

# ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.1:519.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/36>**Ромащук О.М.**

Національний університет харчових технологій

## БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

У статті на основі визначених ознак технологічного комплексу цукрової промисловості як складної організаційно-технічної системи аналізувались проблеми, що виникають через неврахування різнопланової поведінки технологічних процесів цукрового виробництва. Такий характер поведінки вимагає застосування методів багатокритеріальної оптимізації складних систем, обумовлений необхідністю підвищення ефективності їх функціонування на основі узагальнення і розвитку принципу міжкритеріального компромісу, що якісно, але краще кількісно відображає обґрунтовану значущість кожного критерію з окремих оціночних позицій, наприклад: інженерно-технічної, економічної, екологічної, соціальної та інших. Метою статті є розробка алгоритмів багатокритеріального оптимального керування технологічними процесами цукрового виробництва для забезпечення високої якості виробленої продукції, підвищення продуктивності технологічних процесів цукрової промисловості та зниження втрат сировини. Здійснена постановка та розв'язана задача багатокритеріальної оптимізації технологічних процесів виробництва цукру в умовах невизначеності та конфліктності, ситуаційного змінювання пріоритетності критеріїв. На основі отриманих експериментальних математичних моделей, що відображують вплив режимних параметрів на функції цілей, методом досяжних цілей проводився пошук оптимальних значень режимних параметрів цукрового виробництва в області Парето. Проведений аналіз отриманих результатів оптимізації підтвердив забезпечення оптимальності рішень в конфліктних ситуаціях шляхом досягнення компромісу. Отримані результати досліджень лягли в основу алгоритмів керування технологічними процесами у відділеннях цукрового заводу. Реалізація розробок багатокритеріального керування технологічним комплексом цукрового заводу, як показала дослідна експлуатація, дозволила додатково підвищити продуктивність виробництва на 2,8%, скоротити втрати цукру на 0,12%.

**Ключові слова:** цукрове виробництво, об'єкт керування, багатокритеріальне керування, технологічний комплекс, автоматизація виробництва.

**Постановка проблеми.** Технологічний комплекс цукрової промисловості має всі характерні визначальні ознаки складної організаційно-технічної системи [1]. Важливим чинником в цьому аспекті є наявність різнопланової поведінки, визваною проблемами лабільності якості сировини, змінюванням планових завдань, присутністю різноманітних за характером виробничих ситуацій [2]. Неврахування ознак ситуаційної діяльності технологічного комплексу цукрового заводу, її різноманітності через вплив значної кількості факторів технологічного та техніко-економічного характеру, приводить до значного зниження ефективності автоматизованого керування [3]. Істотним джерелом підвищення ефективності технологічного комплексу цукрового заводу як складної нелінійної динамічної системи є враху-

вання всього спектру цілей керування, які різним чином виявляються в залежності від ситуаційної обстановки в об'єкті керування [4]. Добротність діяльності систем виготовлення цукру можна оцінити як гарантований випуск готового продукту стандартної (найкращої) якості [5]. Вирішальний економічний ефект систем технологічного комплексу цукрового заводу – максимальний вихід готового продукту при мінімальних витратах. Отже, якість функціонування систем виробництва цукру можна оцінити за комплексом критеріїв, що відображають особливості виробництва в кожному відділенні цукрового заводу, а також ураховувати особливості розвитку виробничих ситуацій. Спроби оцінити ефективність функціонування складної системи одним показником найчастіше призводять до отримання рішень

неадекватних реальності [6]. Тому при керуванні складними технологічними комплексами необхідно оцінювати альтернативні керуючі впливи з погляду комплексу критеріїв. В реальних задачах вибору найбільш пріоритетного рішення, що виникають на практиці, як правило, присутні кілька критеріїв оптимальності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За останні роки основний напрям досліджень в галузі багатокритеріальної оптимізації та керування був зосереджений на аспектах практичної реалізації розроблених методів з використанням комп'ютерних технологій [7, 8]. Значна увага приділялась багатокритеріальному прийняттю рішень в розробці шкал оцінок критеріїв з різних точок зору. Зокрема, вимірювання привабливості за допомогою методу категоричної оцінки (МАСВЕТН) [9]. Тут користувач повинен надати якісне судження про відмінності привабливості щодо пар варіантів. МАСВЕТН було реалізовано в програмному забезпеченні М-МАСВЕТН з використанням моделі адитивної агрегації. У цій статті представлено програмний засіб «AniFair», який поєднує підхід МАСВЕТН з інтегралом Шоке як функцією агрегації, оскільки інтеграл Шоке дозволяє моделювати взаємодію між критеріями. За допомогою інтеграла Шоке користувач може визначити обмеження щодо відносної важливості критеріїв (значення Шеплі) і взаємодії між критеріями. В роботі Завадскаса [10] розглянуті питання багатокритеріального прийняття рішень в економіці для того, щоб оцінити та вибрати найбільш переважне рішення з точки зору комплексу критеріїв уподобання, реалізувати його та отримати найбільший прибуток. Уподобання використовуються в багатьох проблемних ситуаціях як в індивідуальних, так і в організаційних процесах прийняття рішень. В роботі Рао і Райєша [11] представлено ефективну структуру прийняття рішень щодо вибору програмного забезпечення у виробничих галузях із використанням методу прийняття рішень за кількома критеріями, методу організації рейтингу переваг для оцінки збагачення (PROMETHEE). У цій роботі метод вдосконалено шляхом інтеграції з аналітичним ієрархічним процесом (АНП) і нечіткою логікою. Нечітка логіка введена для обробки неточності процесу прийняття рішень людиною. Запропонована структура прийняття рішень є практичною для ранжування конкуруючих програмних продуктів з точки зору їх загальної продуктивності з огляду на численні критерії.

**Метою статті** є розробка алгоритмів багатокритеріального оптимального керування технологічними процесами цукрового виробництва для

забезпечення високої якості виробленої продукції, підвищення продуктивності технологічних процесів цукрової промисловості та зниження втрат сировини.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Задача багатокритеріальної оптимізації в умовах невизначеності має такий вигляд [12]:

$$y = \{g_1(\phi(x, z)), \dots, g_m(\phi(x, z))\} \rightarrow \max$$

$$x \in X, z \in Z, y \in Y \quad (1)$$

де  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  – кінцева множина альтернатив;  
 $Z = \{z_1, \dots, z_s\}$  – кінцева множина станів зовнішнього середовища;

$\phi(x, z)$  – функціонал перетворення альтернативи  $x$  при стані  $z$  в деякий результат;

$G = \{g_1, \dots, g_m\}$  – кінцева множина критеріїв оцінки результатів альтернативи  $x$ ;

$Y = \{y_j\}_{j=1..s}^{i=1..s}$  – кінцева множина рішень.

Якщо невизначеність функціонування має кількісний характер, то задача оптимізації зводиться до задачі векторної оптимізації шляхом дискретизації критерію оптимальності  $Q(\bar{x}, \nu)$  за параметром  $\nu$  і розглядає частинні критерії оптимальності функцій.

$$Q_i(\bar{x}) = Q(\bar{x}, \nu_i), \text{ где } \nu_i \in [\nu^-, \nu^+]. \quad (2)$$

Це затверджує можливість врахування вплив різноманітних факторів як режимного характеру (температури, тиску і т.п.). так і якісних показників на критерій оптимальності в якості обмеження управління.

Наступним мотивом багатокритеріальності є множинність правил, які пред'являються до характеристик системи керування. Їх можна підвести до системи нерівностей.

$$q_i(\bar{x}) \leq q_i^+, i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

де  $q_i^+$  – граничне значення  $i$ -ї технічної вимоги.

У цьому випадку частинні критерії оптимальності звичайно в явному вигляді відсутні і їх доводиться вводити штучно за допомогою виразів:

$$Q_i(\bar{x}) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } q_i(\bar{x}) \leq q_i^+; \\ w_i (q_i(\bar{x}) - q_i^+), & \text{якщо } q_i(\bar{x}) > q_i^+. \end{cases} \quad (4)$$

Тут  $w_i$  – ваговий коефіцієнт, що враховує важливість  $i$ -го обмеження.

При постановці задачі оптимального управління одним з основних питань є вибір критерію оптимальності  $Q(\bar{x})$ . З одного боку, критерій повинен мати конкретний фізичний зміст, а з іншого боку – від нього потрібно, щоб він як можна повніше характеризував об'єкт управління. Однак вимоги функціональної повноти важко задовольнити за допомогою тільки одного скалярного показника, тому що він звичайно опи-

сує конкретну властивість об'єкта. У зв'язку із цим доводиться розглядати сукупність показників  $(Q_1, \dots, Q_n)$ , кожний з яких має наочну фізичну інтерпретацію й дозволяє оцінити якість оптимального рішення  $\bar{x}^*$  з різних поглядів.

Таким чином, закономірність досягнення функціональної повноти показників, що конкретизують оптимальні властивості об'єкта управління, при одночасній їхній фізичній наочності приводить до багатокритеріальності, що впливає прямо з постановки задачі оптимального керування. Наприклад, при проектуванні оптимального управління випарною станцією необхідно розглядати одночасно кілька частинних критеріїв оптимальності, які відображають різні властивості об'єкта, що приводить до наступної задачі векторної оптимізації:

$$\max_{\bar{x} \in D_x} Q_1(\bar{x}), \max_{\bar{x} \in D_x} Q_2(\bar{x}), \min_{\bar{x} \in D_x} Q_3(\bar{x}), \max_{\bar{x} \in D_x} Q_4(\bar{x}), \min_{\bar{x} \in D_x} Q_5(\bar{x}), \quad (5)$$

де  $D_x$  – припустима область працездатності,  $Q_1(\bar{x})$  – навантажувальна здатність;  $Q_2(\bar{x})$ ,  $Q_3(\bar{x})$  – статична завадостійкість,  $Q_4(\bar{x})$  – продуктивність,  $Q_5(\bar{x})$  – виробнича потужність.

Оптимальний варіант повинен мати екстремальні значення по кожному з частинних критеріїв  $(Q_1, \dots, Q_n)$ .

Наприклад, постановка задачі оптимального керування дифузійним апаратом в загальному вигляді трактується як багатокритеріальна задача:

$$F = \max_{Q_i^j \in R^n} F, A_i^j(MIN) \leq A_i^j \leq A_i^j(MAX), \quad (6)$$

де  $R^n$  – простір параметрів стану;  $A_i^j(MIN) \leq A_i^j \leq A_i^j(MAX)$  – область допустимої зміни параметрів в нечітких значеннях, причому  $A_i^j(MIN) =$  «нижче норми»,  $\leq A_i^j(MAX) =$  «вище норми». При вирішенні задач оптимального керування були виділені такі множини критеріїв:  $K_i^s$  – якість,  $P_i^s$  – продуктивність;  $W_i^s$  – втрати. Задача багатокритеріальної оптимізації розглянута для моделей, одержаних в результаті оперативної ідентифікації методом поточних найменших квадратів.

Задачу багатокритеріальної оптимізації розглянемо на прикладі оптимізації відділень цукрового заводу, для дифузійного відділення використані такі моделі:

$$R(T, F_{oc}) = 0.012 F_{oc}^2 - 0.075 T^2 + 0.042 F_{oc} T + 4.38 F_c - 2.06 T - 110.7 \quad (7)$$

$$L(T, F_{oc}) = 5.707 F_{oc}^2 + 12.72 T^2 - 2.08 F_{oc} T - 2.885 F_{oc} - 4.0547 T + 1.986 \quad (8)$$

$$D(T, F_{oc}) = 0.014 F_{oc}^2 + 0.029 F_{oc} T + 0.88 T - 6.20 F_{oc} + 103.5 \quad (9)$$

де:  $L$  – завантаження стружкою апарату,%;  $R$  – доброякісність дифузійного соку,%;  $D$  – втрати

цукру, % до маси буряку,  $F_{oc}$  – витрата дифузійного соку, м<sup>3</sup>/год;  $T$  – температура, °C.

Позначимо  $L(F_{oc}, T) = P(x_1, x_2)$ ,  $R(F_{oc}, T) = K(x_1, x_2)$ ,  $D(F_{oc}, T) = W(x_1, x_2)$  де  $L$  – завантаження стружкою апарату,  $R$  – якісні показники дифузійного соку;  $D$  – втрати цукру,  $x_1, x_2$  – температурний режим та відкачка дифузійного соку.

Оптимальний результат досягається, згідно з методом досяжних цілей [12], при умові знаходження мінімального значення  $\gamma$ , для якого вірна наступна система нерівностей:

$$\begin{cases} P(x_1, x_2) - K_p y \geq P_0 \\ K(x_1, x_2) - K_k y \geq K_0 \\ W(x_1, x_2) - K_w y \geq W_0 \end{cases} \quad (10)$$

«менше норми»  $< x_1 <$  «вище норми», «менше норми»  $< x_2 <$  «вище норми»

де  $P_0, K_0, W_0$  – сподівання при пошуку оптимального значення;  $K_p, K_k, K_w$  – вагові коефіцієнти, які визначають наскільки близько повинно бути рішення до оптимального результату. Оптимальні значення  $x_1$  та  $x_2$  знайдені при

$$\gamma = \min \max \frac{F_i(x_1, x_2) - F_{io}}{K_i} \quad (11)$$

де  $F_i(x_1, x_2)$  – значення цільової функції в поточний момент часу;  $F_{io}$  – очікуване значення цільової функції;  $K_i$  – ваговий коефіцієнт.

Оптимальні значення режимних параметрів знайдені в області Парето в результаті реалізації методу досяжних цілей []. Багатоцільове управління необхідно здійснювати при параметрах визначених нижче:

$F_{oc} = 58 \text{ м}^3/\text{год}$ ,  $T = 72.3 \text{ }^\circ\text{C}$  та наступні значення цільових функцій:  $R(F_{oc}, T) = 88 \%$ ;  $D(F_{oc}, T) = 0.3 \%$  до маси буряку та  $\text{Gamma}(\gamma) = 0.27$ .

Алгоритм отримання оптимального значення працює наступним чином :

– будується двовимірний масив, в кожній комірці якого знаходиться структура, яка містить значення критеріїв та параметрів;

– значення параметрів обраховуються із координат комірки в двовимірному масиві.

При обрахунку значень критеріїв в комірці  $\gamma$  обраховується за формулою (11), тобто в одній комірці  $\gamma$  записується як максимальне значення для всіх критеріїв всередині цієї комірки. При обчисленні всіх комірок програма запам'ятовує найменше значення  $\gamma$  та координати всередині двовимірного масиву тієї комірки, де  $\gamma$  набуває найменшого значення.

За допомогою інструментального середовища Matlab було досліджено взаємозв'язок критеріїв управління та показано, що в багатокритеріальному просторі (якість, продуктивність, втрати) існують зони, в яких можна знайти оптимальне

рішення (рис. 2, 3) і навпаки, яскраво видно, що покращення одного з критеріїв призводить до різкого погіршення іншого (рис. 1, 2). Так в дифузійному відділенні при підвищенні витрат дифузійного соку  $F_{oc}$  – м<sup>3</sup>/год та зниженні температури  $T^{\circ}C$ . – втрати цукру  $D\%$  – зростають (рис. 1).

Для очисного віділення використані такі моделі:

$$R(pH, Ca) = 0.345 Ca^2 - 0.67pH^2 + 0.90Ca \cdot pH + 5.38Ca - 3.06pH - 80.9 \quad (12)$$

$$G_{хл}(V, T) = 0.138 V^2 + 0.6237T^2 - 0.17001VT - 2.231V - 4.0527T + 198 \quad (13)$$

$$D(T, CaO) = 0.134CaO^2 + 0.17T^2 + 0.13CaO \cdot T + 0.47 - 1.21CaO + 100 \quad (14)$$

де  $R$  – якість очищеного дифузійного соку, %;  $pH$  – переддефегованого соку, %;  $Ca$  – вміст солей, %;

$G_{хл}$  – тривалість холодної дефекації, хв;  $V$  – швидкість відстоювання очищеного соку, %;  $T$  – температура,  $^{\circ}C$ ; де  $D$  – втрати вапна від зазального буряка, %;  $CaO$  – лужність по метилоранжу, %;  $T$  – температура,  $^{\circ}C$ ;

Оптимальні значення режимних параметрів знайдені в області Парето в результаті реалізації методу досяжних цілей. Багатоцільове управління необхідно здійснювати при параметрах визначених нижче:  $pH=9.2\%$ ,  $Ca=0.15\%$  та наступні значення цільових функцій:  $R(pH, Ca)=88\%$ ;  $D(V, T)=0.3\%$  втрати вапна від загального буряка та  $Gamma(\gamma) = 0.20$ .

В сокоочисному відділенні при підвищенні вмісту солей  $Ca\%$  та зниженні лужності  $pH\%$ . – якість соку  $R\%$  – знижується (рис. 2).

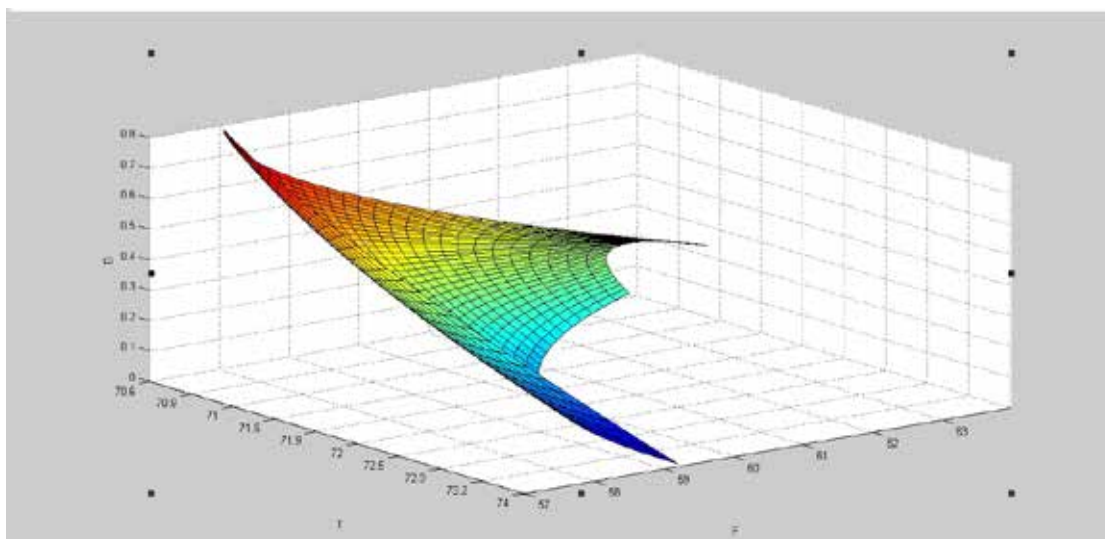


Рис. 1. Зміна критеріїв у багатокритеріальному просторі для дифузійного віділення

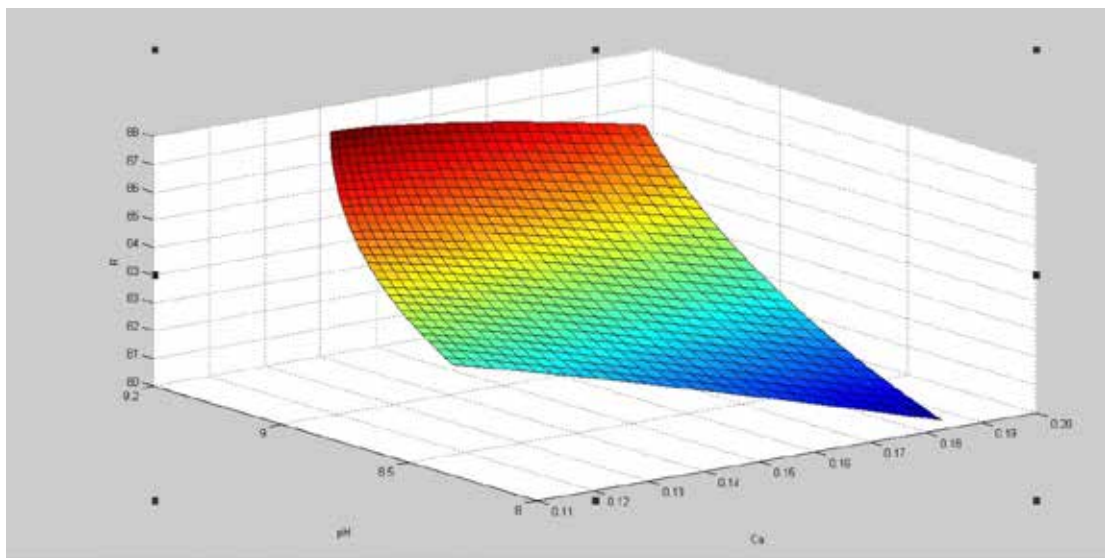


Рис. 2. Зміна критеріїв в багатокритеріальному просторі для віділення сокоочистки

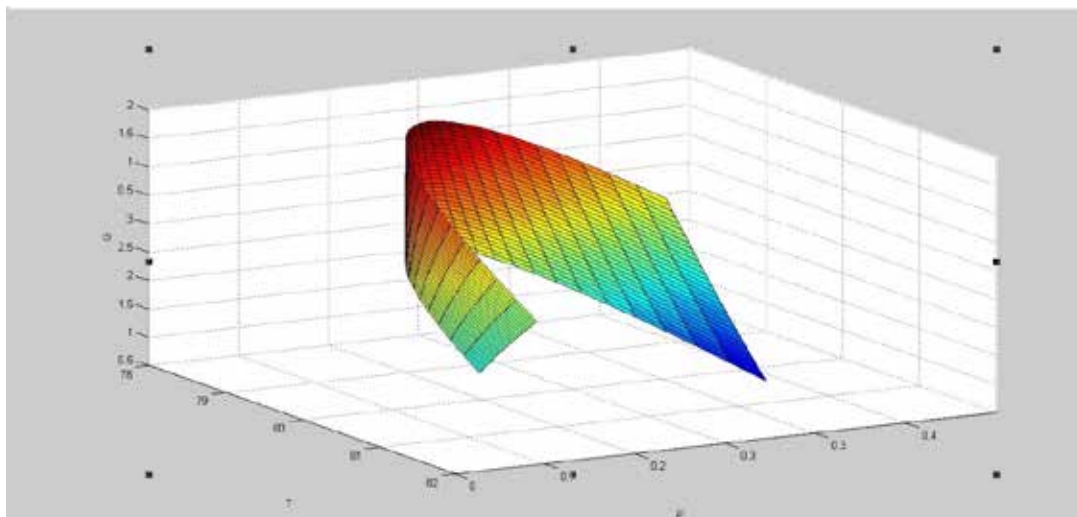


Рис. 3. Зміна критеріїв в багатокритеріальному просторі для випарної станції

Для випарної станції використані такі моделі:

$$G_{\text{вп}}(T, P) = 1.3P^2 - 1.62T^2 + 1.2PT + 8.01P - 5.76T - 55.9 \quad (15)$$

$$d(D_{\text{соку}}, c) = 0.4556c^2 + 0.637D^2 - 0.1102cD - 2.245c - 4.0556T + 201 \quad (16)$$

де  $G_{\text{вп}}$  – продуктивність випарної установки, %;  $P$  – тиск подачі пари, МПа;  $T$  – температура, °С;  $d$  – витрата пари на нагрівання соку, % до маси буряка;  $D_{\text{соку}}$  – витрата соку, % до маси буряка;  $c$  – теплоємність соку, кДж. Багатоцільове управління необхідно здійснювати при  $T=80^\circ\text{C}$ ,  $P=0.2\text{МПа}$  та  $G_{\text{вп}}(T, P)=2\%$ ;  $d(D_{\text{соку}}, c)=3$  кДж.

На рис. 3 показано, що в багатокритеріальному просторі існують зони, в яких можна знайти оптимальне рішення.

**Висновки.** Здійснена постановка та проведена багатокритеріальна оптимізація окремих об'єктів

керування технологічного комплексу цукрового заводу. За компромісною згорткою критеріїв в області Парето в залежності від виробничих ситуацій визначені оптимальні значення режимних параметрів технологічного комплексу цукрового заводу, коли забезпечуються висока продуктивність обладнання, досягається найкраща якість продукції, мінімізуються втрати ресурсів. Отримані результати досліджень лягли в основу алгоритмів керування технологічними процесами у відділеннях цукрового заводу. Реалізація розробок багатокритеріального керування технологічним комплексом цукрового заводу, як показала дослідна експлуатація, дозволила додатково підвищити продуктивність виробництва на 2,8%, скоротити втрати цукру на 0,12%.

#### Список літератури:

1. Ладанюк А.П., Решетюк В.М., Кишенько В.Д., Смітюх Я.В. Інноваційні технології в управлінні складними біотехнологічними об'єктами агропромислового комплексу. К.: «Центр учбової літератури». 2014. 280 с.
2. Мірошник В. О., Гачковська М. А., Кишенько В. Д., Грабовська О. В. Оптимізація процесів переробки сільськогосподарської сировини. К.: ЦП Компринт. 2019. 479 с.
3. Ладанюк А. П., Трегуб В. Г., Ельперін І. В., Цюцюра В. Д. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості. К.: Аграрна освіта, 2001. 224 с.
4. Kyshenko V., Sych M.. Scripted control of technological process of the sugar production . Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. B&M Publishing (San Francisco, California, USA). 2016. №7. P. 215–219.
5. Рева Л. П. Фізико-хімічні основи технологічних процесів очищення дифузійного соку у виробництві цукру. К.: НУХТ. 2012. 371 с.
6. Abdelhadi, M., Hamdadou, D., Menni, N. A communication platform for group decision support system: Based web services and multicriteria method. International Journal of E-services and Mobile Applications, 2018, 10(3), P. 19–41.
7. Achillas, C., Moussiopoulos, N., Karagiannidis, A., Baniyas, G., Perkoulidis, G. The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review. Waste Management & Research, 2013. 31(2), P. 115–129.
8. Adhikary, P., Roy, P.K., Mazumdar, A. Turbine supplier selection for small hydro project: Application

of multi-criteria optimization technique. International Journal of Applied Engineering Research, 2015. 10(5). P. 13109–13122.

9. Mardani, A., Zavadskas, E.K., Khalifah, Z., Jusoh, A. and Nor, K. Multiple Criteria Decision-Making Techniques in Transportation Systems – A Systematic Review of the State of the Art Literature. Transport. 2015. 31, P. 359–385.

10. Zavadskas, E. and Turskis, Z. Multiple Criteria Decision Making (MCDM) Methods in Economics: An Overview. Technological and Economic Development of Economy, 2011. 17. P. 397–427.

11. Rao R. and Rajesh T. Software Selection in Manufacturing Industries Using a Fuzzy Multiple Criteria Decision Making Method, PROMETHEE. Intelligent Information Management. 2009. Vol. 1. No. 3, P. 159-165.

12. Березький О.М., Теслюк В.М., Дубчак Л.О., Мельник Г.М., Батько Ю.М. Дослідження і проектування комп'ютерних систем та мереж. Тернопіль : ЗУНУ. 2022. 252 с .

### **Romaschuk O.M. MULTI-CRITERIA CONTROL OF THE TECHNOLOGICAL COMPLEX OF THE SUGAR FACTORY**

*In the article, based on the identified features of the technological complex of the sugar industry as a complex organizational and technical system, the problems arising from the failure to take into account the multifaceted behavior of the technological processes of sugar production were analyzed. This type of behavior requires the use of methods of multi-criteria optimization of complex systems, due to the need to increase the efficiency of their functioning based on the generalization and development of the principle of inter-criteria compromise, which qualitatively, but better quantitatively, reflects the justified significance of each criterion from separate evaluation positions, for example: engineering and technical, economic, ecological, social and other. The purpose of the article is to develop algorithms for multi-criteria optimal management of technological processes of sugar production to ensure high quality of manufactured products, increase the productivity of technological processes of the sugar industry and reduce raw material losses. The task of multi-criteria optimization of technological processes of sugar production in conditions of uncertainty and conflict, situational change of priority of criteria was established and solved. On the basis of the obtained experimental mathematical models reflecting the influence of mode parameters on the goal functions, the method of attainable goals was used to search for optimal values of the mode parameters of sugar production in the Pareto region. The analysis of the obtained optimization results confirmed the optimality of solutions in conflict situations by reaching a compromise. The obtained research results formed the basis of the algorithms for managing technological processes in the branches of the sugar factory. The development of multi-criteria management of the technological complex of the sugar factory, as shown by the experimental operation, made it possible to additionally increase production productivity by 2.8% and reduce sugar losses by 0.12%.*

**Key words:** sugar production, control object, multi-criteria control, technological complex, production automation.