

## МЕТОД ПОКРАЩЕННЯ СТРАТЕГІЇ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

**М.Ю. Білоусов, М.Г. Стародубцев, С.В. Шибанов**

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: [matvii.bilousov@nure.ua](mailto:matvii.bilousov@nure.ua), [nikolaj.starodubcev@nure.ua](mailto:nikolaj.starodubcev@nure.ua), [serhii.shybanov@nure.ua](mailto:serhii.shybanov@nure.ua)

**Анотація.** В роботі запропоновано метод покращення стратегії керування технологічним процесом за сукупністю критеріїв з використанням принципу злиття нечітких цілей і обмежень. В якості узагальненого критерію використовується згортка критеріїв у вигляді нечіткого інтеграла Сугено.

**Ключові слова:** керування, технологічний процес, технологічний об'єкт, невизначеність.

## METHOD IMPROVING THE STRATEGY OF TECHNOLOGICAL PROCESS MANAGEMENT

**Matvii Bilousov, Mykola Starodubcev, Serhii Shybanov**

Kharkiv national university of radio electronics, Kharkiv

Ukraine, 61166, Kharkiv, 14 Nauki Ave

E-mail: [matvii.bilousov@nure.ua](mailto:matvii.bilousov@nure.ua), [nikolaj.starodubcev@nure.ua](mailto:nikolaj.starodubcev@nure.ua), [serhii.shybanov@nure.ua](mailto:serhii.shybanov@nure.ua)

**Abstract.** The article proposes a method of optimizing the strategy of process control by a set of criteria using the principle of merging fuzzy goals and constraints. The convolution of criteria in the form of a fuzzy Sugeno integral is used as a generalized criterion.

**Keywords:** control, technological process, technological object, uncertainty.

ВСТУП. Невизначеність, в тій чи іншій мірі властива всім процедурам прийняття рішень в управлінні ТП, має дві сторони. Одна сторона носить імовірнісний характер, друга пов'язана з неточністю і приблизністю цілей, альтернатив, ресурсів. У задачах управління ТП, як правило, присутні обидві сторони невизначеності. Так, у випадку багатоцільової задачі прийняття рішень на кожному етапі ТП ми маємо справу з невизначеністю стохастичної природи, пов'язаної з випадковими впливами зовнішнього середовища, і з невизначеністю, одержуваної в результаті формалізації якісної інформації про порівняльну перевагу можливих варіантів рішення.

Найбільш адекватною стратегією оптимізації ТП є стратегія послідовної оптимізації. В умовах невизначеності процедура прийняття рішень на кожному етапі ТП орієнтована в загальному випадку не на вирішення чітко поставленої математичної задачі оптимізації, а на послідовне виявлення переваг особою, яка приймає рішення (на основі одержуваної від нього інформації) разом з визначенням допустимої множини дій.

При розробці і використанні математичних моделей прийняття рішень, наприклад, моделей математичного програмування, коли альтернатива являє собою множину рішень потужності континуум, і оптимальне рішення відповідає екстремуму цільової функції, питання про аналіз наслідків як таких в загальному випадку не ставиться. А він особливо важливий при дослідженні слабо структурованих об'єктів.

У ситуації вибору найкращої дії з множини можливих, коли результати цих дій носять імовірнісний характер, кожна дія характеризується своїм вектором ймовірностей всіх можливих альтернативних результатів. Одна з найбільш розроблених теорій вибору найкращої дії в цих умовах – теорія ймовірнісної корисності фон Неймана і Моргенштерна [4].

В [5] розглянуті методи звуження множини допустимих альтернатив. До них належать

методи, що ґрунтуються на ідеях ефективних компромісів Парето, гарантовані оцінки Гермейєра та вибір рішень на основі нечіткого опису Заде.

Використання інформації, заданої у формі нечітких множин, призводить до нових формулювань оптимізаційних задач і методів їх вирішення.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ. У загальному випадку задачу оптимізації можна сформулювати як задачу максимізації (мінімізації) заданої функції на заданій множині допустимих альтернатив, яка описується системою рівностей та/або нерівностей.

$$f(x) \rightarrow \max, \varphi_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m, x \in X,$$

де  $X$  – задана множина альтернатив;

$f: X \rightarrow R^1$  і  $\varphi_i: X \rightarrow R^1$  – задані функції.

При розгляді реальних задач прийняття рішень в управлінні ТП в розпорядженні дослідника можуть виявитися лише нечіткі описи функцій  $f$  і  $\varphi_i$  або параметрів, від яких залежать ці функції. Це може бути через недостатність інформації про цю ситуацію або служити формою наближеного опису ситуації, достатнього для вирішення поставленої задачі. Крім того, в реальній ситуації альтернативи поза множиною обмежень можуть бути не неприпустимими, а лише в тій чи іншій мірі менш бажаними для особи, яка приймає рішення, ніж альтернативи всередині цієї множини. Форми нечіткого опису вихідної інформації в задачах прийняття рішень можуть бути різними. Звідси і відмінності в математичних формулюваннях відповідних оптимізаційних задач. Залежно від виду функцій  $f$  і  $\varphi_i$  розрізняють наступні задачі [5]:

- оптимізація з нечіткими відносинами;
- оптимізація з нечіткими обмеженнями;
- оптимізація з нечіткою метою;
- оптимізація з нечіткою метою та нечіткими обмеженнями.

Аналіз методів вирішення різних типів нечітких оптимізаційних задач [5, 6, 7] показав, що в основі їх лежать два підходи:

- заміна нечітких множин множинами  $\alpha$ -рівня і зведення нечіткої оптимізаційної задачі до класичної задачі математичного програмування;
- представлення цільової функції і обмежень нечіткими множинами і використання принципу злиття цілей і обмежень Беллмана-Заде [8].

При використанні першого підходу вихідна задача нечіткого математичного програмування зводиться до вирішення деякої множини класичних задач оптимізації. Розглянемо задачу оптимізації з нечіткими обмеженнями.

Нехай  $f: X \rightarrow R^1$  цільова функція;

$X$  – універсальна множина альтернатив;

$\mu_c: X \rightarrow [0,1]$  – функція приналежності (ФП) нечіткої множини допустимих альтернатив.

Нехай задача оптимізації сформульована так:  $\max f$  при  $\mu_c$ , причому під максимізацією розуміється раціональний вибір конкретної альтернативи чи множини альтернатив.

У цьому випадку вихідна задача нечіткого математичного програмування представляється у вигляді сукупності звичайних задач максимізації функції  $f$  на всіляких множинах рівня множини допустимих альтернатив

$$c_\alpha = \{x \mid x \in X, \mu_c(x) \geq \alpha\}.$$

Якщо альтернатива  $x_0 \in X$  є рішенням задачі  $f(x) \rightarrow \max$  на множині рівня  $\alpha$ , то  $\alpha$

тракується як ступінь належності альтернативи  $x_0$  нечіткій множині рішень вихідної задачі нечіткого математичного програмування. Перебравши всілякі  $\alpha$ , отримаємо функцію приналежності нечіткого рішення. Для всякого  $\alpha \geq 0$ , такого, що  $c_\alpha \neq 0$ , побудуємо множину  $N(\alpha) = \{x | x \in X, f(x) = \sup_{x' \in C_\alpha} f(x')\}$  – множину рішень звичайної задачі максимізації на множині допустимих альтернатив зі ступенем приналежності не менше  $\alpha$ . Тоді рішення вихідної задачі визначається зі співвідношення  $\sup p \mu_f(x) = \bigcup_{\alpha \geq 0} N(\alpha)$ .

Очевидно, що стосовно до вирішення задач управління ТП даний підхід може бути використаний при дослідженні технологічного об'єкта невисокої розмірності, наприклад, при оптимізації окремих технологічних операцій, зважаючи на складність вирішення багатовимірних задач математичного програмування.

Для оптимізації управління багатостадійним ТП більш раціональним є підхід Беллмана-Заде. Введення понять про нечіткі цілі і обмеження дозволяє застосувати іншу, відмінну від стандартної, логічну схему прийняття рішень. У стандартній схемі фіксується множина альтернатив, множина обмежень і критерій (критерії) або цільова функція (функції) вибору оптимальної альтернативи. При нечітких цілях і обмеженнях, заданих у просторі альтернатив або в просторі станів системи, логічна схема прийняття рішень виглядає по-іншому. Основним у даному підході є те, що цілі прийняття рішень і множина допустимих альтернатив (обмежень) розглядаються як рівноправні нечіткі множини деякої універсальної множини альтернатив. Рівноправність розуміється в тому сенсі, що рішення повинно задовольняти і цілям, і обмеженням. Результуюче рішення формується як перетин множин нечітких цілей і нечітких обмежень. Це означає, що між цілями і обмеженнями або ресурсами, по суті, втрачається відмінність. Серед множини можливих результуючих рішень вибирається так зване максимізує рішення, на якому ФП перетину множини цілей і множини обмежень приймає максимальне значення. Максимізує рішення є в деякому сенсі оптимальним.

Зважаючи на складність сучасних ТП виробництва виробів нової техніки, їх багатопараметричність, багатокритеріальності рішення задачі оптимізації не є єдиним. При цьому неоднозначність рішення не може бути усунена шляхом внутрішнього, більш детального аналізу ТП. Необхідний зовнішній аналіз ТП, тобто процес повинен розглядатися як підсистема більш складної системи – виробничої, а критерії оптимізації вибиратися і ранжуватися залежно від критеріїв оптимальності останньої. Це дозволить побудувати деякий результуючий показник якості ТП, який в принципі визначить єдине рішення задачі оптимізації ТП. Оскільки можливості об'єктивного вибору результуючого показника обмежені нашими знаннями властивостей ТП і систем більш високого ієрархічного рівня, то такий вибір неминує стає суб'єктивним, і саме в цьому сенсі ми використовуємо термін субоптимальне, говорячи про єдине рішення.

Якщо розглядати багатокрокові процеси з детермінованою функцією переходів з нечіткими обмеженнями на управління та з нечіткою метою в просторі станів (спочатку з фіксованим числом кроків), то задача зводиться до знаходження послідовності управлінь, що максимізують результуючу ФП. Для знаходження максимізує рішення використовується стандартна процедура динамічного програмування з побудовою рекурентних співвідношень.

Ця ж задача з фіксованим часом розглянута в стохастичній постановці, коли максимізується ймовірність досягнення нечіткої мети. При цьому задача зводиться до детермінованої шляхом застосування оператора математичного очікування до ФП.

Там же розглянута задача з довільним числом кроків, коли нечітка мета визначена у вигляді деякої нечіткої підмножини всієї множини можливих станів. Процес закінчується, коли

характеристики системи вперше виявляються в цій підмножині, і задача полягає у виборі такої послідовності управлінь з урахуванням нечітких обмежень, при якій максимізується ступінь наближення кінцевого стану до заданої підмножини.

Розглянуті варіанти задач прийняття рішень не вичерпують всього різноманіття можливих ситуацій. Підхід Беллмана-Заде розроблений тільки для детермінованих і стохастичних систем в умовах, коли нечіткими є цілі і обмеження на управління. Однак сам стан технологічного об'єкта (ТО) також може бути нечітким. Крім того, не вирішена проблема об'єднання декількох цілей у разі їх неоднакової важливості або взаємозалежності.

Розглянемо ТП як N-стадійну нечітку систему, що описується нечітким рівнянням

$$X_{i+1} = \tilde{f}(X_i, u_i), \quad i = 0, 1, \dots, N - 1,$$

де  $\sim$  – оператор нечіткості;

$$X_i = \{(x_i, m_i(x_i))\}, \quad x_i \in X, u_i \in U;$$

X, U – області зміни стану та управління відповідно;

$m_i(x_i)$  – ФП нечіткої множини  $X_i$ .

Нехай на управління  $u_i$  накладені нечіткі обмеження  $C_i = \{(u_i, \mu_i(u_i))\}$ , де  $\mu_i(u_i)$  – ФП нечіткого множини  $C_i$ .

Нехай задано початковий стан ТП –  $X_0$ . Потрібно знайти послідовність чітких управлінь  $u_i$  ( $i = 0, 1, \dots, N - 1$ ), що задовольняють нечітким обмеженням  $C_i$ , і послідовність нечітких станів  $X_1, \dots, X_N$  для якої показник якості G приймає максимальне значення.

Трансформуємо дану задачу до схеми багатоетапного прийняття рішень. Експертним шляхом визначимо передбачуване максимальне значення критерію G і представимо мету відповідною нечіткою множиною  $G_N$  в X з ФП  $M_N(X_N)$ . Тоді відповідно до принципу

Беллмана-Заде рішення задачі можна записати у вигляді:

$$D = C_0 \cap C_1 \cap \dots \cap C_{N-1} \cap G_N.$$

Для відповідних ФП маємо:

$$\begin{aligned} \mu_D(u_0, \dots, u_{N-1}) = & \mu_0(u_0) \wedge \mu_1(u_1) \wedge \dots \\ & \dots \wedge \mu_{N-1}(u_{N-1}) \wedge M_N(X_N), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\wedge$  – знак операції min.

У разі коли стани  $X_{N-v}$  – чіткі можна отримати систему рекурентних рівнянь, що дає рішення (1):

$$\left. \begin{aligned} M_{N-v}(X_{N-v}) = & \max_{u_{N-v}} (\mu_{N-v}(u_{N-v}) \wedge M_{N-v+1}(X_{N-v+1})), \\ X_{N-v+1} = & f(X_{N-v}, u_{N-v}), \quad v = 1, \dots, N, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $M_{N-v}(X_{N-v})$  – ФП нечіткої мети на етапі ТП з номером  $N - v$ , індукованої заданою метою  $G_N$  на кінцевому етапі.

У нашому випадку стан  $X_{N-v}$  нечіткий, тому в (2) виникає питання про обчислення

$M_{N-v+1}(X_{N-v+1})$ , тобто визначення ступеня приналежності нечіткого стану  $X_{N-v+1}$  індукованої нечіткої цілі  $G_{N-v+1}$

Спочатку визначимо ступінь приналежності кожного елемента  $x_N$  нечіткого стану  $X_N$  нечіткої мети  $G_N$ , тобто сформуємо нову нечітку множину  $X_N^G$  з ФП  $m_N^G(x_N)$ . Як ступінь приналежності кожного нечіткого стану  $X_N$  нечіткої мети  $G_N$  вибирається максимальна ступінь приналежності елемента, що належить перетину нечітких множин  $X_N$  і  $X_N^G$ . Решта значень  $M_{N-v+1}(X_{N-v+1})$ ,  $v = 2, \dots, N$ , виходять з рекурентних співвідношень.

В результаті отримуємо систему рекурентних рівнянь, що дають рішення поставленої задачі:

$$\left. \begin{aligned} M_N(X_N) &= \max_{x_N} (m_N(x_N) \wedge m_N^G(x_N)), \\ M_{N-v}(X_{N-v}) &= \max_{u_{N-v}} (\mu_{N-v}(u_{N-v}) \wedge M_{N-v+1}(X_{N-v+1})), \\ X_{N-v+1} &= \tilde{f}(X_{N-v}, u_{N-v}), \quad v = 1, \dots, N. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

У реальних умовах при управлінні ТП виробництва виробів нової техніки можлива наявність декількох показників якості. Нехай  $G_j$  – нечітка множина, що характеризує  $j$ -тий показник ( $j = 1, \dots, n$ ). Тоді нечітка множина  $D$ , що є рішенням задачі, буде визначатися формулою

$$D = C_0 \cap C_1 \cap \dots \cap C_{N-1} \cap \left( \bigcap_{j=1}^n G_j \right).$$

Для отримання рішення можна використовувати систему рекурентних рівнянь, аналогічну (3), з урахуванням наявності декількох показників якості. Однак навіть у разі незалежності та однакової важливості показників рішення такої системи є дуже трудомістким.

У цьому випадку введемо узагальнений показник якості. В якості узагальненого показника якості використовуємо згортку  $n$  приватних нечітких показників у вигляді нечіткого інтеграла Сугено [9]. Лінійний узагальнений показник використовується зазвичай в тому випадку, коли окремі показники взаємно незалежні. Згортка у вигляді нечіткого інтеграла може використовуватися, коли існує взаємозалежність показників, що характерно для більшості задач управління в нечіткій ситуації.

Позначимо через  $K$  сукупність показників  $G_j$ :

$$K = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$$

Для кожного  $X_N$  з кінцевої множини можливих фінальних станів ТП визначимо функцію

$$h: K \rightarrow [0,1],$$

тобто  $h(G_j)$  – нормалізована оцінка показника  $G_j$ ,  $j = 1, \dots, n$ ;

експертним шляхом визначимо  $g_j$  – ступінь важливості показника  $G_j$ ,  $0 \leq g_j \leq 1$ .

Визначимо на  $(K, 2^K)$  нечітку міру  $g$  так:

якщо  $K' \subset K$ , то

$$g(K') = \frac{1}{\lambda} \left[ \prod_{G_j \in K'} (1 + \lambda g_j) - 1 \right],$$

де параметр  $\lambda$  визначається за умови нормування:

$$\frac{1}{\lambda} \left[ \prod_{j=1}^n (1 + \lambda g_j) - 1 \right] = 1.$$

Тоді як  $M_N(X_N)$  візьмемо нечіткий інтеграл від функції  $h$  на множині  $K$  по нечіткій мірі  $g$  [9]:

$$M_N(X_N) = \oint_K h(x) \circ g = \sup_{\alpha \in [0,1]} \left( \alpha \wedge g \left( K \cap H_\alpha \right) \right),$$

де  $H_\alpha = \{x | h(x) \geq \alpha\}$ .

Далі стратегія управління ТП визначається із системи (3).

**ВИСНОВКИ.** Запропонований метод оптимізації стратегії управління ТП за багатьма критеріями з урахуванням їх неоднакової важливості і взаємозалежності узагальнює і розвиває підхід Беллмана-Заде на випадок нечіткої системи в нечітких умовах. Метод дозволяє об'єднати навіть суперечливі цілі управління, поставивши задачу досягнення максимального прибутку на єдиній основі, що поєднує управління кількістю (максимальна продуктивність) з управлінням якістю (максимальний вихід придатних) як складових елементів системи управління ТП.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ладанюк А. П., Архангельська К. С., Власенко Л. О. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами. К.: НУХТ, 2014. 274 с.
2. Nevliudov I.Sh., Chala O.O., Botsman I.V. Determination of technological process modes for surface formation of substrates for functional components of microoptoelectromechanical systems. *Functional Materials*. 2021. 28(2). P. 381-385.
3. Zadeh L. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
4. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій. Підручник. Сьоме видання, перероблене та доповнене. К.: Видавничий Дім «Слово», 2006. 816 с.
5. Желдак Т.А., Коряшкіна Л.С., Ус С.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: за редакцією С.А. Ус. Дніпро: НТУ «ДП», 2020. 387 с.
6. Дубовой В.М., Кветний Р.Н., Михальов О.І., Усов А.В. Моделювання та оптимізація систем: підручник Вінниця: ПП «ТД«Едельвейс», 2017. 804 с.
7. Nevliudov I., Omarov M., Romashov Y. Numerical methods to solve optimal control problems for technical applications under novel global challenges. *ICONAT 2023 International Conference on Natural Science and Technologies*, 2023.
8. Раскін Л.Г., Сіра О.В., Кожевніков Г.К. Методи аналізу систем і прийняття рішень в умовах невизначеності: підручник. Харків : Факт, 2023. 256 с.
9. Djo'rayevich, A. J. (2024). THE IMPORTANCE OF USING THE PEDAGOGICAL METHOD OF THE "INSERT" STRATEGY IN INFORMATION TECHNOLOGY PRACTICAL EXERCISES. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(3), 425-432.

10. Yevsieiev, V., & et al. (2025). Development of a program for processing 3d models of objects in a collaborative robot workspace using an HD camera. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 194-210.
11. Gurin, D., & et al. (2024). Effect of Frame Processing Frequency on Object Identification Using MobileNetV2 Neural Network for a Mobile Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 36-44.
12. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Khosravi, M. R. (2022). Control system development and implementation of a CNC laser engraver for environmental use with remote imaging. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 9140156.
13. Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for Cyber-Physical Production Systems Functioning Synthesis. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(10), 7465-7473.
14. Abu-Jassar AT, Attar H, Amer A, et al. Remote Monitoring System of Patient Status in Social IoT Environments Using Amazon Web Services (AWS) Technologies and Smart Health Care. *International Journal of Crowd Science*, 2024
15. Abu-Jassar A. Building a Route for a Mobile Robot Based on the BRRT and A\*(H-BRRT) Algorithms for the Effective Development of Technological Innovations / Amer Abu-Jassar, Hassan Al-Sukhni, Yasser Al-Sharo, S. Maksymova, V. Yevsieiev, V. Lyashenko // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. – 2024. – V. 72(11). – P. 294-306.
16. Yevsieiev, V., Alkhalaileh, A., Maksymova, S., & Gurin, D. (2024). Research of Existing Methods of Representing a Collaborative Robot-Manipulator Environment within the Framework of Cyber-Physical Production Systems. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(9), 112-120.
17. Vladyslav Yevsieiev, Nikolaj Starodubcev (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. *Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Diversity and Inclusion in Scientific Area»*, Value 140, P.648-651
18. Yevsieiev, V., & Gurin, D. (2023). Comparative Analysis of the Basic Methods Used in Industry 4.0 and Industry 5.0. *Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ»*, (Bologna, Italy), 113–115. <https://doi.org/10.36074/logos-29.09.2023.31>
19. Vladyslav Yevsieiev, Nikolaj Starodubcev (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. *Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Diversity and Inclusion in Scientific Area»*, Value 140, P.648-651
20. Khalid, M. S., Yevsieiev, V., Nevliudov, I. S., Lyashenko, V., & Wahid, R. (2022). HMI development automation with GUI elements for object-Oriented programming Languages implementation.
21. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., & Ahmad, M. A. (2021). GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development.
22. Yevsieiev, V., & Gurin, D. (2024). Study of Methods of Dynamic Description of The Environment for Collaborative Robots-Manipulators in the Concepts of Industry 5.0 (Doctoral dissertation, Collection of scientific papers «SCIENTIA»).
23. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Yevsieiev, V., Amer, A., Demska, N., Luhach, A. K., & Lyashenko, V. (2022). Electronic user authentication key for access to HMI/SCADA via unsecured internet networks. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 5866922.
24. Gurin, D., & et al. (2024). Using Convolutional Neural Networks to Analyze and Detect Key Points of Objects in Image. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(9), 5-15.