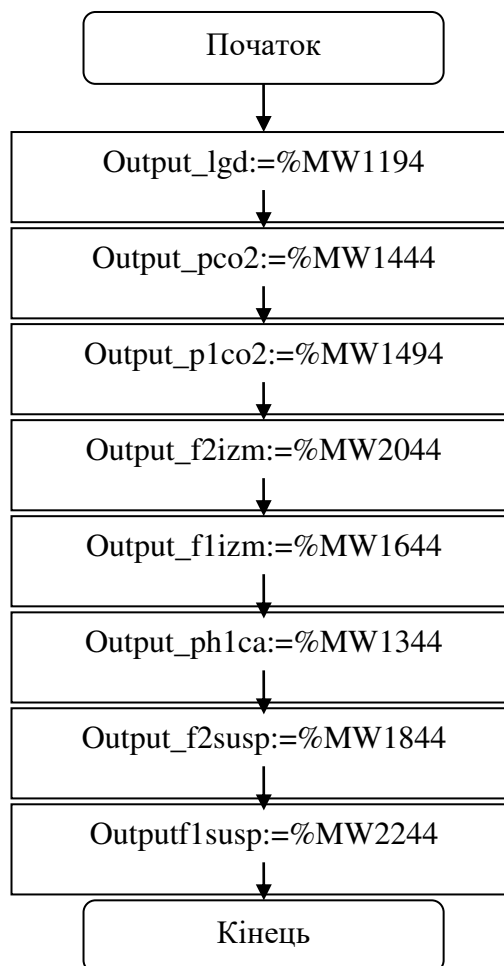


Рис. 3.18. Алгоритм підпрограми Sr4

3.3. Інтерфейс візуалізації підсистеми прогнозування та підтримки прийняття рішень для керування відділенням дефекосатурації.

Система контролю і управління RSView32 являє собою програмно-технічний комплекс, що складається з набору базових програмних продуктів, прикладного програмного забезпечення, ПЕОМ, контролера, засобів зв'язку, датчиків і перетворювачів.

Для запуску системи необхідно забезпечити підключення всіх складових частин до промислової мережі напругою 220В. Системний блок ПЕОМ і дисплей живляться від джерела безперебійного живлення (ІБП), що забезпечує короткочасну роботу цих пристроїв при відключеному харчуванні і дає можливість оператору закрити всі відкриті програми для виключення втрати даних.

Після подачі напруги на ПЕОМ та завантаження операційного середовища Windows необхідно запустити систему контролю та управління «АСУТП дефекосатурації» на базі RSView32, дочекатися появи на екрані кадру 1 (рис.3.19). У вікні кадру 1, представлена певна частина процесу дефекосатурації, перехід до іншої частини процесу (рис.3.20) здійснюється за допомогою натискання кнопки «2-а сатурація». Обидві мнемосхеми дозволяють виконати контроль основних параметрів (тиск, температура витрата та рівень) та переходи на інші мнемосхеми.

На двох основних мнемосхемах (кадр1 і кадр2), зображені клапани, збірки, трубопроводи та об'єкти управління з прив'язаними до них поточними значеннями параметрів.

Відображаються наступні параметри:

- витрати соку, вапняного молока, повернення соку на Бріггел-Мюллер;
- витрата соку на гарячий дефекатор, витрати соку та вапняного молока на 2-у сатурацію;
- рН першої та другої сатурації, рН в шостій зоні предефекатора;
- тиск сатураційного газу;

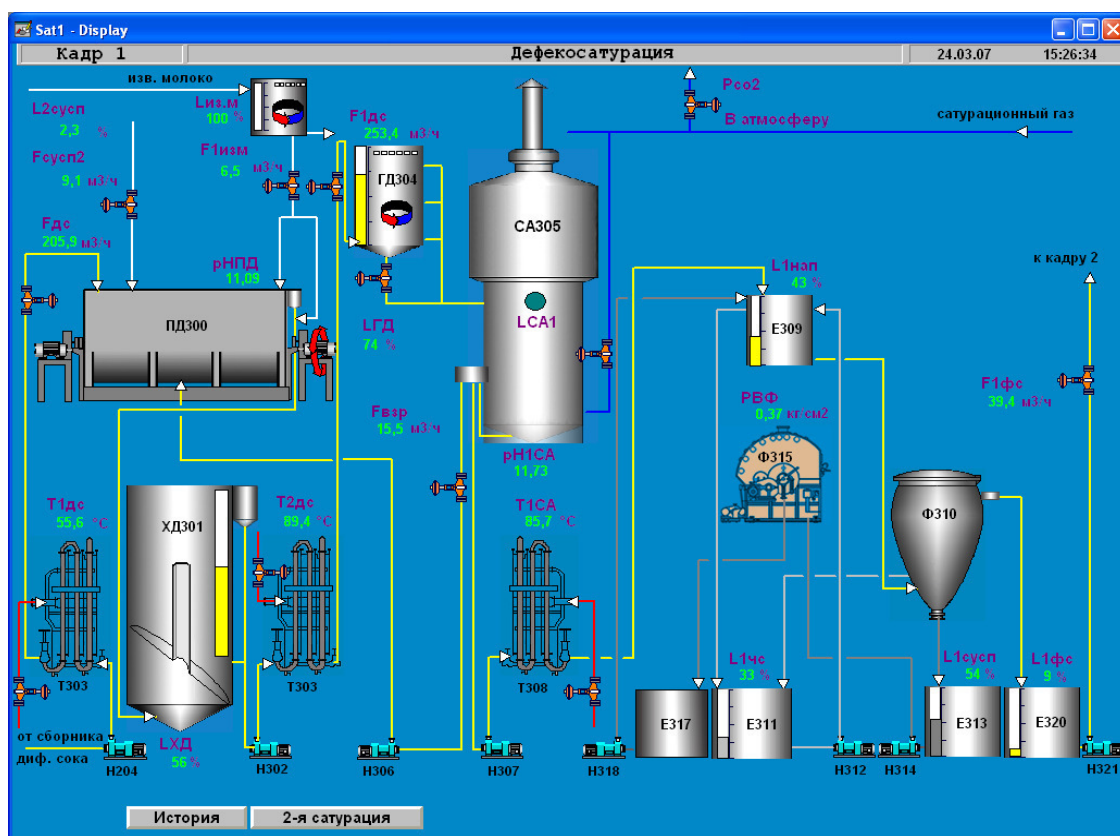


Рис. 3.19. Вікно кадру 1-го процесу дефекосатурації

- температури соку на гарячий дефекатор 1-ої та 2-ої сатурації, температура соку після першої сатурації;
- рівні в холодному дефекаторі, гарячому дефекаторі перед першою і другою сатураціями, в збірниках соку, в мішалці вапняного молока;

Переходи на мнемосхеми регуляторів здійснюються натисненням лівої кнопки миші на зображенні відповідного клапана. Підказка про те, що перехід можна здійснювати, служить виділення зображення клапана прямокутником синього кольору, при наведенні на нього курсору миші.

Мнемосхеми регуляторів призначені для контролю параметрів регуляторів у вигляді цифр, рівнів, перемикачів, графіків поточних значень. Тут відображаються: завдання, величина, положення виконавчого механізму (у відсотках).

Перехід на додаткову мнемосхему "Історія" здійснюється при натисканні на відповідну кнопку в нижній частині основних мнемосхем. Внаслідок натискання, відкривається проміжне вікно (рис.3.21) з вибором групи тегів. При

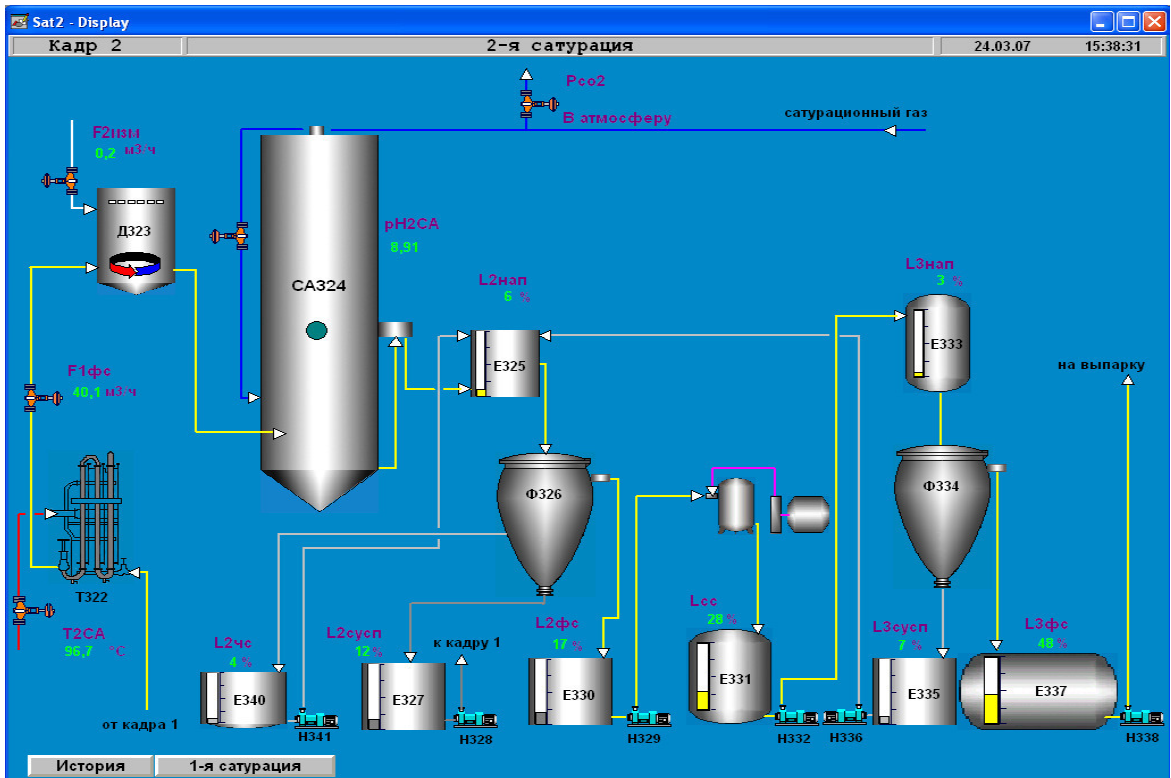


Рис. 3.20. Вікно кадру 2-го процесу дефекосатурації

виборі, якій-небудь групі тегів, відкривається вікно, яке представляє собою графік, з переглядом до 8 параметрів, організоване у вигляді шаблону в який завантажується файл параметрів, що відповідає обраній групі тегів. Мнемосхема "Історія" дозволяє стежити не тільки за поточними параметрами технологічного процесу, а й переглядати значення цих параметрів за різні проміжки часу.



Рис. 3.21. Проміжне вікно групи історій

Вікно мнемосхеми "Історія" є дуже зручним для оператора ПЕОМ, так як дозволяє визначити який параметр, де і в який момент часу вийшов за межі технологічного регламенту.

«АСУТП дефекосатурації» являє собою дві підсистеми - інформаційну та керуючу.

Інформаційна підсистема дозволяє здійснювати:

- організацію збору і первинної обробки інформації про стан технологічних параметрів і стан обладнання;
- надання інформації на дисплеї про хід технологічного процесу та роботу основного устаткування;
- протоколювання ходу технологічного процесу, уявлення трендів та графіків щодо процесу;
- збереження інформації при відключенні електроживлення та надійне зберігання технологічної програми управління за рахунок зберігання її в постійній незалежній пам'яті.

Керуюча підсистема являє собою:

- підсистему дистанційного керування, що дозволяє управляти виконавчими механізмами з ПЕОМ;
- підсистему локального та взаємозалежного управління технологічним процесом, вести процес відповідно до розроблених алгоритмів, за допомогою мікропроцесорних контролерів. Розрахунок та видача керуючих впливів здійснюється контурами регулювання;
- підсистему супервізорного управління процесом за стандартними ПД законам;
- підсистему автоматичної сигналізації по технологічному процесу.

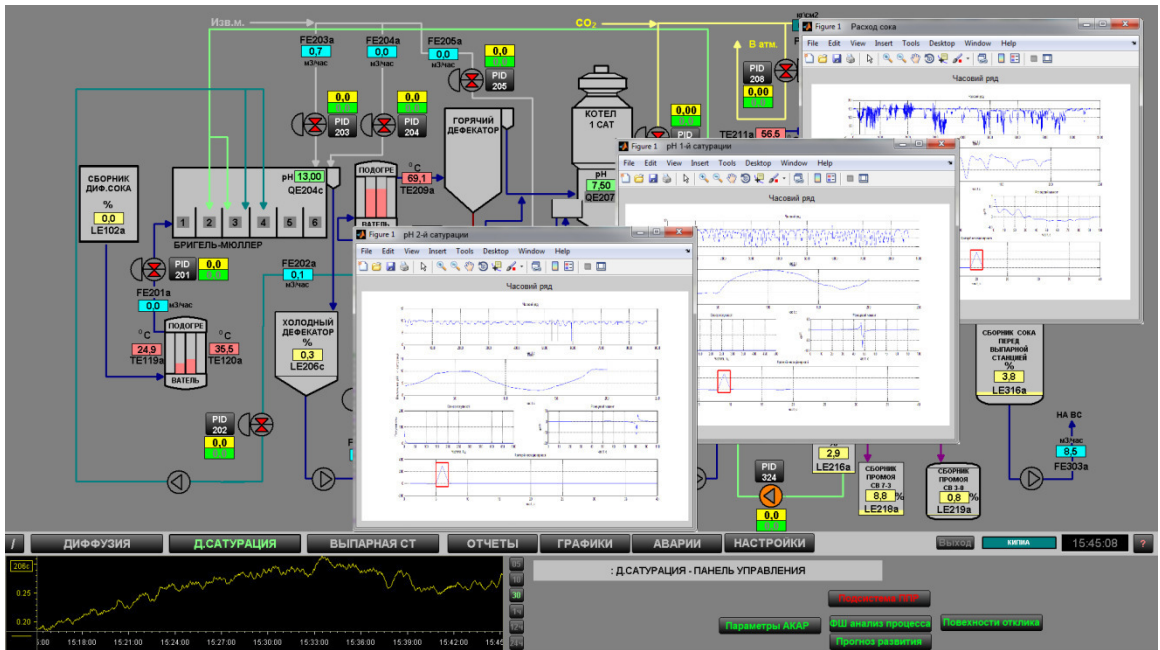


Рис. 3.22. Дисплейна мнемосхема процесу сокоочистки з підсистемою прогнозування

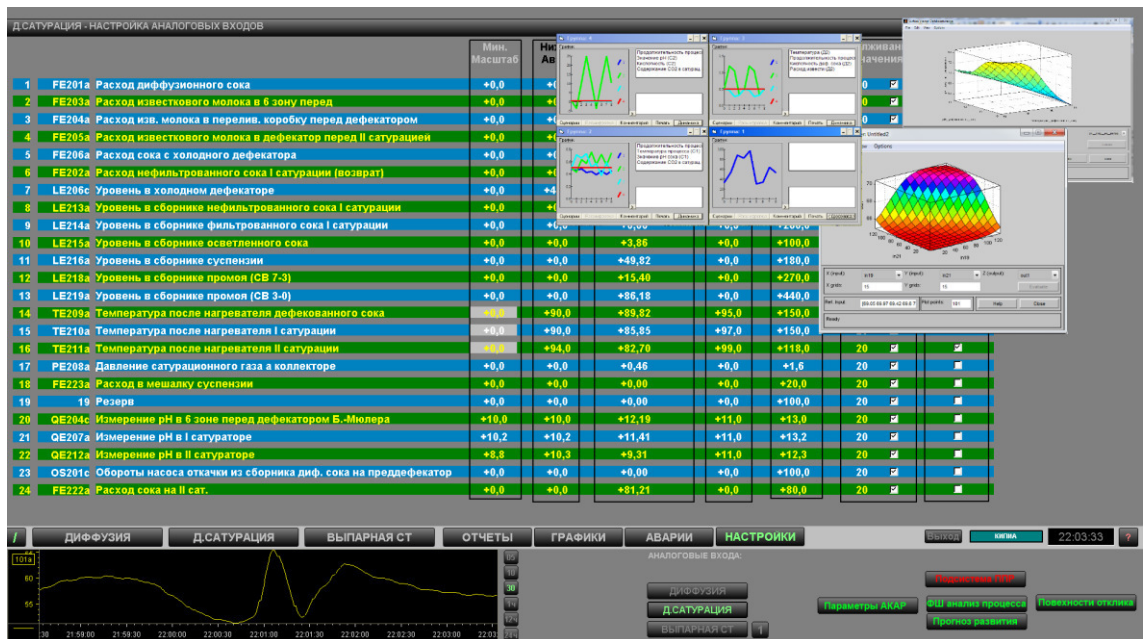


Рис. 3.23. Интерфейс коефіцієнтів законів керування та вікон підсистеми прогнозування і ППР

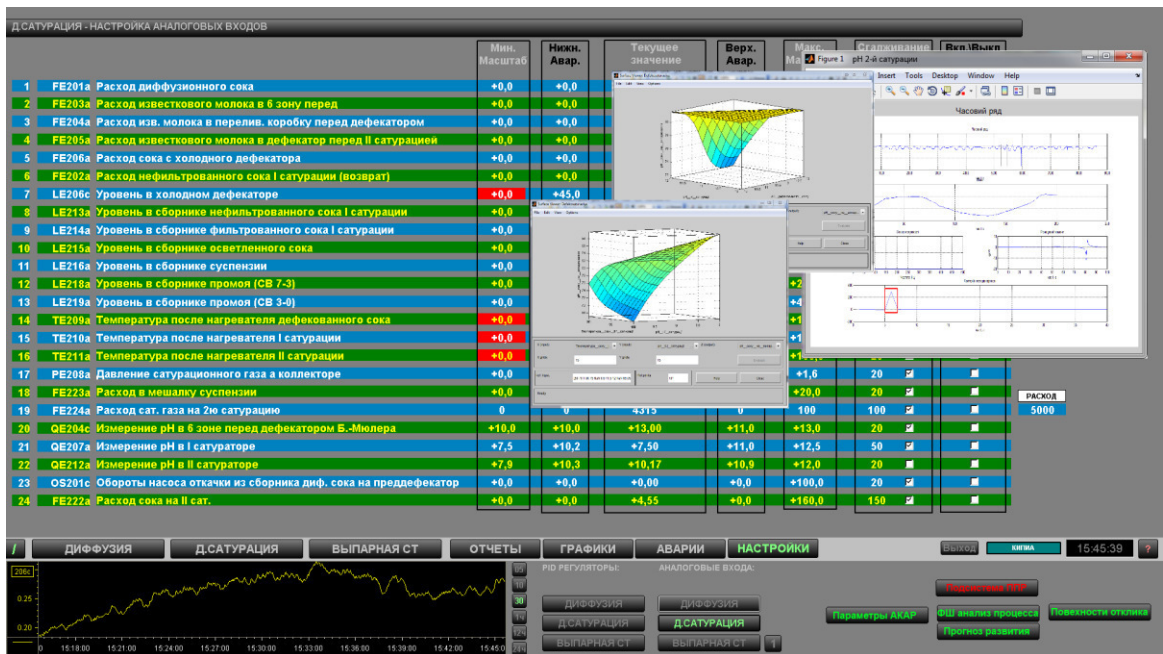


Рис. 3.24. Интерфейс підсистеми прогнозування та підтримки прийняття рішень з проблемними зонами параметрів керування

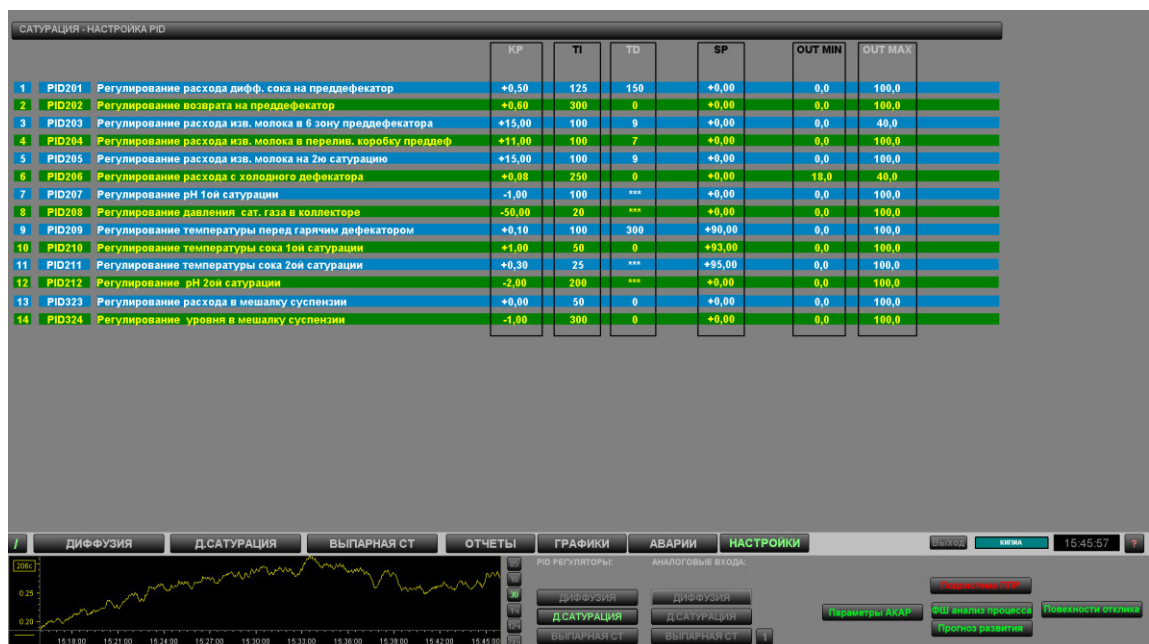


Рис. 3.25. Интерфейс підсистеми прийняття рішень «Настройки регуляторов»

Інтеграція підсистеми інтелектуального аналізу даних в інформаційну вертикаль цукрового виробництва з використанням MES систем – управління виробництвом наведена на рис. 3.26.

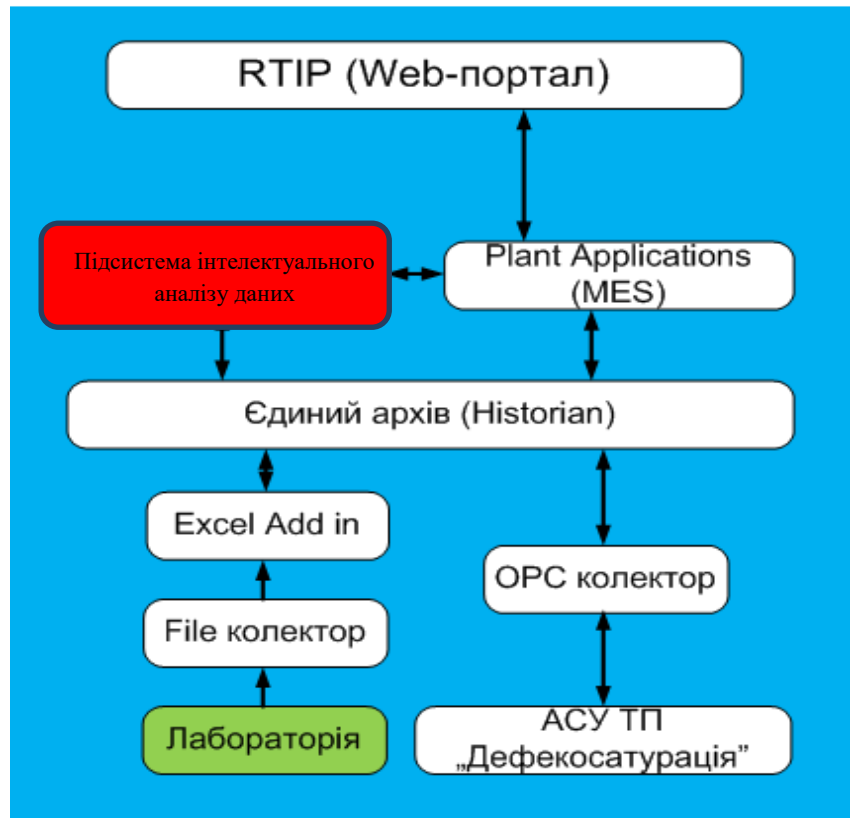


Рис. 3.26. Інтеграція підсистеми інтелектуального аналізу даних в інформаційну вертикаль цукрового заводу

ВИСНОВКИ 3-го РОЗДІЛУ

1. Система інтелектуального керування відділенням дефекосатурації цукрового заводу повинна бути адаптована до змін цілей, наборів і точності значень параметрів, а особливо при зміні режимів роботи однієї ділянки та вплив її на роботу інших. Тому для неї необхідно використовувати сучасні підходи моделювання технологічного процесу та формуванні управляючих діянь.

2. За використання ітеративних алгоритмів координації кожна наступна ітерація поліпшує показники ефективності функціонування технологічного комплексу, що уможливорює керування в реальному часі та зменшує витрати машинних ресурсів.

3. Алгоритми координації мають використовувати, по можливості, лише один нижній рівень математичних моделей підсистем технологічного комплексу, що істотно спрощує процедуру ідентифікації цих моделей.

4. Під час реалізації алгоритмів координації має бути незначний вплив евристичних способів[16].

5. За допомогою SCADAсистеми RSview32 була розглянута програма візуалізації, що являє собою дві підсистем: інформаційну та керуючу.

ВИСНОВКИ.

1. У ході виконання роботи було розглянуто метод очищення дифузійного соку у дефекосатураційному відділенні цукрового заводу, що включає обробку соку вапном (дефекація) та осадження її надлишку діоксином вуглецю (сатурація). Також були розглянуті три основні схеми очищення дифузійного соку, засновані на методі дефекосатурації. При аналізі цих схем була обрана найбільш раціональна схема з холодною прогресивною предефекацією та холодно-гарячою основною дефекацією.

На підставі обраної схеми була побудована структурна схема. Для побудови функціональної схеми розглянуті принципи управління окремими апаратами та технологічним процесом у цілому.

2. На базі літературних джерел проведено аналіз схем технологічного процесу дефекосатураційного відділення цукрового заводу, проаналізована методологія його інтелектуальної ідентифікації, існуючих характеристик динамічної системи для різних галузей науки та техніки та методи перетворення, розпізнавання та класифікації сигналів.

3. Проведено дослідження характеристик складної динамічної системи дефекосатураційного відділення, її хаотичних атракторів, часових рядів на основі вейвлетних, фрактальних та рекурентних методів аналізу сигналів.

4. Визначено алгоритми виявлення системних змін в об'єкті управління, встановлення типу поведінки об'єкта за рахунок аналізу часових рядів

5. Розроблена система інтелектуального керування складним технологічним комплексом дефекосатураційного відділення

6. Розроблено функціональну структуру та інтерфейс користувача інтелектуальної системи сценарного управління дефекосатураційним відділенням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Азрилевич, М. Я. Технологическое оборудование свеклосахарных заводов / М.Я. Азрилевич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пищевая пром-сть, 1979. – с. 334.
2. Анищенко, В.С. Знакомство с нелинейной динамикой / В.С. Анищенко. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 144 с.
3. Арнольд, В.И. Теория катастроф/ В.И. Арнольд. – М.: Едиториал УРСС, 2007. – 127 с.
4. Астаф'єва, Н. М. Вейвлет-аналіз: основи теорії і приклади застосування / Н. М. Астаф'єва. – Журнал Успіхи фізичних наук. - 1996. - Т. 166, № 11, С. 20-24.
5. Бахмаш, М. І. Буряковий цукор технології виробництва / М. І. Бахмаш, М. І. Ігнат'єв, І. А. Вітивський. – Кам'янець – Подільський: Абетка – НОВА, 2004. – 372 с.
6. Белайчук, Л.В. Как обнаружить джокер в эксперименте/Л.В. Белайчук, Г.Г. Малинецкий/ Матенелінійна динаміка матика. Компьютер. Образование. под ред. Г.Ю. Ризниченко – 1998. – Вып. 5. – Ч. II. – С. 17-31.
7. Бобровник, Л.Д. Физико-химические основы очистки в сахарном производстве / Л.Д. Бобровник. – Киев: Высшая школа, 1994. – 255 с
8. Бондаренко, М.Ф. Теория интеллекта: учебник./ М.Ф. Бондаренко, Ю.П. Шабанов-Кушнарченко. - Х.: ООО «Компания СМІТ», 2006. 576 с.
9. Бугаенко, И.Ф. Технологические отклонения в сахарном производстве / И.Ф. Бугаенко. – М.: Агропромиздат, 1986. – 262 с.
10. Букреев, В.С., Выявление закономерностей во временных рядах в задачах распознавания состояний динамических объектов/ В.С. Букреев, С.И. Колесникова, А.Е. Янковская. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 254 с.
11. Владимирский, Э.И., Синергетический подход к формированию интегральных размерностей в интеллектуальных информационно-измерительных системах/ Э.И.Владимирский, Ф.К. Тагиев// Информационные технологии. – 2010. – №6 (166). – С. 62-67.

12. Волкова, В.Н. Основы теории систем и системного анализа / В.Н.Волкова, А.А.Денисов. - СПб.: Издательство СПбГТУ, 1999.- 512 с.
13. Горшков, В.А. Идентификация временных рядов авиационных событий методами и алгоритмами нелинейной динамики/ В.А. Горшков, С.А. Касаткин. – М.: Бланк Дизайн, 2008. – 208 с.
14. Гребенюк, С.М. Технологическое оборудование сахарных заводов/ С.М. Гребенюк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лёгкая и пищевая пром-сть, 1983. – 520с.
15. Дубов, Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем/ Ю.А. Дубов, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. - М.: Наука,1986. – 296 с.
16. Дьяконов, В. MATLAB. Обробка сигналів і зображень: спец. довідник / В. Дьяконов, І. Абраменкова – СПб: Пітер, 2012. - 608 с.
17. Еременко, Б.А. Автоматическое управление процессами свеклосахарного производства: производственно-практическое издание / Б. А. Еременко. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 223 с.
18. Заець, О.С. Ринок цукру в Україні: проблеми створення, функціонування та розвитку/ О.С. Заець. -К.: Наук. думка, 2015. – 388 с.
19. Зигунов, А.М. Фильтрация оперативной информации в подсистеме технологического мониторинга диффузионным отделением сахарного завода/ А.М. Зигунов, В.Д. Кишенько//Восточно-Европейский журнал передовых информационных технологий. – Харьков, – 2010. – № 1/7 (43). – С. 10-13.
20. Ілюшин, Я.А. Теория и применение вейвлет-анализа/ Я.А. Ілюшин// Праці УНДІРТ. – Одеса, – 2003. – № 4(36). – С. 28-31.
21. Как обнаружить джокер в эксперименте [Текст]: сб. науч. тр. “Математика. Компьютер. Образование” / Под ред. Г. Ю. Ризниченко – Вып. 5. – Ч. II. – С. 17 – 31
22. Капица, С.П. Синергетика и прогнозы будущего [Текст] : научное издание / РАН; С. П. Капица, С. П. Курдюмов, Г. Г. Малинецкий; [Редкол.: И. М. Макаров (пред.) и др.]. - М. : Наука, 1997. - 285 с.

23. Кемайкин, В.К. Алгоритм Прямого Вейвлет-Преобразования Изображения/ В.К.Кемайкин, Е.А. Арнольдова // Международный Журнал «Программные Продукты и Системы». – 2016. – Т. 9. – 115 с.
24. Кисельов, А. Додатки вейвлет-аналізу / А. Кисельов [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://basegroup.ru/community> - 27.12.2020 р.
25. Комплекс програмного забезпечення для управління процесом цукрового виробництва України [Електронний ресурс] // Техінсервіс [сайт] / - Режим доступу: <http://www.techinservice.com.ua/> – 28.12.2020 р.
26. Ладанюк, А. П. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: підруч. / А. П. Ладанюк В. Г. Трегуб І. В. Ельперін, В. Д. Цюцюра. – К.:Аграрна освіта, 2001. – 224 с.
27. Ладанюк, А. П. Оперативное управление технологическими процессами пищевой промышленности / А. П. Ладанюк, В. Г. Перепечаенко. – К. : Урожай,1987. – 160 с.
28. Левалле, Ж. Вступ до аналізу даних із застосуванням безперервного вейвлет перетворення / Ж. Левалле; пер. з англ. В. Г. Грібуніна. - СПб: АВТЕКС, 1995. – 29 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.autex.spb.ru> – 25.12.2020р.
29. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники/ Б.Р. Левин. – Книга 1-я. – М.: Сов. Радио, 1974. – 552 с.
30. Лысянский, В. М. Процесс экстракции сахара из свеклы. Теория и расчет/ В. М. Лысянский– М.: Пищевая промышленность, 1973. – 223 с.
31. Ляшенко, С. А. Концепция повышения эффективности АСУ ТП при производстве сахара в Украине / С. А. Ляшенко, А. С. Ляшенко, И. С. Беляева // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Сучасні напрямки технології механізації процесів переробних і харчових виробництв». – Харків, 2008. – Вип. 74. – С. 54-63.
32. Ляшенко, С. А. Обоснование автоматического регулирования производственных процессов сахарных заводов / С. А. Ляшенко, А. М. Фесенко, А. С. Ляшенко, И. С. Беляева // Вісник Харківського національного

технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв». – Харків, 2009. – Вип. 88. – С. 104-109.

33. Малинецкий, Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики/ Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: Эдиториал УРСС, 2000, – 196 с.

34. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем/ М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – Пер. с англ. – М.:, 1973. – 344 с.

35. Моисеев, Н.Н. Математические задачи системного анализа/ Н.Н. Моисеев.- М.: Наука, 1981.- 487 с.

36. Перепелица, В.А. Визуализация критериального пространства в системах поддержки принятия решений/ В.А. Перепелица, Л.Н. Сергеева, А.Ю. Позднякова // Науковий вісник. Збірник наукових праць Академії державної податкової служби України. – Ірпінь – 2002.- вип. 1(15). – С.225-231.

37. Петерс, Э. Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка/ Э. Петерс.- М.: Мир, 2000.- 333 с.

38. Позднякова, А.Ю. Применение графического теста для анализа динамических систем с джокером/ А.Ю.Позднякова, Л.Н. Сергеева// Динамические системы.–2000. – Вып.16.– С.180-186.

39. Прodelки джокера на одномерном отображении [Текст]: сб. науч. тр. «Математика. Компьютер. Образование». – Пушкино. – 29.01– 3.02 1997 . – С. 24.

40.Руководство пользователя RSVIEW32. Новый облик функциональных возможностей человеко-машинного интерфейса [Текст] / Rockwell Software. – 1997. – 557 с.

41.Сапронов, А.Р. Технология сахарного производства / А.Р. Сапронов. – 2-е изд. – М.: Колос, 1999. – 495 с.

42. Сергеева, Л.Н. Моделирование поведения экономических систем методами нелинейной динамики(теории хаоса)/ Л.Н. Сергеева. – Запорожье: ЗГУ, 2002. – 227 с.

43. Силин, П. М. Технология сахара / П. М. Силин– М.: Второе издание. Пищевая промышленность, 1967. – 624 с.
44. Смирнов, В.Б. Ритмы и детерминированный хаос в геофизических временных рядах/ В.Б.Смирнов, А.В. Пономарев, Qian Jiadong, А.С. Черепанов// Физика Земли.– 2005 –№6 –С.6-28.
45. Хоменко, Т. Д. Сучасні схеми та обладнання для переробки цукрових буряків. Транспортування, очищення, отримання стружки і дифузійного соку: [навч. посіб.]. / Т. Д. Хоменко– К.: Сталь, 2006. – 240 с.
46. Шиляев, П.А. Фрактальный анализ поверхности слоев кремния, выращенных методом молекулярно-лучевого осаждения: Дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07/ П.А. Шиляев. – НГУ ім. Лобачевського. – Н. Новгород, 2005. – 133 с.
47. Шумарова, О.С. Оптимальный выбор вейвлета при обработке сигнала с вихретокового датчика/ О.С. Шумарова, С.А. Игнатьев // Вестник СГТУ. – 2013.– Т. 4, – № 73. – С. 128–132.
48. Яковлев, А.Н. Введение в вейвлет-преобразование: Учебное пособие/ А.Н. Яковлев. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2003. – 104 с.
49. Vacry, E. Singularity Spectrum of Fractal Signals: Exact Results, Journal of Statistical Physics/ Vacry, E., J. F. Muzy, A. Arneodo. – 1993 – 70 - 3/4, P. 635-674.
50. Daubechies, I. (1992) Ten Lectures on Wavelets. No.61 in CBMS-NSF Series in Applied Mathematics, SIAM, Philadelphia (Русский перевод: Добеши И. Десять лекций по вейвлетам/ И. Добеши. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 464с.).
51. Eckmann, J.-P. Recurrence plots of dynamical systems/ J.-P. Eckmann, O. Kamphorst, D. Ruelle. // Europhys. Lett. – 1987. – 4. – P. 973-977.
52. Gilmore, C.G. A new test for chaos/ C.G. Gilmore // Journal of economic behaviour and organization, – 1993. – №22. – P. 209-237.
53. Hurst, H.E. Long-term storage capacity of reservoirs/ H.E. Hurst // Trans. Amer. Soc. Civ. Eng. – 1951 – Vol.116. – P.770-808.

54. Kantelhardt , J. W. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series/ J. W. Kantelhardt, S. A. Zschiegner, E. Koncsienly-Bunde, S. Havlin, A. Bunde, H. E. Stanley// *Physica A* – 2002. –316. – P.87–114.
55. Mandelbrot, B.B. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications/ B.B. Mandelbrot, J.W. Van Ness. // *SIAM Review*. Vol.10, – 1968. – No.4, –P.422-437
56. March,T.K., Chapman S.C., Dendy R.O. Recurrence plot statistics and the effect of embedding/ T.K.March, S.C.Chapman, R.O. Dendy.//*Physica D*, – 2005. – 200, – P. 171-184.
57. Marwan, Norbert. Recurrence plots for the analysis of complex systems/ NorbertMarwan,M.CarmenRomano,MarcoThiel,JurgenKurths// *Physics Reports*. – 2007.– 438.– P. 237-239.
58. Marwan, N. Encounters with neighbours (current developments of concepts based on recurrence plots and their applications)/ NorbertMarwan. //PhD Thesis, University of Potsdam, 2003.
59. Packard, N.H. Geometry from a time series/ N.H.Packard, J.P.Crutchfield, J.D.Farmer, R.S.Shaw. //*Phys. Rev. Lett.*, –1980– №45. –P. 712-716.
60. Schreiber, T. Interdisciplinary application of nonlinear time series methods/T.Schreiber.//*Phys. Reports*, – 1999. – 308, –P. 1-64.
61. Zbilut, J.P. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots/ J.P.Zbilut, Jr. C.L. Webber //*Phys, Lett. A*, – 1992. –171. –P. 199-203.
62. Zbilut, J.P. Use of recurrence plots in the analysis of heart beat intervals/ J.P. Zbilut, M.Koebbe, H.Loeb, G.Mayer-Kress. //In: *Proc. IEEE Conference on Computers in Cardiology Chicago*, – 1991 – P. 263-266.