

А. О. Андрусевич, А. В. Фролов, М. Г. Стародубцев, Н. П. Демська, Г. С. Макаренко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Анотація. В результаті аналізу задач оптимізації управління технологічними процесами виробництва виробів нової техніки в нечітких умовах виявлено, що при дослідженні технологічного об'єкта управління невисокої розмірності може бути використаний підхід, заснований на заміні нечітких множин множинами α -рівня і зведенні нечіткої оптимізаційної задачі до класичної задачі математичного програмування. Показано що для оптимізації управлінням багатоопераційним технологічними процесами більше раціональним є підхід Беллмана-Заде на основі принципу злиття цілей і обмежень, який вимагає подальшого розвитку на випадок нечітких станів технологічного об'єкта управління. Крім того, не вирішена проблема об'єднання нечітких цілей і обмежень у разі їх неоднакової важливості або взаємозалежності. Для вирішення цих проблем запропоновано метод оптимізації стратегії управління технологічними процесами виробництва за багатьма критеріями. В якості узагальненого критерію використовується згортка критеріїв у вигляді нечіткого інтеграла Сугено.

Ключові слова: оптимізація, управління, технологічний процес, технологічний об'єкт, невизначеність умов.

Вступ

Традиційно під терміном "керований технологічний процес" розуміється такий технологічний процес (ТП), для якого встановлені вхідні керуючі впливи та вихідні параметри та залежності між ними, визначено методи вимірювання вхідних впливів та вихідних параметрів та методи управління процесом [1].

Керованими змінними є:

- параметри ТП;
- стан засобів технологічного оснащення;
- техніко-економічні показники виробництва виробів нової техніки, що формуються в ході ТП (продуктивність, собівартість, точність, вихід придатної продукції та ін.).

На практиці управління ТП, як правило, відбувається в умовах невизначеності, пов'язаної з відсутністю достатньої інформації про поведінку керованих об'єктів, неоднорідністю вихідних матеріалів, високим рівнем шумів, дискретністю за часом вимірювання станів процесу, зміною контрольованих параметрів на кожному кроці процесу, неможливістю точного визначення фазових координат. Більш того, не всі координати вектора стану ТП можуть бути проконтрольовані. Частина факторів, що характеризують роботу промислового об'єкта, або взагалі невідома, або процес виміру пов'язаний із значними труднощами.

Ускладнення ТП призводить до збільшення невизначеності при їхньому функціонуванні. У виробництві виробів нової техніки посилюються тенденції до переходу на багатонаменклатурне дрібносерійне виробництво, яке характеризується малими партіями виробів та великим діапазоном їх розмірів та властивостей. При керуванні такими процесами зростає частота заміни настроювальних величин і підвищуються вимоги до точності та гнучкості настроювальної моделі. Гостро постає проблема адекватності

використовуваних моделей, що визначається, насамперед, реалізацією принципу інформаційної достатності [2].

Недолік кількісної інформації, одержуваної в результаті застосування об'єктивних, але обмежених методів дослідження, певною мірою може бути компенсований інформацією якісного характеру у вигляді інтуїтивних знань і досвіду технолога. Ця інформація носить суб'єктивний характер, і її подання природною мовою, як правило, містить велику кількість невизначеностей типу "багато", "мало", "сильно збільшити", "високий", "дуже ефективний" і т.п., які не мають аналогів мовою традиційної математики. Тому й опис подібної інформації мовою традиційної математики збіднює математичну модель досліджуваного реального процесу і робить його дуже грубим. Разом з тим наявність математичних засобів відображення невизначеності вихідної інформації дозволяє побудувати модель, більш адекватну реальності.

Найбільш поширеним видом невизначеності, що зустрічається при дослідженні ТП, є невизначеність, пов'язана з випадковістю. Теоретико-імовірнісне поняття випадковості відноситься до категорії об'єктивних понять та розглядається як додаткове до поняття причинності; таке уявлення підкріплюється концепцією відтворюваності експериментів, яка узгоджується зі спостереженнями в галузі природничих наук та в техніці. Для роботи з таким видом невизначеності використовуються теорія ймовірностей, математична статистика, теорія випадкових процесів.

Однак розгляд невизначених даних і зв'язків при аналізі ТП показує, що існують різні класи невизначеності, які не завжди пов'язані з випадковістю.

У світлі панівної думки, породженої так званою декартовою раціоналістською методологією, традиційно існує тенденція відкидати такі види невизначеності, як неясність, нечіткість і неточність через їхню

ненаукову або ірраціональну концепцію. У той же час, при управлінні ТП ми постійно стикаємося з ситуацією, коли неможливо уникнути проблеми обліку неясної, нечіткої або неточної інформації.

Одна з основних проблем при цьому – знайти спосіб обробки наявної інформації для вибору раціональних варіантів управління ТП.

Огляд методів обробки невизначеної інформації показав, що найбільш перспективним та систематичним є підхід, заснований на використанні поняття нечіткої множини Заде [3]. Теорія нечітких множин являє собою узагальнення і переосмислення найважливіших напрямків класичної математики. У її витоків лежать ідеї і досягнення багатозначної логіки, яка вказала на можливості переходу від двох до довільного числа значень істинності і поставила задачу оперування поняттями з мінливим змістом; теорії ймовірностей, яка, породивши велику кількість різних способів статистичної обробки експериментальних даних (наприклад, гістограми, функції розподілу), відкрила шляхи визначення та інтерпретації функції приналежності; дискретної математики (теорії матриць, теорії графів, теорії автоматів і т.д.), що запропонувала інструмент для побудови моделей багатовимірних і багаторівневих систем, зручний при вирішенні практичних задач.

Основною прагматичною метою Заде було створення апарату, здатного моделювати людські міркування та пояснювати людські прийоми прийняття рішень під час різних досліджень. Нечіткість розумілася як наслідок суб'єктивності чи індивідуальності людини, яка приймає рішення. Проте під час прикладних досліджень поняття нечіткості розширилося.

У реальних ситуаціях прийняття рішень – цілі, обмеження, критерій вибору може бути неточно визначеними. Джерелом неточності може бути принципова неможливість оперувати точними даними внаслідок складності системи. Тому при побудові моделей прийняття рішень виникає необхідність використання нечіткої логіки, нечітких множин і нечітких відносин. Нечіткі відносини дозволяють моделювати плавну, поступову зміну властивостей, а також невідомі функціональні залежності, частково або повністю виражені у вигляді якісних зв'язків.

Виклад основного матеріалу

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, одержуваною 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, згідно з якою для оцінки відносної переваги кожного альтернативного результату в умовах ризику вводиться спеціальна функція корисності (несуперечливий кількісний опис переваг за якісними критеріями), значення якої для кожної альтернативи встановлюються з врахуванням переваг особою, яка приймає рішення. На основі функції корисності кожної альтернативи та ймовірностей їх реалізації формується функція корисності кожної дії в цілому. Далі вибирається дія, що забезпечує максимум знайденої таким чином функції корисності. Однак альтернативи можуть відрізнятися між собою за цілою низкою факторів або критеріїв. Багатовимірна альтернатива оцінюється відповідно за допомогою багатовимірної функції корисності. Побудова багатовимірних функцій корисності є надзвичайно складною проблемою [4].

В [5] розглянуті методи звуження множини допустимих альтернатив. До них належать методи, що ґрунтуються на ідеях ефективних компромісів Парето, гарантовані оцінки Гермейера та вибір рішень на основі нечіткого опису Заде.

Відповідно до принципу Парето можливі рішення слід шукати лише серед невідомованих (недомінованих) альтернатив, тобто альтернатив, поліпшення яких за одними критеріями призводить до їх погіршення за іншими критеріями. Оскільки ніякий математичний аналіз не може дати точного результату вибору альтернатив в умовах невизначеності, побудова множини недомінованих альтернатив є нетривіальною задачею.

В основі методу гарантованих оцінок Гермейера лежить принцип максимуму. При вирішенні проблем прийняття рішень в умовах невизначеності може бути лише один строгий математичний результат – це оцінка, отримана на основі принципу максимуму. Гарантований результат є єдиною опорною точкою. Далі лежать гіпотези і ризик. Однак це твердження не означає, що потрібно вибирати саме ту альтернативу, яка реалізує цей гарантований результат. Він може бути і дуже хорошим і абсолютно неприйнятним.

Стиснути множину можливих альтернатив дозволяє також техніка Заде. У схемах аналізу будується

деяка система гіпотез. Вони формулюються в термінах «суб'єктивної» приналежності. Далі, в результаті аналізу отримуємо рішення в нечіткій формі – у формі приналежності деякій множині, а потім його дефазифікуємо. Використання інформації, заданої у формі нечітких множин, призводить до нових формулювань оптимізаційних задач і методів їх вирішення.

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 φ_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 φ_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 α -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 задані:

$f: X \rightarrow R^1$ – 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 μ_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.

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

Якщо альтернатива $x_0 \in X$ є рішенням задачі $f(x) \rightarrow \max$ на множині рівня α , то α трактується як ступінь належності альтернативи x_0 нечіткій множині рішень вихідної задачі нечіткого математичного програмування. Перебравши всілякі α , отримаємо функцію приналежності нечіткого рішення. Для всякого $\alpha \geq 0$, такого, що $c_\alpha \neq \emptyset$, 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 α . 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 багатомірних 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 результируючий показник якості ТП, який в принципі визначить єдине рішення задачі оптимізації ТП. Оскільки можливості об'єктивного вибору результируючого 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 результируючу ФП. Для знаходження максимізуючого 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.

В задачі 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

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

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) треба обчислити $M_{N-v+1}(X_{N-v+1})$, тобто визначити ступінь 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

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

У реальних умовах при управлінні ТП виробництва виробів нової техніки можлива наявність декількох показників якості. Нехай G_j – нечітка множина, що характеризує j -й показник ($j = 1, \dots, n$).

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 « $\tilde{\cdot}$ » – оператор нечіткості;

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

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):

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:

Тоді нечітка множина D , що є рішенням задачі, буде визначатися формулою

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

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 .

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 λ 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. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. Винниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. 320 с.

Received (Надійшла) 03.05.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.07.2024

Optimization of the strategy of process management in conditions of uncertainty

Anatoliy Andrusevich, Andrei Frolov, Mykola Starodubcev, Nataliia Demaska, Hennadii Makarenko

Abstract. As a result of the analysis of tasks of optimization of technological processes of production of products of new technology in fuzzy conditions, it was found that in the study of a technological control object of low dimension, an approach can be used based on replacing fuzzy sets with sets of α -level and reducing the fuzzy optimization problem to the classical problem of mathematical programming. It is shown that the Bellman-Zade approach based on the principle of merging goals and constraints is more rational for optimizing the management of multi-operational technological processes, which requires further development in case of fuzzy states of the technological control object. In addition, the problem of combining fuzzy goals and restrictions in case of their unequal importance or interdependence is not solved. To solve these problems, a method of optimizing the strategy for managing production processes according to many criteria has been proposed. The convolution of criteria in the form of a fuzzy Sugeno integral is used as a generalized criterion.

Keywords: optimization, control, technological process, technological object, uncertainty of conditions.