

Міністерство освіти і науки України  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ  
СИРОВИНИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СИСТЕМИ КЛЮЧОВИХ ПОКАЗНИКІВ  
ЕФЕКТИВНОСТІ

**ГАЧКОВСЬКА Марина Анатоліївна** – кандидат технічних наук,  
старший викладач кафедри автоматизації та робототехнічних систем ім. акад.  
І. І. Мартиненка

**НЕКРАШЕВИЧ Олена Василівна** – старший викладач кафедри  
автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного  
університету України "Київського політехнічного інституту імені  
Ігоря Сікорського"

РЕФЕРАТ

Київ – 2021

**Актуальність роботи.** Перед сільськогосподарською промисловістю України в нинішніх економічних умовах стоять невідкладні задачі покращення якості продукції, підвищення продуктивності виробництва, впровадження ресурсозберігаючих технологій. У розв'язанні цих задач суттєве значення має автоматизація технологічних процесів та їх оптимізація, які сприяють інтенсифікації виробництва завдяки контролю, регулюванню параметрів технологічних процесів, а також координації роботи виробничих ділянок переробки сільськогосподарської сировини.

Існуючі системи автоматизації технологічних процесів виробництва цукру не забезпечують прийняття оперативних рішень по керуванню через високу ступінь невизначеності технологічних параметрів, особливо показників якості сировини, напівфабрикатів та готової продукції, неврахування особливостей ситуаційної поведінки технологічного комплексу цукрового заводу, яка є багатоцільовою, різноплановою та мультिवаріантною через вплив значної кількості факторів технологічного та техніко-економічного характеру. Проблему оптимального керування процесів переробки сільськогосподарської сировини на прикладі технологічного комплексу цукрового заводу, що функціонує в таких умовах, можна розв'язати на основі сценарного підходу, розглядаючи об'єкт як складну динамічну систему, розвиток якої визначається еволюцією ситуаційно-значущих зон, відображеною в сценаріях керування. Визначальним джерелом підвищення ключових показників ефективності технологічного комплексу цукрового заводу як складної нелінійної динамічної системи є врахування явищ самоорганізації, на основі яких необхідно здійснити синтез систем ресурсоощадного синергетичного керування.

Розробка систем автоматизованого сценарно-синергетичного керування матеріальними потоками цукрового виробництва із застосуванням ключових показників ефективності дозволить підвищити якість продукції, знизити питомі ресурсні витрати, що є актуальною науково-технічною задачею.

**Метою** роботи є підвищення ефективності функціонування технологічного комплексу цукрового заводу шляхом створення автоматизованої системи керування матеріальними потоками із застосуванням ключових показників ефективності на основі реалізації ресурсоощадних алгоритмів багатокритеріального керування згідно з принципами та методами сценарного підходу та нелінійної динаміки.

У відповідності до цієї мети було вирішено **завдання:**

- з використанням системного аналізу, експертного опитування та когнітивного моделювання виявлено пріоритетні технологічні чинники забезпечення покращення якості продукції, підвищення продуктивності обладнання та зниження питомих витрат матеріальних ресурсів при виробництві цукру;

- проведено теоретичні та експериментальні дослідження технологічних процесів цукрового виробництва для встановлення явищ переміжності та ефектів самоорганізації, вивчення атрактивної поведінки об'єкта керування;

- розроблено сценарії та алгоритми багатокритеріального керування технологічним комплексом цукрового заводу з використанням мережевих моделей та аналізу виробничих ситуацій;

- розроблено діаграми моделей впливу для основних ключових показників ефективності, які відображають взаємозв'язок між значенням ключових показників ефективності та джерелом його вимірювання.

- здійснено синтез синергетичного керування матеріальними потоками технологічного комплексу цукрового заводу у відповідності із методологією аналітичного конструювання агрегованих регуляторів;

- створено структуру та розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення автоматизованої системи сценарно-синергетичного керування матеріальними потоками технологічного комплексу цукрового заводу із застосуванням ключових показників ефективності та з використанням сучасних інформаційних технологій.

**Об'єктом дослідження** є технологічний комплекс цукрового заводу.

**Предметом дослідження** є автоматизовані системи керування матеріальними потоками технологічного комплексу цукрового заводу, в основі побудови яких лежать моделі та алгоритми визначення оптимальних керувальних дій в умовах невизначеності.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених задач використовуються методи системного аналізу, методи нелінійної динаміки та детермінованого хаосу, вейвлет-аналізу, флікер-шумової спектроскопії, імітаційного моделювання, базові принципи сценарного підходу, методи синергетичного керування технологічними процесами та інтелектуальних систем. Вірогідність основних теоретичних положень і результатів досліджень підтверджувалась шляхом використання математичного моделювання та експериментальних даних.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному.

- на основі факторно-цільового та ситуаційного аналізу розроблені сценарії керування матеріальними потоками технологічного комплексу цукрового заводу, що дозволили реалізувати у виділених ситуаційно-значущих зонах багатокритеріальне оптимальне керування в умовах невизначеності;

- для технологічного комплексу цукрового заводу здійснений синтез синергетичних агрегованих систем керування, що забезпечує організацію ресурсощадних керувальних дій у відповідності з встановленими багатообразами-атракторами, які відображують оптимальні режими функціонування об'єкта із врахуванням ключових показників ефективності;

- одержали подальший розвиток методи аналізу технологічних процесів цукрового виробництва як складної організаційно-технічної системи з позиції нелінійної динаміки, що дозволило встановити переміжність в розвитку об'єкта, його самоорганізацію через виникнення дисипативних просторово-часових хаотичних структур, виявити наявність інваріантних багатообразів-атракторів в просторі параметрів порядку;

- одержали подальший розвиток математичні моделі технологічного комплексу цукрового заводу у відповідності з особливостями прояву атрактивної поведінки об'єкта;

- одержали подальший розвиток діаграми моделей впливу для основних ключових показників ефективності, які відображають взаємозв'язок між значенням ключових показників ефективності та джерелом його вимірювання.

- удосконалена структура автоматизованої системи керування матеріальними потоками технологічного комплексу цукрового заводу із

застосуванням ключових показників ефективності за рахунок введення синергетичного керування матеріальними потоками на основі сучасних інформаційно-управляючих платформ.

**Результати досліджень викладено:** 2 монографіях, 22 статтях, з них: 6 у наукових виданнях, що входять до науково-метричних баз Scopus, 16 – у наукових фахових виданнях України, 60 тезах наукових доповідей. За даною тематикою захищена 1 кандидатська дисертація. Сумарна кількість наукових праць – 84.

**Практична значимість.** За результатами проведених досліджень розроблено програмне та алгоритмічне забезпечення автоматизованої системи сценарно-синергетичного керування матеріальними потоками технологічного комплексу цукрового заводу із застосуванням ключових показників ефективності.

Результати наукової роботи передані для впровадження на ПАТ «Червонський цукровик» (Житомирська обл., Андрушівський р-н, смт Червоне), а також використовуються в навчальному процесі кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І. І. Мартиненка НУБіП України при викладанні дисциплін «Автоматизовані системи управління» та «Основи системного аналізу» під час підготовки фахівців технічних спеціальностей.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**Вступ.** Наведена актуальність роботи, яка відзначається необхідністю розробки системи автоматизації матеріальних потоків технологічного комплексу цукрового заводу для підвищення ефективності його функціонування.

**Перший розділ** присвячений аналізу технологічних процесів цукрового виробництва як складного об'єкта керування, оцінці рівня систем автоматизації дифузійного, сокоочисного та випарного відділень, означені проблеми керування матеріальними потоками цукрового заводу, охарактеризовані перспективи розвитку систем керування матеріальними потоками технологічного комплексу цукрового заводу на основі принципів та методів сучасної теорії автоматичного керування складними організаційно-технічними об'єктами.

Встановлено, що сучасні системи автоматизації цукрового заводу стосовно задач керування матеріальними потоками мають ряд недоліків: не враховується зв'язок між відділеннями за матеріальними потоками; оптимізація технологічних режимів проводиться в однокритеріальній постановці (за показником ритмічності), що не відображає реальну багатоальтернативність розвитку об'єкта в умовах невизначеності, яку можна врахувати за допомогою сценарного підходу. Технологічний комплекс цукрового заводу як складний нелінійний динамічний об'єкт керування в своїй поведінці характеризується наявністю явищ самоорганізації, що дає підставу для організації ресурсощадних стратегій керування методами синергетики.

**У другому розділі** на основі аналізу часових рядів змінних технологічного комплексу цукрового заводу проведена оцінка типів поведінки об'єкта з позиції нелінійної динаміки та детермінованого хаосу; здійснена реконструкція атракторів системи; встановлені топологічні структури та кількісні оцінки показників хаотичності, стохастичності та детермінованості часових рядів; розроблені моделі прогнозування поведінки об'єкта.

Проведені експериментальні дослідження на ПАТ «Червонський цукровик», обробка експериментальних даних з використанням графічного тесту Гілмора (рис.

1) дозволили виявити явища переміжності (intermittency), що характеризується чередуванням детермінованих, хаотичних (русел) та стохастичних режимів (джокерів).

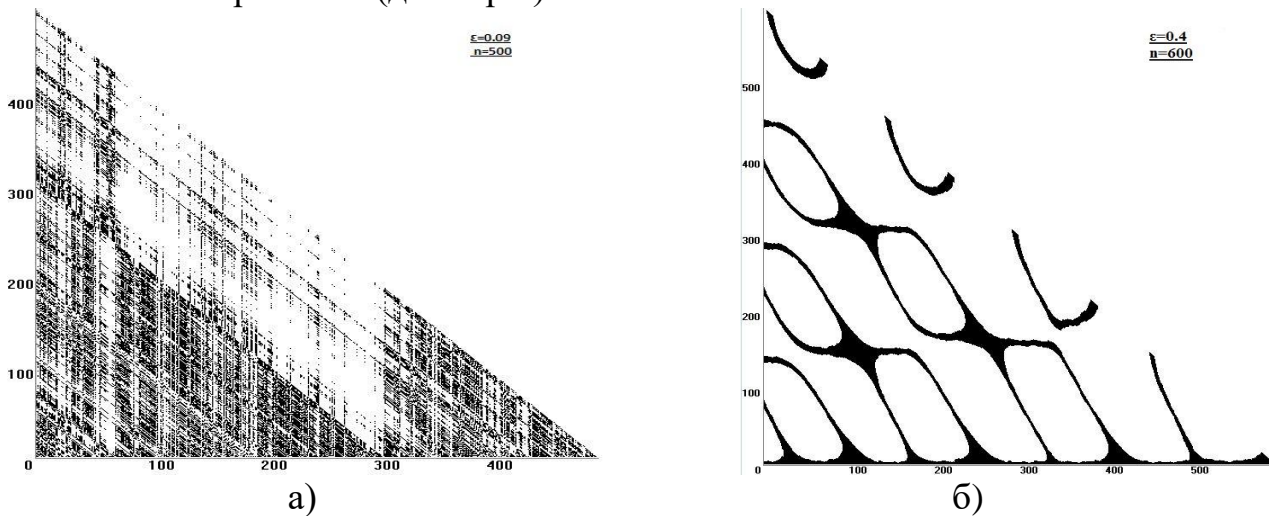


Рис. 1. Результати аналізу часових рядів графічним тестом Гілмора: а) витрати дифузійного соку; б) рН дифузійного соку

Якісна та кількісна оцінка переміжності поведінки об'єкта керування здійснювалась за допомогою рекурентних діаграм, що відображають властивості об'єкта у вигляді геометричних просторово-часових структур

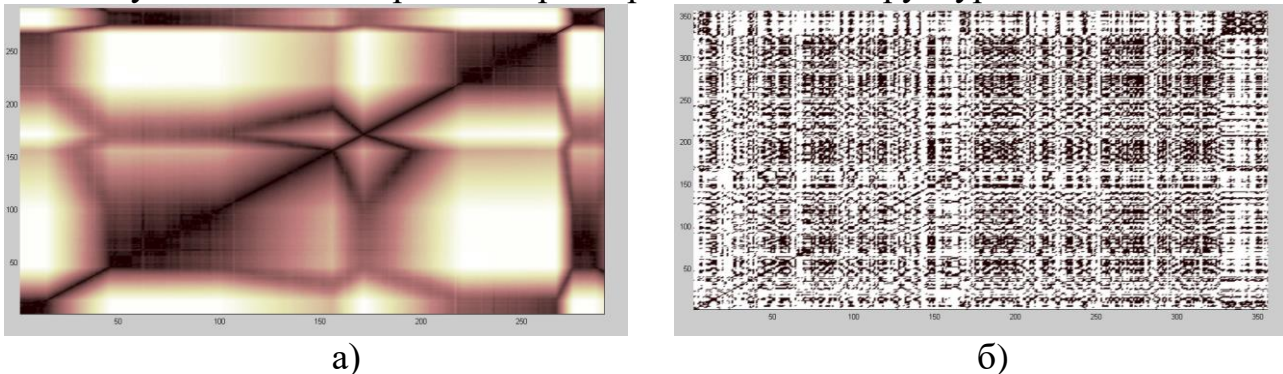


Рис. 2. Топологія рекурентних діаграм: а) витрати дифузійного соку (наявність дрейфу характеристик); б) температури дифузійного соку (наявність хаотичного процесу)

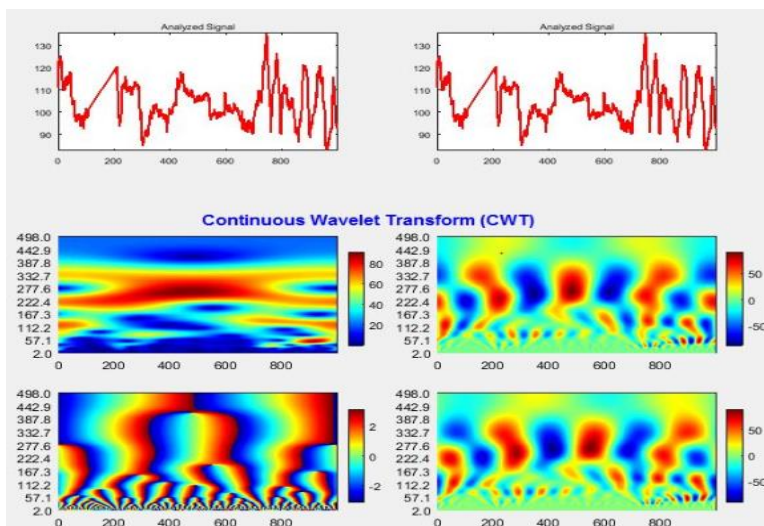


Рис. 3. Спектрограма вейвлет-перетворення сигналу витрати дифузійного соку

Аналіз явищ переміжності проводився також на основі вейвлет-перетворень технологічних змінних за допомогою вейвлетів Морле, що дозволило виділити області хаотичних та стохастичних режимів (рис. 3). Профіль вейвлет-поверхні в режимі хаотичної динаміки, що характеризується “всплеском” різномасштабних коливань, чітко локалізується внаслідок сильних змінювань у вигляді “провалів”, що дає



можливість діагностувати явища переміжності в реальному масштабі часу.

Експериментально встановлено, що об'єкт керування має атрактивну поведінку (рис. 4). Розмірність атракторів, що мають фрактальну структуру, визначалась за допомогою кореляційної розмірності  $D_2$  (рис. 5).

Аналіз складної поведінки об'єкта з переміжністю, що включає хаотичні прояви, проводився за часовими рядами окремих змінних: кореляційної ентропії Колмогорова  $H_2$ , показника Херста  $H$  (рис. 6) та фрактальної розмірності  $D$  (рис. 7, 8).

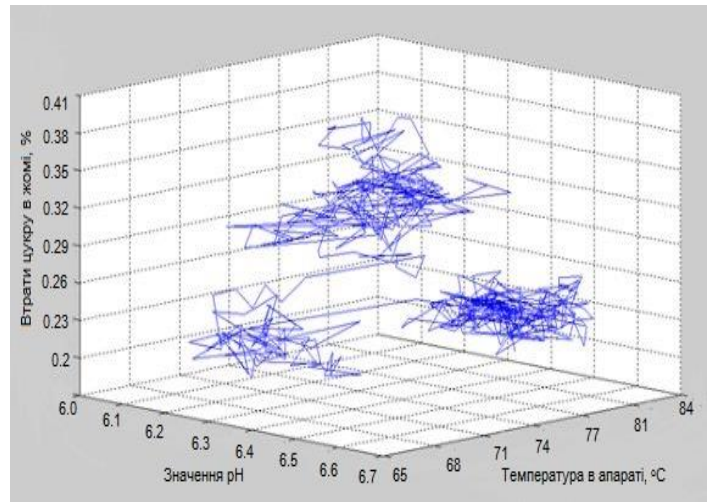
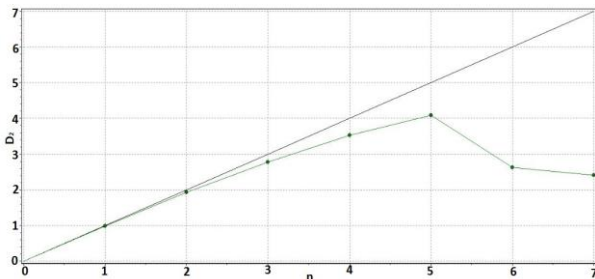
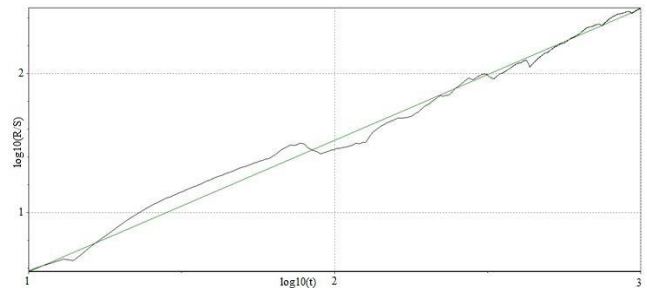


Рис. 4. Реконструйований фазовий портрет динамічної системи із атракторам



кореляційної розмірності  $D_2$  від розмірності вкладення  $n$  для витрати дифузійного соку



Херста  $H$ , на основі аналізу часового ряду витрати дифузійного соку

Отримані результати за наведеними показниками дають підставу стверджувати про наявність інтермітансу (встановлені значення фрактальної розмірності в часових рядах змінюються в межах близько 1,5, що свідчить про наявність стохастичних режимів, в межах 1,2-1,4, що характеризує хаотичні режими, в межах 1,0-1,1, що визначає наближеність до детермінованої поведінки), а також встановити кількісні показники хаотичності змінних.

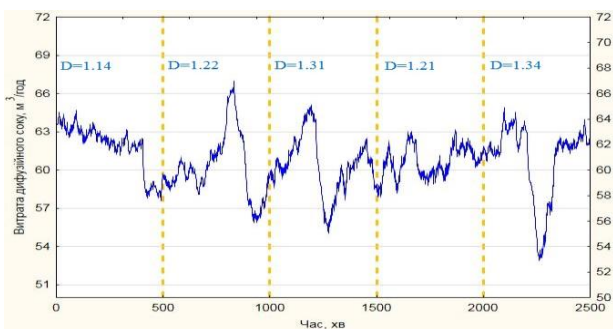


Рис. 7. Посегментне визначення фрактальної розмірності часового ряду витрати дифузійного соку

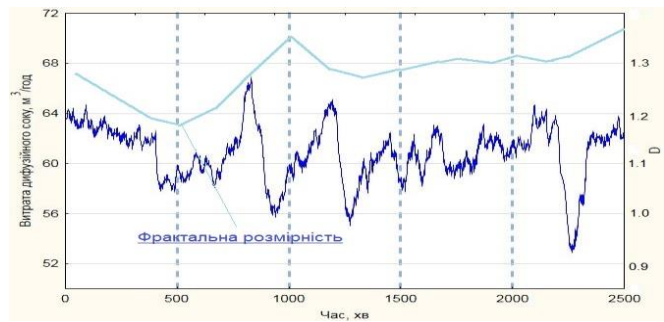


Рис. 8. Динаміка неперервної зміни фрактальної розмірності часового ряду витрати дифузійного соку

Для виявлення суттєвих системних змінювань в поведінці об'єкта

використаний метод флікер-шумової спектроскопії, який дозволяє виявити характерні змінювання у вигляді стрибків, всплесків, перепадів за різким змінюванням зони нестационарності, яка визначається на основі динаміки зміни функцій спектра потужності  $S(f)$  і різницевого моменту  $\Phi^{(2)}(\tau)$ , динамічної змінної  $V(t)$ , (рис. 9).

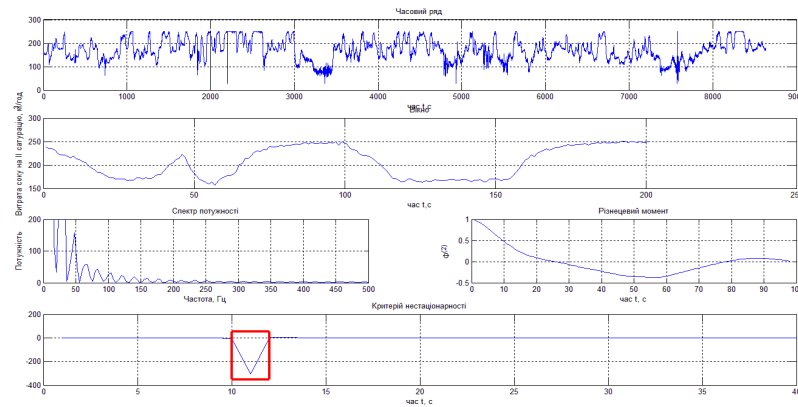


Рис. 9. Виявлення системних змінювань в об'єкті методом флікер-шумової спектроскопії

Розроблений алгоритм прогнозування системних змінювань інтегрований в систему сценарно-синергетичного керування матеріальними потоками технологічного комплексу цукрового заводу.

**В третьому розділі** на основі проведеного факторно-цільового, категорійно-функторного аналізу та когнітивного моделювання технологічного комплексу цукрового заводу розроблені сценарії керування матеріальними потоками, здійснена ідентифікація математичних моделей в ситуаційно-значущих зонах, проведена багатокритеріальна оптимізація технологічних процесів виробництва цукру в умовах невизначеності та ситуаційної зміни пріоритетності критеріїв при нечітких обмеженнях.

За результатами експериментальних досліджень технологічного комплексу ПАТ «Червонський цукровик» проведена ідентифікація математичних моделей у виділених ситуаційно-значущих зонах. Структурна ідентифікація здійснювалась шляхом аналізу моделей-конкурентів з різною структурою у вигляді степеневих поліномів другого порядку, розгляданням низки критеріїв ідентифікації, що визначають як точність, так і складність моделей (критеріїв детермінації, статистик Хокінга, Мелууса, Фішера, інформаційного критерію Акаїке). Параметрична ідентифікація математичних моделей в класі вибраних структур здійснювалась методом найменших квадратів. Значущість коефіцієнтів регресії оцінювалась на основі критерію Стюдента.

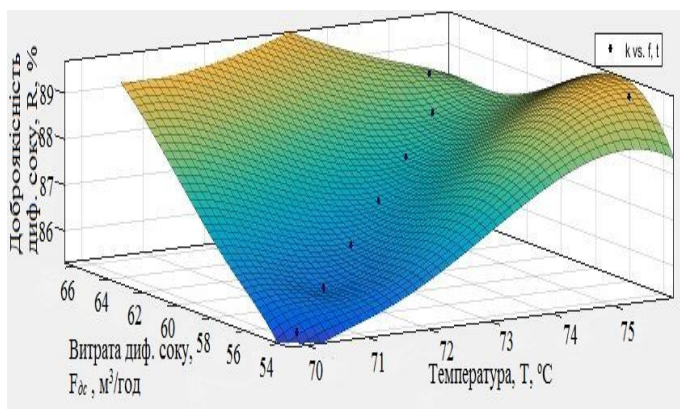
Наприклад, для процесу екстракції отримано такі моделі, поверхні відгуку яких наведені на рис. 10:

$$R(F_{cm}, F_{oc}, B, T) = 0.978227 \cdot F_{cm} + 1.997213 \cdot F_{oc} - 0.182513 \cdot B - 6.82361 \cdot T - 0.019547 \cdot F_{cm} \cdot F_{oc} + 0.007125 \cdot F_{cm} \cdot B + 0.192633 \cdot F_{cm} \cdot T + 0.004122 \cdot F_{oc} \cdot B + 0.2368 \cdot F_{oc} \cdot T - 0.00069 \cdot B^2 - 0.05496 \cdot T^2 - 0.00325 \cdot B \cdot T + 58.19 \quad (1)$$

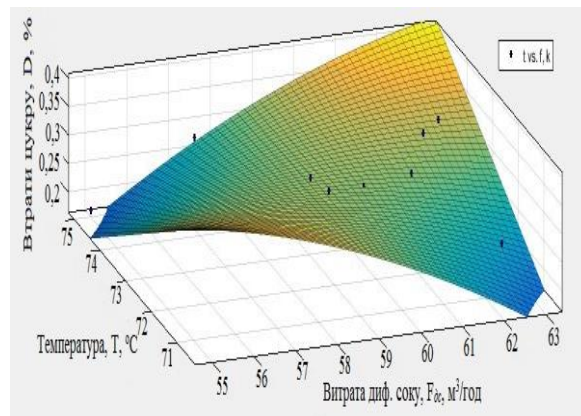
$$L(F_{cm}, B, T) = 3.728 \cdot F_{cm} + 0.7125 \cdot B + 0.428 \cdot T - 3.23 \cdot F_{cm}^2 + 0.273229 \cdot F_{cm} \cdot B + 0.0897 \cdot F_{oc} \cdot T - 0.0726 \cdot B - 0.0085 \cdot T - 0.0079 \cdot B^2 - 0.0537 \cdot T^2 - 37.5 \quad (2)$$

$$D(F_{cm}, B, F_{oc}, T) = 0.812532 \cdot F_{cm} + 0.213629 \cdot B - 0.135728 \cdot F_{oc} + 4.25637 \cdot T - 0.168873 \cdot F_{cm} \cdot B + 0.004138 \cdot F_{cm} \cdot F_{oc} + 0.114512 \cdot F_{cm} \cdot T + 0.003086 \cdot B \cdot F_{oc} - 0.4506 \cdot B \cdot T - 0.00091 \cdot F_{oc}^2 - 0.08954 \cdot T^2 - 0.13971 \cdot F_{oc} \cdot T + 6.257 \quad (3)$$

де  $R$  – доброякісність, %;  $L$  – продуктивність, %;  $F_{cm}$  – витрата бурякової стружки, м<sup>3</sup>/год;  $F_{oc}$  – витрата дифузійного соку, м<sup>3</sup>/год;  $B$  – дигестія, %;  $D$  – втрати цукру з жомом, %;  $T$  – температура, °С.



а)



б)

Рис. 10. Поверхні відгуку моделі а)  $R(F_{cm}, F_{oc}, B, T)$ ; б)  $D(F_{cm}, B, F_{oc}, T)$

В основі сценарного опису лежить поняття ситуаційно-значущої зони, яка визначається за нечіткими значеннями факторів, що характеризують певний технологічний процес.

Сценарій характеризує багатоваріантність вибору рішень в умовах невизначеностей з врахуванням цілей, факторів впливу на основі формування операцій та міжопераційних зв'язків. Формування сценаріїв керування технологічним комплексом цукрового заводу проводилось в два етапи: розробка абстрактного (А) сценарію, в якому неврахована внутрішня структура об'єктів та подальше розкриття операцій та міжопераційних зв'язків у структурному (С) сценарії на основі опису наборів властивостей-атрибутів.

С-сценарії формалізовані з використанням нечітких мереж Петрі з кольоровими фішками.

При розв'язанні задач оптимального керування технологічними процесами цукрового виробництва були виділені такі множини критеріїв:  $K_i^S$  – якість,  $P_i^S$  – продуктивність;  $W_i^S$  – втрати, ситуаційна згортка яких за схемою компромісу Парето при врахуванні умови ситуаційного змінювання пріоритетності критеріїв:

$$F = \bigcup_i \lambda_i^j \left( \bigcup_{j=1}^k A_i^j \right) \{ Q_i^j(A_i^j) \}, \quad (4)$$

де  $i$  – номер ситуаційно-значущої зони,  $i=1, \dots, n$ ;  $j$  – номер критерію,  $j=1, \dots, m$ ;  $k$  – кількість критеріїв керування;  $Q_i^j$  –  $j$ -ий критерій керування для ситуаційно-



значущої зони  $i$ ;  $A_i^j$  – набір параметрів для критерію  $Q_i^j$ ;  $\lambda_i^j$  – пріоритет критерію керування для  $i$ -ї ситуаційно-значущої зони.

Обмеження  $A_i^j$  є нечіткими і характеризуються відповідною ситуаційно-значущою зоною.

Багатокритеріальна оптимізація технологічних процесів дифузійного, сокоочисного та випарного відділення цукрового заводу у ситуаційно-значущих зонах проводилась з використанням методу досяжних цілей, згідно з яким знаходиться мінімальне значення коефіцієнта  $\gamma$ , із системи нерівностей:

$$\begin{cases} E(x_1, x_2, x_3) - K_p \gamma \leq P_0 \\ I(x_1, x_2, x_3, x_4) - K_k \gamma \leq K_0 \\ B(x_1, x_2) - K_w \gamma \geq W_0 \end{cases} \quad (5)$$

При нечітких обмеженнях: "*нижче\_норми*"  $< x_i <$  "*вище\_норми*", де  $E_0, I_0, W_0$  – сподівання при пошуку оптимального значення. Фактично, дані значення визначають точку в просторі критеріїв, до якої повинно прямувати оптимальне рішення;  $K_p, K_k, K_w$  – відповідні вагові коефіцієнти, які визначають, наскільки близько повинно бути рішення до оптимального результату. Чим ближче значення вагового коефіцієнта до нуля, тим більш важливим є критерій для пошуку оптимального рішення.

Розроблений алгоритм сценарно-синергетичного керування технологічним комплексом цукрового заводу, для змінювання параметрів синергетичних регуляторів виробничих установок цукрового заводу.

**В четвертому розділі** розроблено діаграми моделей впливу для основних ключових показників ефективності, які відображають взаємозв'язок між значенням ключових показників ефективності та джерелом його вимірювання. Це дозволило імплементувати технічні відповідники у структуру системи керування цукрового заводу для оцінки найбільш значимих для виробництва результатів та рівень їх ефективності в критично важливій області.

**В п'ятому розділі** здійснений синтез систем взаємозв'язаного керування матеріальними потоками технологічного комплексу цукрового заводу методом аналітичного конструювання агрегованих регуляторів. У рамках методології аналітичного конструювання агрегованих регуляторів розроблені нелінійні математичні моделі динаміки дифузійного, сокоочисного та випарного відділення.

Як приклад, розглянемо синтез системи керування дифузійним відділенням. Розроблена математична модель процесу екстракції має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dF_{cm}}{d\tau} &= -a_1 \cdot F_{cm} + a_2 \cdot F_{cm} \cdot R + a_3 \cdot \frac{F_{dc} \cdot B^2}{D \cdot T} + a_4 \cdot \frac{D \cdot B}{T} + a_5 \cdot T, \\ \frac{dF_{dc}}{d\tau} &= -a_6 \cdot \frac{F_{dc}}{T} - a_7 \cdot F_{cm} \cdot R - a_8 \cdot \frac{F_{dc} \cdot F_{cm} \cdot B}{D \cdot T} - a_9 \cdot D \cdot B \cdot R + a_{10} \cdot T, \\ \frac{dD}{d\tau} &= a_{11} \cdot \frac{F_{cm} \cdot B}{T} - a_{12} \cdot \frac{D}{T}, \\ \frac{dR}{d\tau} &= a_{13} \cdot \frac{F_{dc} \cdot B \cdot D}{T} - a_{14}, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $F_{cm}$  – витрата бурякової стружки, м<sup>3</sup>/год;  $F_{dc}$  – витрата дифузійного соку, м<sup>3</sup>/год;  $R$  – доброякісність, %;  $B$  – дигестія, %;  $D$  – втрати цукру з жомом, %;  $T$  – температура, °C;  $a_1 - a_{14}$  – параметри моделі визначаються шляхом ідентифікації багатомірних часових рядів за допомогою програмного середовища Vector ODE.

Згідно з методом аналітичного конструювання агрегованих регуляторів синтезували керувальні дії  $u_1(R, B, T)$  – витрата бурякової стружки,  $u_2(R, D, T)$  – витрата дифузійного соку, які забезпечують перехід системи з довільної точки в околицю атракторів-багатообразів  $\psi_1(R, B, T) = 0$  і  $\psi_2(R, D, T) = 0$ .

Для дослідження ефективності розробленої системи було проведено імітаційне моделювання шляхом порівняння функціонування розробленої системи із існуючими системами. Формування вхідних дій здійснювалось з використанням робастних планів експерименту Тагучі. Результати імітаційного моделювання при різних значеннях сигнал-шум наведені в табл. 1.

Табл. 1. Результати імітаційного моделювання

Відношення сигнал-шум, ( $Eta_{less-good}$ ) і ( $Eta_{more-good}$ )	Моделі існуючих системи керування			Імітаційні моделі керування		
	Добро-якісність	Втра-ти, %	Продук-тивність, м <sup>3</sup> /год	Добро-якісність	Втра-ти, %	Продук-тивність, м <sup>3</sup> /год
$Eta_{less-good} = -10 * \log_{10} \left( \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$	-	0,4	-	-	0,33	-
$Eta_{more-good} = -10 * \log_{10} \left( \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$	88,7	-	120	90,5	-	123,7

Проведені дослідження та виробничі випробовування запропонованих технічних рішень показали покращення якості продукції, збільшення продуктивності виробництва на 1,8 %, зменшення витрат енергоресурсів на 3,7 %, зменшення на 0,07 % втрат цукру.

Система сценарно-синергетичного керування матеріальними потоками технологічного комплексу цукрового заводу інтегрована в інформаційну вертикаль технологічного комплексу цукрового заводу. *Новизну та конкурентоспроможність запропонованих технічних рішень підтверджено актами впровадження.*

Основні положення роботи було представлено більш ніж на 40 національних та міжнародних конференціях, семінарах, з'їздах, що відносяться до наукових тем Національного університету біоресурсів і природокористування України відповідно до програм Міністерства освіти і науки України, яка входить до складу державної тематики «Розроблення ресурсоефективних режимів вирощування овочевої продукції в тепличних комплексах» (номер державної реєстрації 0117U003966).

За темою роботи опубліковано 84 наукові праці, у тому числі 2 монографії, 22 статті, з них: 6 у наукових виданнях, що входять до науково-метричної бази Scopus, 16 – у наукових фахових виданнях України, 60 тез наукових доповідей. Згідно науково-метричної бази даних Scopus загальна кількість посилань – 6, h-індекс (за роботою) = 2, бази даних Google Shcolar загальна кількість посилань – 12, h-індекс (за роботою) = 2. Отримано 2 патенти України на корисну модель та 2 свідоцтва про авторське право.

**Автори:**

**Гачковська М. А.**

**Некрашевич О. В.**