

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-66-73>

УДК 519.7

КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ САМООРГАНІЗАЦІЇ В НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМАХ

Кишенько В.Д., Горпинченко А.С.

CONTROL OF TECHNOLOGICAL OBJECTS OF SUGAR PRODUCTION ON THE BASIS OF SELF-ORGANIZATION IN NONLINEAR SYSTEMS

Kyshenko V.D., Gorpinchenko A.S.

*Встановлені в результаті досліджень визначальні особливості технологічних об'єктів цукрового виробництва, що відповідають в повній мірі ознакам складної організаційно-технічної системи. Однією із характерних ознак таких об'єктів є наявність *intermittanse*, тобто виникнення в часі переривчастих режимів: детермінованого, стохастичного та хаотичного із утворенням дисипативних просторово-часових структур. Така властивість забезпечує наявність процесів самоорганізації, що може забезпечити організацію ефективних стратегій ресурсоощадного керування. Таку задачу вирішують системи синергетичного керування. Регулятори із синергетичним керуванням забезпечують асимптотичну стійкість систем керування щодо їх бажаних режимів роботи, інваріантність до зміни різних факторів та робастність. Синтез законів синергетичного керування технологічними об'єктами цукрового виробництва виконаний на основі розробленої авторами методика. Ця методика дозволяє проводити оцінку параметрів нелінійних моделей завдяки експериментальній ідентифікації в різних ситуаційно-значущих зонах, чим забезпечується оперативність і точність керування. Синтезована синергетична система керування показала свою працездатність, стійкість та ефективність.*

Таким чином, побудова систем керування на засадах новітньої концепції ресурсоощадної організації керуючих стратегій на базі синергетичної парадигми забезпечує різючі перспективи для підвищення ефективності виробництва цукру. Синтез синергетичних регуляторів дозволяє не лише забезпечити стійкість технологічних процесів в складних та змінних умовах, але також сприяє оптимізації використання енергетичних й матеріальних ресурсів. Це дуже важливо для сучасного цукрового виробництва, де постійно

зростають вимоги щодо енергоефективності, зростання якісних кондицій продукції та забезпечення прибутковості виробництва. За цими результатами навіть під час проєктування автоматизованих систем керування, так і при модернізації існуючих технологічних ліній підприємств цукрової галузі, вдається вивести на новий рівень стандарти виготовлення. Так само, стандартні моделі керування можуть встати дорого й застарілі, немає єдиного ефективного алгоритму адаптації.

Ключові слова : цукрове виробництво, технологічний об'єкт, синергетичне керування, самоорганізація.

Вступ. Технологічні комплекси цукрового виробництва мають всі характерні властивості та ознаки складних організаційно-технічних систем [1], тобто новітнього класу об'єктів керування, що вимагають застосування сучасних здобутків теорії та практики керування. До визначальних властивих прикмет таких систем зараховують багатомірність, багатозв'язність та нелінійність [2,3]. Багатомірність, що характеризується значною кількістю різноманітних параметрів, що характеризують різні прояви технологічного характеру такого об'єкта керування [4] і стримує розвиток систем керування, побудованих на відомих сакраментальних підходах. Заодно з тим, для природних систем такого питання великої розмірності не буває - завдяки їм живим механізмам самоорганізації, гомеостазу [5].

Проблема багатозв'язності подолана в природних системах завдяки ієрархічності

побудови життєвих багаторівневих структур із забезпеченням взаємодії енергоматеріальних та інформаційних підсистем, коли на привілейовані рівні вищого порядку прибуває у агрегована інформація, а на нижніх рівнях інформація деталізується у згоді із принципом “розширення-стиснення” фазового простору [6], при цьому забезпечується здобуття жаданих цілей, які представляються як інваріантні багатообрази-атрактори [7].

Для створення продуктивних систем керування нелінійними системами користуються методами пасифікації [8], бекстеїнгу [9], робастного [10] та синергетичного [11] керування. Між них найбільш далекосяжними для нелегких технологічних об’єктів є методи синергетичного керування [12], які в абсолютній мірі ураховують фізико-хімічні атрибути технологічних процесів, відбивають явища природної самоорганізації, вбезпечують ресурсощадні режими діяльності, відзначаються витривалістю до зовнішніх збурень та структурних і параметричних еволюцій, санкціонують організацію пошуку цільових станів в різноманітних умовах, характеризуються неодмінною гнучкістю при варіації цілей та завдань, забезпечують значну надійність та здібність до відвертання критичних ситуацій [11].

Суть синергетичної концепції в завданнях керування зводиться до у використуванні істинних для складних систем фактів самоорганізації через творіння в терену станів об’єкта інформаційних атракторів та синергетичному взаємодіянні серед них завдяки малопотужному та економному коректуванню фазових траєкторій об’єкта, що дуже додає в ефективності його діяльності.

В обсязі синергетичного керування для технологічних комплексів доцільно застосувати методику розроблювання синергетичних регуляторів, яка дає можливість досягнення оптимальним шляхом цільових атракторів в об’єкті завдяки здійсненні аналітично визначених слабкопотужних керуючих впливів резонансного характеру [12].

Метою досліджень є розробка нелінійних моделей діяльності технологічних процесів цукрового виробництва відділень отримання дифузійного соку та сиропу (випарної станції), які визначають атрактори як інваріантні багатообрази в околі параметрів порядку, і здійсненню на їх базі стратегій керування, що заснують направлений пошук фазових

траєкторій об’єкта оптимальним шляхом між атракторами, вбезпечуючи при сім завдяки самоорганізації велику економію ресурсів підприємства.

Метою роботи є з урахуванням особливостей синергетичного підходу перейти до його практичного використання, що дозволить використати ефективні методи вирішення актуальних задач оптимального керування матеріальними потоками цукрового заводу. Завдання оптимального керування полягають в тому, що необхідно визначити такі методи дії на систему та параметри, які забезпечать найкращий, з точки зору критеріїв, фазовий перехід. Синергетичний принцип керування складними системами дозволяє змінювати структуру системи або переходити на інший рівень самоорганізації шляхом зміни параметрів порядку. Можливість зміни таких параметрів та межі, в яких вони можуть змінюватися, визначаються з допомогою синергетичного регулятора. В інформаційних системах синергетичний регулятор представлений у вигляді програмних засобів [5].

Виклад основного матеріалу дослідження. Метою синергетичного керування складними технологічними комплексами є встановлення та характеристика атракторів, як фокусів утворення дисипативних просторово-часових структур. Така процедура допускає оцінити діяльність складної системи з позицій самоорганізації у моменту різноманітних впливів як зовнішнього, так і внутрішнього характеру. Слід зауважити, що у випадку синергетичного керування складними системами особливу увагу потрібно приділити не силі дії на систему, а саме точності та характеру інформаційного керування, оскільки, саме точне інформаційне керування визначає ефективну організаційно-технічну структуру.

Існує два методи керування об’єктом на основі синергетичного підходу:

1. Керування шляхом зміни параметрів порядку. В результаті такої дії ми спостерігаємо нестійкість, порушення симетрії і границь складної нелінійної системи. Це призводить до можливих декількох сценаріїв поведінки системи після фазового переходу.

2. Керування шляхом зміни початкових умов. В результаті такої дії спостерігається можливість розвитку системи по декільком напрямкам, включаючи і хаотичну поведінку. Складність такого підходу полягає в тому, що не завжди можна змінити початкові умови. Інколи вони жорстко фіксовані.

Кожен із цих методів застосовується тоді, коли інший використати неможливо. Так, наприклад, якщо є можливість із множини характеристик і параметрів системи визначити саме множину параметрів порядку і немає можливості змінювати вхідні умови, то використовується перший підхід. Якщо множина параметрів занадто велика, або визначити їх не можна через складні взаємозв'язки в середині системи, то необхідно використати другий підхід.

Отже, алгоритмом синергетичного керування вільно найменувані черговість керуючих дій і оцінку наслідків в ході діяльності, а також шансів зміни параметрів порядку при адаптації.

Якщо розглядається керування дивним атрактором, то його поведінка має хаотичний характер. При переводі системи із однієї фазової траєкторії в іншу, необхідно здійснити один або декілька слабких інформаційних змін параметрів порядку. Кожен із них окремо не призводить до кардинальних змінювань системи, проте, якщо це робиться за певною схемою, то вмикається ефект «гойдалки». І досить незначні інформаційні впливи можуть змінити фазову траєкторію системи. Якщо правильно вибирати траєкторію і силу дії таких інформаційних потоків, то можна достатньо ефективно і з малими затратами енергії керувати системою в цілому [12].

Отже, робимо висновки, що в основі синергетичного методу керування складними технічними системами полягає принцип інформаційного впаду на виміри порядку, в гранях якого система чутлива і відтворюються її внутрішні властивості. Резонансний вплив – це вплив не силою дії, а правильно організовані, тобто узгоджені із внутрішніми властивостями, слабо потужні дії, що приводять систему до руху у заданому напрямку.

Оцінивши поведінку системи, робимо висновки, що характеризується нелінійними особливостями. Для розробки таких систем і для організації ефективного керування, належить застосувати методіку опрацювання синергетичних регуляторів [12]. Така методика

дозволяє сформулювати закони керування u_i , що забезпечують ефективне керування технологічними процесами цукрового виробництва. Здійснений синтез систем

синергетичного керування дифузійним відділенням та випарною станцією

Проведені експериментальні дослідження технологічних процесів цукрового виробництва і здійснена на базі часових рядів змінних об'єктів реконструкція атракторів дозволила встановити наявність атрактивних зон в різних виробничих ситуаціях (рис.1), що організовує потрібні обставини для ефективного використання синергетичних регуляторів.

Реконструкцію атрактора проводимо в програмному середовищі MATLAB® (рис. 1).

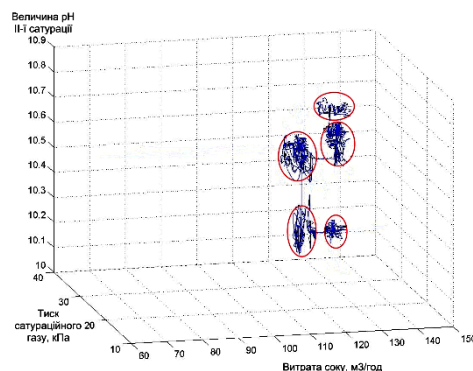


Рис. 1. Реконструйований фазовий портрет об'єкта з областями притягування (атрактор)

Математична модель (1) описує процес екстракції цукру з бурякової стружки:

$$\begin{aligned} \frac{dF_{cm}}{d\tau} &= -a_1 * F_{cm} + a_2 * F_{dc} * R + a_3 * \frac{F_{dc}^2 * B}{D * T} + a_4 * \frac{D * B}{T} + a_5 * T \\ \frac{dF_{dc}}{d\tau} &= -a_6 * \frac{F_{dc}}{T} - a_7 * F_{cm} * R - a_8 * \frac{F_{dc} * F_{cm}}{D * T} - a_9 * D * B * R + a_{10} * T \\ \frac{dD}{d\tau} &= a_{11} * \frac{F_{cm} * B}{T} - a_{12} * \frac{D}{T} \\ \frac{dR}{d\tau} &= a_{13} * \frac{F_{dc} * B * D}{T} - a_{14} \end{aligned} \quad (1)$$

де F_{cm} – витрата бурякової стружки, м³/год; F_{dc} – витрата дифузійного соку, м³/год; R – доброякісність, %; B – дигестія, %; D – втрати цукру з жомом, %; T – температура, °С; $a_1 - a_{14}$ – параметри моделі визначаються шляхом ідентифікації багатомірних часових рядів використовуючи середовища Vector ODE [12]. В таблиці 1 наведені значення параметрів моделі дифузійного апарата в різних умовах та ситуаціях.

Таблиця 1

Значення параметрів моделі дифузійного апарата

Номер зони	a1	a2	a3	a4	a5	a13	a14
S1.1	0.050	1.57	28.33	0.13	1.70	0.09	0.98
S1.2	0.055	1.73	31.16	0.14	1.87	0.11	1.07
S1.3	0.054	1.70	30.60	0.15	1.83	0.10	1.05
S1.4	0.053	1.72	30.88	0.14	1.82	0.10	1.06
S2.1	0.052	1.75	30.03	0.13	1.84	0.11	1.03
S2.2	0.057	1.66	30.31	0.14	1.79	0.12	1.04
S2.3	0.056	1.65	30.46	0.14	1.77	0.10	1.09
S2.4	0.057	1.65	29.44	0.14	1.74	0.10	1.02
S2.5	0.055	1.65	29.75	0.13	1.78	0.13	1.00
S2.6	0.057	1.65	29.18	0.13	1.75	0.09	1.10
S2.7	0.053	1.68	29.35	0.13	1.91	0.98	1.11
S2.9	0.068	1.69	31.55	0.13	1.98	0.95	1.06
S3.1	0.056	1.70	31.55	0.14	1.99	0.97	1.04
S3.2	0.056	1.65	31.78	0.14	1.89	0.93	1.09

В якості керування u_1 вибираємо значення витрати бурякової стружки, F_{cm} , в якості керування u_2 вибираємо значення витрата дифузійного соку F_{dc} . Згідно із методикою закони керування залежать від (2)

$$u_1(R, B, T); u_2(R, D, T) \quad (2)$$

Використавши метод аналітичного конструювання регуляторів, визначені керувальні дії. Для подальшого дослідження необхідно розглянути інваріантні багато образи (3).

$$\begin{aligned} \psi_1(R, B, T) &= 0 \\ \psi_2(R, B, T) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Паралельно послідовний розгляд інваріантних багатообразів дозволяє розглядати інваріанти, як атрактори із зонами протягування при застосуванні законів керування $u_1(R, B, T); u_2(R, D, T)$.

Відбувається рух системи у фазовому просторі до перетину багато образів $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$. Оскільки доброякісність та температура не можуть безпосередньо впливати на керування u_1 , u_2 , то необхідно забезпечити такий зв'язок через ψ_i (4).

$$\begin{aligned} \psi_1 &= R + T + v(B) \\ \psi_2 &= R + T + v(D) \end{aligned} \quad (4)$$

де V - деяка функція залежності реальних технологічних параметрів.

Виходячи із залежностей (3) та (4) отримуємо (5).

$$\begin{aligned} R + T + v(B) &= 0 \\ R + T + v(D) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Зміна макрозмінних ψ_1 та ψ_2 підпорядковуються функціоналу (6).

$$T_i \psi_i(\tau) + \psi_i(\tau) = 0 \quad (6)$$

На основі рівняння моделі та рівняння (6) отримуємо:

$$\begin{aligned} T_1 \left[\frac{dR}{dt} + \frac{dT}{dt} + \frac{\partial v}{\partial B} * \frac{dB}{dt} \right] + R + T + v(B) &= 0 \\ T_2 \left[\frac{dR}{dt} + \frac{dT}{dt} + \frac{\partial v}{\partial D} * \frac{dD}{dt} \right] + R + T + v(D) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Та закони взаємозв'язного керування (8) технологічними процесами дифузійного відділення цукрового заводу:

$$\begin{aligned} u_1 &= -\frac{R+v}{T*T_1} - \frac{T-B^2}{T} * R * F_{dc} - \frac{T-B^2}{T} * \frac{B}{T} * \frac{F_{dc}^2}{D} + \left(\frac{B+T}{T} - \frac{T-B^2}{T} \right) * F_{dc} + \\ &+ \left(\frac{T-B^2}{R} - \frac{T-B^2}{B} - R * \frac{B}{T} * \left(\frac{B}{T} \right)^2 \right) * D + \frac{T-B^2}{B} \\ u_2 &= -\frac{D+v}{T*T_2} - \frac{B}{T} * D * R * \frac{T*B^2}{T} * \frac{B}{T} * \frac{F}{D} + \frac{T*B^2}{T} * R * F - \\ &- \left(B + \frac{B}{T} \right) * \frac{R}{D} + \left(\frac{B^2+T^2}{T} - \frac{T-B^2}{T} \right) * F + \frac{T*B^2}{T} * \frac{F*R}{D^2} - \\ &- \left(\frac{T-B^2}{T} + \frac{T-B^2}{T} \right) * \frac{F}{D^2} + \frac{T*B^2}{T} * D \end{aligned} \quad (8)$$

де T_1, T_2 – параметри синергетичного регулятора.

Параметрами настроювання законів керування, які впливають на якість динаміки процесів і ефективно викликають самоорганізацію системи, є часові параметри – постійні часу T_1, T_2 . Проведені дослідження синтезованої системи синергетичного керування дозволили визначити оптимальні значення параметрів T_1 і T_2 за критеріями тривалості і ресурсозатрат (рис.2).

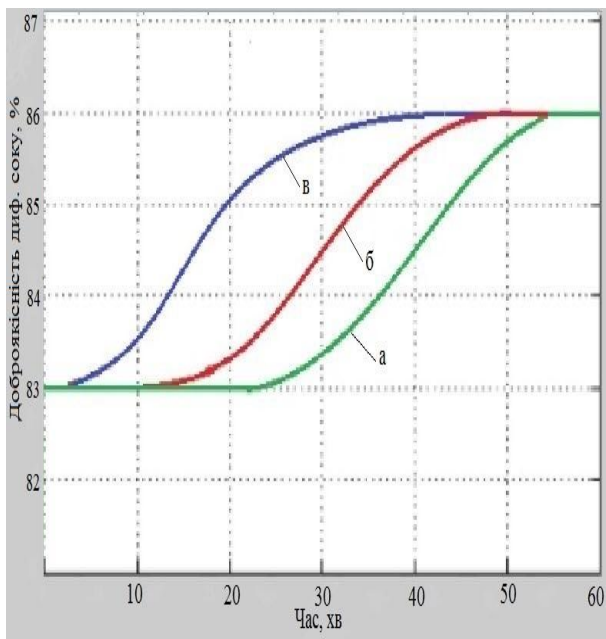


Рис.2. Перехідний процес регулювання доброякісності дифузійного соку:
 а – при $T_1=160$ с; $T_2=180$ с; б – при $T_1=80$ с; $T_2=100$ с; в – при $T_1=10$ с; $T_2=20$ с

Параметри настройки законів керування регламентують час регулювання T_1, T_2 . Умовою стійкості системи являються значення: $T_1 > 0, T_2 > 0$.

Математична модель (9) описує процес отримання сиропу:

$$\begin{aligned} \frac{dF_{dc}}{dt} &= -p_1 * F_{dc} + p_2 * F_c * R + p_3 * \frac{F_c^2 * C_{cp}}{h * T} + p_4 * \frac{h * C_{cp}}{T} + p_5 * T \\ \frac{dF_c}{dt} &= -p_6 * \frac{F_c}{T} - p_7 * F * R - p_8 * \frac{F_c * F_{dc} * C_{cp}}{h * T} - p_9 * h * C_{cp} * R + p_{10} * T \\ \frac{dh}{dt} &= p_{11} * \frac{F_{dc} * C_{cp}}{T} - p_{12} * \frac{h}{T} \\ \frac{dR}{dt} &= p_{13} * \frac{F_c * C_{cp} * h}{T} - p_{14} \end{aligned} \tag{9}$$

де F_{dc} – витрата соку фільтрованого соку, м³/год; F_c – витрата сиропу, м³/год; R – доброякісність, %; C_{dc} – вміст сухих речовин, %; h – рівень у випарній установці, м; T – температура, °C; $p_1 - p_{14}$ – шляхом ідентифікації багатомірних часових рядів визначаються параметри моделі використавши програмне середовища Vector ODE [12]. В таблиці 2 наведені значення параметрів моделі випарної станції в різних умовах та ситуаціях.

В якості керування u_1 вибираємо значення витрати бурякової стружки, F_{dc} , в якості керування u_2 вибираємо значення витрата дифузійного соку F_c .

Згідно із методикою побудови синергетичних регуляторів закони керування залежать від [10]:

$$u_1(R, C, T); u_2(R, h, T). \tag{10}$$

Відповідно до методу аналітичного конструювання агрегованих регуляторів, визначені керувальні дії. Для подальшого дослідження необхідно розглянути інваріантні багатообрази [11]:

$$\begin{aligned} \psi_1(R, C, T) &= 0 \\ \psi_2(R, h, T) &= 0 \end{aligned} \tag{11}$$

Таблиця 2

Значення параметрів моделі випарної станції

Номер зони	p1	p2	p3	p4	p5	p13	p14
S5.1	0.080	0.57	08.33	1.13	1.74	1.09	2.98
S5.2	0.085	0.73	01.16	1.14	1.88	1.11	2.07
S5.3	0.084	0.70	00.60	1.15	1.89	1.10	2.05
S5.4	0.083	0.72	00.88	1.14	1.72	1.10	2.06
S5.5	0.082	0.75	00.03	1.13	1.64	1.11	2.03
S5.6	0.087	0.66	00.31	1,14	1.59	1.12	2.04
S5.7	0.086	0.65	00.46	1.14	1.57	1.10	2.09

Паралельно послідовний розгляд інваріантних багатообразів дозволяє розглядати інваріанти, як атрактори із зонами протягування при застосуванні законів керування $u_1(R, C, T); u_2(R, h, T)$.

Відбувається рух системи у фазовому просторі до перетину багатообразів, $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$.. Оскільки (12) доброякісність та температура не можуть безпосередньо впливати на керування, u_1, u_2 , то необхідно забезпечити такий зв'язок через ψ :

$$\begin{aligned} \psi_1 &= R + T + v(C) \\ \psi_2 &= R + T + v(h) \end{aligned} \tag{12}$$

де v - деяка функція залежності реальних технологічних параметрів.

Виходячи із залежностей (11) та (12) отримаємо [12]: (13).

$$\begin{aligned} R + T + v(C) &= 0 \\ R + T + v(h) &= 0 \end{aligned} \tag{13}$$

Зміна макрозмінних ψ_1 та ψ_2 підпорядковуються функціоналу (14).

$$T_i \psi_i(\tau) + \psi_i(\tau) = 0 \tag{14}$$

На основі рівняння моделі та рівняння (14) отримаємо (15).

$$\begin{aligned} T_1 \left[\frac{dR}{dt} + \frac{dT}{dt} + \frac{\partial v}{\partial C} * \frac{dC}{dt} \right] + R + T + v(C) &= 0 \\ T_2 \left[\frac{dR}{dt} + \frac{dT}{dt} + \frac{\partial v}{\partial h} * \frac{dh}{dt} \right] + R + T + v(h) &= 0 \end{aligned} \tag{15}$$

Та закони взаємозв'язного керування [12] технологічними процесами дифузійного відділення цукрового заводу (16).

$$\begin{aligned} u_1 &= -\frac{R+v}{T^*T_1} - \frac{T-C^2}{T} * R * F_{dc} - \frac{T-C^2}{T} * \frac{C}{T} * \frac{F_{dc}^2}{h} + \left(\frac{C+T}{T} - \frac{T-C^2}{T} \right) * F_{dc} + \\ &+ \left(\frac{T-C^2}{R} - \frac{T}{C} \right) - R * \frac{C}{T} * \left(\frac{C}{T} \right)^2 * h + \frac{T}{C} \\ &+ \frac{T-C^2}{T} \\ u_2 &= -\frac{h+v}{T^*T_2} - \frac{C}{T} * h * R * \frac{T^*C^2}{T} * \frac{C}{T} * \frac{F}{h} + \frac{T^*C^2}{T} * R * F - \\ &- \left(C + \frac{C}{T} \right) * \frac{R}{h} + \left(\frac{C^2+T^2}{T} - \frac{T-C^2}{T} \right) * F + \frac{T^*C^2}{T} * \frac{F * R}{h^2} - \\ &- \left(\frac{T-C^2}{T} + \frac{T-C^2}{T} \right) * \frac{F}{h^2} + \frac{T^*C^2}{T} * h \end{aligned} \tag{16}$$

де T_1, T_2 – параметри синергетичного регулятора.

На основі розроблених законів керування (u_1, u_2) можна сформулювати рекомендації у вигляді визначення характеру зміни часу регулювання (T_1, T_2): «збільшити», «зменшити» і т.д. Для використання цих рекомендацій у системі автоматизованого керування необхідно визначити кількісні характеристики цих рекомендацій. В результаті проведених досліджень 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.

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

Висновки. Проведені дослідження підтвердили, що технологічні об'єкти цукрового виробництва належать до складних організаційно-технічних систем, для яких характерні багатовимірність, багатозв'язність, нелінійність та наявність переривчастих режимів функціонування. Такі особливості обумовлюють виникнення процесів самоорганізації та формування дисипативних просторово-часових структур, що створює передумови для застосування синергетичного підходу до керування технологічними процесами.

У роботі обґрунтовано доцільність використання синергетичного керування для підвищення ефективності функціонування технологічних комплексів цукрового заводу. На основі експериментальних досліджень та аналізу часових рядів технологічних параметрів було виконано реконструкцію фазових портретів процесів та виявлено області притягування атракторів, що характеризують різні режими роботи системи. Це дозволило визначити ситуаційно-значущі зони функціонування технологічних об'єктів та провести ідентифікацію параметрів їх нелінійних моделей.

З використанням методики аналітичного конструювання агрегованих регуляторів синтезовано закони синергетичного керування для основних відділень цукрового виробництва — дифузійного та випарного. Отримані закони керування забезпечують спрямований рух системи у фазовому просторі до заданих інваріантних багатообразів-атракторів, що відповідають оптимальним режимам функціонування технологічного процесу.

Проведене моделювання показало, що параметри налаштування синергетичних регуляторів (часові параметри T_1 та T_2 визначають швидкість перехідних процесів та якість регулювання, при цьому система зберігає стійкість за умови $T_1 > 0$ та $T_2 > 0$). Отримані результати підтвердили працездатність синтезованої системи керування, її робастність до зовнішніх збурень та здатність забезпечувати стабільні режими роботи технологічних процесів.

Таким чином, застосування синергетичного підходу до керування технологічними об'єктами цукрового виробництва дозволяє ефективно використовувати властивості самоорганізації складних систем, забезпечувати оптимальні режими роботи обладнання та зменшувати витрати енергетичних і матеріальних ресурсів. Запропоновані методи можуть бути використані як під час проєктування нових автоматизованих систем керування, так і при модернізації існуючих технологічних ліній підприємств цукрової промисловості з метою підвищення їх ефективності, надійності та якості продукції.

Література

- Ladanyuk A., Kyshenko V., Smityuh Y. The biotech complexes control in conditions of situational uncertainty. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*. 2012. No. 60. P. 149–154.
- Смітюх Я., Ладанюк А., Кишенько В. Сценарний підхід при автоматизації технологічних процесів : монографія. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. 184 с.
- Haken H. *Synergetics: Introduction and Advanced Topics*. 3rd ed. Berlin, Heidelberg : Springer, 2004. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-10184-1_2
- Rugh W. J., Shamma J. S. Research on gain scheduling. *Automatica*. 2000. Vol. 36. P. 1401–1425.
- Young D. S., Won H., Santi E., Monti A. Synergetic control approach for induction motor speed control. *Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2004. P. 1951–1956.
- Kokotovic P., Arcak M. Constructive nonlinear control: A historical perspective. *Automatica*. 2001. Vol. 37. P. 637–662.
- Kokotovic P. V. The joy of feedback: Nonlinear and adaptive. *IEEE Control Systems Magazine*. 1992. Vol. 12. P. 7–17.
- Haken H. *Advanced Synergetics*. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1987.
- Zhou J., Wen C. *Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems with Nonsmooth Nonlinearities, Interactions or Time Variations*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. 241 p.
- Freeman R. A., Kokotovic P. V. *Robust Control of Nonlinear Systems*. Boston : Birkhäuser, 1996. 258 p.
- Kokotovic P. V. Constructive nonlinear control: Progress in the 90's. *Proceedings of the 14th IFAC World Congress*. Beijing, China, 1999. P. 49–77.
- Мірошник В. О., Гачковська М. А., Кишенько В. Д., Грабовська О. В. Оптимізація процесів переробки сільськогосподарської сировини : монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2019. 479 с.

References

- Ladanyuk A., Kyshenko V., Smityuh Y. The biotech complexes control in conditions of situational uncertainty. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*. 2012. No. 60. P. 149–154.
- Smityukh Ya., Ladanyuk A., Kyshenko V. *Stsenarnyi pidkhid pry avtomatyzatsii tekhnolohichnykh protsesiv: monohrafiia* [Scenario approach in automation of technological processes: monograph]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. 184 p.
- Haken H. *Synergetics: Introduction and Advanced Topics*. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-10184-1_2
- Rugh W. J., Shamma J. S. Research on gain scheduling. *Automatica*. 2000. Vol. 36. P. 1401–1425.
- Young D. S., Won H., Santi E., Monti A. Synergetic control approach for induction motor speed control. *Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2004. P. 1951–1956.
- Kokotovic P., Arcak M. Constructive nonlinear control: A historical perspective. *Automatica*. 2001. Vol. 37. P. 637–662.
- Kokotovic P. V. The joy of feedback: Nonlinear and adaptive. *IEEE Control Systems Magazine*. 1992. Vol. 12. P. 7–17.
- Haken H. *Advanced Synergetics*. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1987.
- Zhou J., Wen C. *Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems with Nonsmooth Nonlinearities, Interactions or Time Variations*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. 241 p.
- Freeman R. A., Kokotovic P. V. *Robust Control of Nonlinear Systems*. Boston: Birkhäuser, 1996. 258 p.
- Kokotovic P. V. Constructive nonlinear control: Progress in the 90's. *Proceedings of the 14th IFAC World Congress*. Beijing, China, 1999. P. 49–77.
- Miroshnyk V. O., Hachkovska M. A., Kyshenko V. D., Hrabovska O. V. *Optyimizatsiia protsesiv pererobky silskohospodarskoi syrovyny: monohrafiia* [Optimization of agricultural raw material processing processes: monograph]. Kyiv: TsP "Komprynt", 2019. 479 p.

Kyshenko V. D. Gorpichenko A. S. Control of technological objects of sugar production on the basis of self-organization in nonlinear systems

The research has revealed the defining features of sugar production facilities, which fully correspond to the characteristics of a complex organisational and technical system. One of the characteristic features of such facilities is the presence of intermittance, i.e. the occurrence of intermittent modes over time: deterministic, stochastic and chaotic with the formation of dissipative spatio-temporal structures. This property ensures the presence of self-organisation processes, which can ensure the organisation of effective strategies for

resource-efficient management. This task is solved by synergistic management systems. Synergistic control regulators ensure asymptotic stability of control systems with respect to their desired operating modes, invariance to changes in various factors, and robustness. The synthesis of the laws of synergistic control of technological objects in sugar production is based on the methodology developed by the authors. This methodology allows the evaluation of parameters of nonlinear models through experimental identification in various situationally significant zones, which ensures the efficiency and accuracy of control. The synthesized synergistic control system has demonstrated its performance, stability, and effectiveness.

Thus, the use of a synergistic approach to the management of technological facilities in sugar production opens up new opportunities for improving the efficiency of production systems. The development of synergistic regulators not only ensures the stability of technological processes in complex and changing conditions, but also contributes to the optimisation of energy and material resources. This is very important for modern sugar production, where there are constantly increasing requirements for energy efficiency, reliability, safety and quality of the products they produce.

Based on these results, even during the design of automated control systems, as well as during the modernisation of existing technological lines of sugar industry enterprises, it is possible to bring manufacturing standards to a new level. Similarly, standard control models can be expensive and outdated, and there is no single effective adaptation algorithm.

Keywords: sugar production, technological facility, synergistic control, self-organisation.

Кишенько Василь Дмитрович – професор, кандидат технічних наук кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національний університет харчових технологій.
kvd1948@gmail.com

Горпинченко Антон Сергійович – аспірант Національний університет харчових технологій.
ORCID 0009-0005-6190-7348
antongorpinchenkodra@gmail.com

Стаття подана 13.12.2025.