

# THE ADAPTIVE OPTIMISATION FOR TASK OF MINIMIZATION OF EXPENSIVE FOR MULTIASSORTMENT PRODUCTION

V. Ivashchuk, A. Ladanyuk

National University of Food Technologies

Key words:	ABSTRACT
multivariable, control, optimization, assortment, nonlinear	The method of construction for optimal control of multi-assortment production for to minimize of costs, during process transition to mode of setting of parameters of technological system, are purposes in article. The analysis of components of optimization system had been presented. Deficiencies, which are associated with characteristics of real objects of industry, in term of automatic control and observability, are pointed. The method that had been proposed allows realization of optimal control, in terms of loss of most expensive resource of technological system. The recursion of dimensionality to a base model of process and maintenance of state variables of object, which responsible from targeted characteristics of product, is provided for this purpose. The effectiveness of method is supported by comparative analysis with optimization methods, which are practically involved for actual control systems. The practical assessment is obtained by mathematical modeling for analytical model of technological processes, which has contained in its composition the object of research
<b>Article history:</b> Received 10.04.2016 Received in revised form 16.03.2016 Accepted 25.03.2016	
<b>Corresponding author:</b> ivaschuk@nuft.edu.ua	

## АДАПТИВНА ОПТИМІЗАЦІЯ ДЛЯ ЗАДАЧІ МІНІМІЗАЦІЇ ВИТРАТ БАГАТОАСОРТИМЕНТНОГО ВИРОБНИЦТВА

В.В. Івашук, канд.техн.наук,

А.П. Ладанюк, д-р техн.наук

Національний університет харчових технологій

*В статті запропоновано методику побудови оптимального керування багатоасортиментним виробництвом, з метою мінімізації витрат під час перехідного процесу до режиму встановлення параметрів технологічної системи. Представлено аналіз складових системи оптимізації. Вказано на недоліки, що пов'язуються з характеристиками реальних об'єктів промисловості, з позиції автоматизованого керування та спостережності. Запропонована методика дозволяє реалізувати оптимальне, з позицій витрат найбільш затратних ресурсів технологічної системи, керування. Практична оцінка отримана шляхом математичного моделювання на аналітичній моделі технологічних процесів, що містять в своєму складі об'єкт дослідження.*

**Ключові слова:** багатопараметричне, керування, оптимізація, асортимент, нелінійний.

**Вступ.** При реалізації багатоасортиментного виробництва в межах єдиного технологічного комплексу необхідно забезпечувати режимні параметри технологічних агрегатів для формування регламентованих технологічних характеристик продукту.

Так у класі стаціонарних систем виділяють задачі оптимізації за мінімальною статичною похибкою, а у разі застосування на динамічних системах — оптимальні за швидкодією.

Для сходження координат стану об'єкта до встановленого режиму необхідно реалізувати мінімальну траєкторію перехідного процесу до цільових значень координат. Так, типовою методикою керування є виведення на технологічний режим головного технологічного параметра, який пов'язаний з найбільш затратним керуванням, до мінімальної похибки, відносно зміни завдання. Всі інші параметри часто не є узгодженими або формуються у якості регуляторів співвідношення, де розраховані на реалізацію лінійних залежностей за основною координатою, що слугує завданням для регулятора керованої координати. Розбіжності в оцінці таких систем не дозволяють реалізувати зазначені вище задачі, а тому реалізація багатомірного керування динамічних процесів досі не має практичного розповсюдження.

**Мета досліджень.** Оскільки кожна технологічна змінна системи має власне джерело інтенсивності, що у відповідності до вимог продуктивності об'єкту у швидкості та об'ємах перероблюваного продукту обумовлює втрату лінійності для асоціації характеристик «межі варіювання–продуктивність», то ж процедура координатного сходження повинна забезпечувати адекватність координації до динаміки міжпараметричних зв'язків. А оскільки при зміні технологічного регламенту напрям вектору параметрів змінюваних координат стану об'єкта також змінює своє розташування, то й відповідної адаптації вимагає крок сходження та порядок координації елементів вектора багатомірного керування. Швидкість та тренд до мінімізації похибки в розбіжностях динамічних реалізацій гарантують мінімальні втрати, через зменшення надлишкової інтенсивності, що може бути оцінена як спектральна потужність, яка застосована для задачі координації.

**Матеріали та методи.** В самому простому випадку застосування лінійних стаціонарних моделей об'єкта є оптимальним наближенням через мінімізацію середньоквадратичного критерію помилки [1]. Але, стандартні методи перевірки, що призначені для ідентифікації лінійних систем, не завжди можуть бути використані для перевірки оптимального лінійного наближення нелінійної системи. У стандартних методах гарантованого керування, розмір помилки моделі передбачається відомим для всіх вхідних сигналів [2—4]. Тим не менш, у багатьох ситуаціях це не є реалістичним припущенням, коли нелінійна система апроксимується до лінійної моделі [5]. Поставлена задача оптимізації розглядає пошук оптимального розв'язку у деякому відношенні, що може бути сформульоване через критеріальну задачу. Критерії можуть представляти багатомірну умову, яка за наявності корельованості між ними може бути зведена до єдиного [6]. При цьому задача досягнення критерію забезпечується координацією у багатомірному просторі. Для конкретних об'єктів простір варіацій обмежується окремо для кожної координати. Типово, в задачах багатопараметричної оптимізації використовуються метод Ньютонівського спуску Гауса-Зейделя, метод спряжених градієнтів Флетчера-Рівса для яких важливим є існування похідної цільового функціоналу. При наявності розривів першого роду у похідній функції, що оптимізується, процес оптимізації зупиняється без досягнення оптимального значення. Так оскільки маємо справу з функціями, що проявляють нелінійні властивості, то проблема може виявитися вельми актуальною, а з урахування того, що для оптимізації передбачається рекурсія багатокритеріальної задачі, ефективність вказаних вище методів залишається під сумнівом. Для задач, де зазначена особливість передбачається, застосовують симплекс метод Недлера-Міда, метод Марквуда-Левенберга або метод пошуку по зразку Хука-Дживса [7—9]. Використання методів субдеференціювання зводить до отримання інтервальних оцінок, що частково або наближено представляють поведінку розривних функцій, тобто таких, що наближають цільову залежність множиною функцій та похідна яких не є неперервною функцією керованих аргументів [10—12]. Складною проблемою оптимізації є відсутність спостережності вихідних координат, які б забезпечили сходження з мінімальною динамічною похибкою. Тому методи багатовимірної оптимізації, що використовуються в практичних випадках, не можуть бути рекомендовані для розв'язку задач багатоасортиментного керування. Додатковим ускладненням є втрата лінійності реальних функціональних залежностей при збільшенні діапазону зміни керованих координат. Особлива увага дослідження викликана застосуванням методів оптимізації на об'єктах: сушіння рідких молочних продуктів у колонній сушарці, через багатомірність та вимоги до точності процесу оптимізації; при випіканні хлібної продукції в промислових газових печах, з погляду недостатньої спостережності об'єкта.

Найближчим до характеристик методу координації, для даного класу задач, є метод зовнішніх штрафних функцій, що реалізує мінімум на множині аргументів штрафних функцій, які представляють множину допустимих розв'язків.

Оцінку похибки сходження результатуої функції, як такої що має відповідати за загальний результат динамічного перехідного процесу, можна отримати інтегральним квадратичним критерієм. Якість оптимізації будемо оцінювати з-поміж помилок існуючих методів та представленою методикою оптимізації.

**Результати досліджень.** Оскільки забезпечувати параметричний режим для отримання цільового продукту необхідно, то задача мінімізації витрат трансформується у необхідність мінімізації помилок  $dx_i/dt$ , при забезпеченні оптимального напрямку та масштабу покрової координаті вектору управління  $\bar{X}$ . Для отримання максимальної продуктивності встановленої задачі, мінімізація маршруту координаті розглядається в проєкціях за напрямком зміни елементу керування  $x_{kor} \in \bar{X}$ , який є найбільш затратним:

$$\text{var } x_i = \left\| \frac{a_{i,j}}{a_{kor,j}} \right\|_j x_{kor}, \tag{1}$$

де відображення міжпараметричних зв'язків є  $A_i : x_i \rightarrow y_n, A_i \{a_{i,j}, a_{i,j+1}, .. a_{i,m}\}$ .  $y_n \in \bar{Y}, n \in R$ , де  $n$  — розмірність параметричної задачі координаті,  $j$  — порядок представлення нелінійної задачі.

Для об'єктів із запізнюванням, яке не вдається компенсувати статичною зміною керуючих координат, єдиною можливістю реалізації ефективного керування є застосування прогнозуючих моделей, що мають супроводжувати оцінку необхідної керувальної дії задачі варіації координат стану  $\bar{Y}$  через відновлений вектор керування  $\bar{X}$ .

Сформулюємо достатню умову екстремуму, якої має притримуватись алгоритм сходження при русі до цільового простору координат. Якщо при виконанні  $f_i : \bar{X} \rightarrow \bar{Y}$ , для яких  $\forall \bar{X} \in \bar{X}, f^{-1}(\bar{X}) \in A f^{-1}(\bar{X})$  є повним відображенням множини  $\bar{X}$  так, що  $f^{-1}(\bar{X})$  є частково-монотонною функцією, яка представляє міжпараметричні зв'язки за (1), де зміна евклідової норми відбувається так, що кореляційна залежність між іншими елементами вектора  $\bar{X}, x_i \in \bar{X}$ , що отримує, відображення як  $A_i : x_i \rightarrow y_n$ , а керування втрачає лінійність більш ніж на

$$\|a_{i,j} - a_{i+1,j}\| \leq \Delta a_i + \delta, \tag{2}$$

то рух приймається за такий, що наближає екстремум функціоналу. При порушенні (2) є підстава для адаптації функціоналів зв'язку (1) між аргументами та цільовими координатами стану процесу з  $\bar{Y}$ . При цьому вважається, що досліджувана функція є повністю вимірюваною апроксимуючою  $f^{-1}$  за Лебегом. Крок сходження розраховується в залежності від відстані та максимальної помилки «міжпараметричної відстані»  $\Delta a_i + \delta$  з (2), що відповідає за неузгодженість інтенсивностей впливу за кожним параметром середовища, який реалізовано відповідним елементом з вектору керування. Стаціонарна поведінка некорельованих змінних  $f_i(x) = 0$  призводить до рекурсії розмірності задачі координаті. Мінімальна норма (1), що встановлює залежність між інтенсивністю та динамікою, обмежується автокореляційною функцією керованої змінної за якою відбувається сходження цільової координати стану

$$\lim df/dt = T_{acor}^{-1}, \tag{3}$$

де  $T_{acor}$  — максимальний час сходження автокореляційної функції. Визначення часу запізнення для керованих координат з найбільшою сталою часу, для яких орієнтований рух в  $\delta$  — обмежаному координатному просторі гарантує збіжність алгоритму. Оцінка часу запізнення відбувається через оцінку взаємокореляційної функції, яка інтегрально оцінює перетворення реальних сигналів для адекватної функціональної залежності.

Розмір кроку буде залежати від відстані до цільового значення  $y_{i\_dec}$  рівноваги в системі за (1) для  $a_i : \Delta y_i \rightarrow \Delta x_i$ . Доведення динамічної збіжності полягає у забезпеченні необхідної швидкості сходження змінних керування. Сходження повинно задовольняти обмеженням, в деяких випадках нелінійним або розподіленим за частковою похідною іншої координати (наприклад для супроводження траєкторії насичення, полів сталого значення параметра). Якщо функції корельовані, то крокування за ними відбуватиметься за узгодженим кроком

$$\Delta x_i = f_i^{-1} \Delta x_{kor} \quad (4)$$

Якщо прийняти, що точність сходження встановлюється як

$$\Delta x_i = 1,2 \cdot T_{y\_max} \sum_{i=1}^n T^{-1}_{xi} \cdot f_i^{-1} |y_{i0} - y_{i\_dec}|^{-1}, \quad (5)$$

$$\forall x_i \exists dx_i/dt \neq 0, dx_i/dt \in a_i^{-1} \cdot (x_{i0}; x_{i\_dec})$$

$x_{i0}$  та  $x_{i\_dec}$  — початкове та цільове значення керуючої змінної, то заявлена точність  $\Delta y_i$  у відповідності до відстані до цільового значення координати

$|y_{i0} - y_{i\_dec}|$ , що вказуватиме на швидкість наближення до цільового значення обраної координати. На кожному кроці функція керування змінює інтенсивність по відношенню тільки до одного зі своїх аргументів з  $\bar{X}$  при використанні попереднього значення іншого. Ітераційний підхід в обмежаному просторі координат гарантує, що функція вартості буде монотонно змінюватися в обраному напрямку вектора керування протягом ітерацій.

Оцінка ефективності інтегральним квадратичним критерієм (табл. 1) дає підстави рекомендувати методику для об'єктів з поганою динамікою, де швидкість сходження обмежується динамікою найбільш повільної координати з числа задіяних для зміни цільової характеристики продукту.

**Таблиця 1. Порівняльний оцінка ефективності керування на об'єктах з незадовільною динамікою**

Алгоритм\характеристика	Швидкість сходження, хв	Інтегральний критерій якості	$\delta$ приведена
Симплекс	178	8,27	0,64
Градiєнтний	198	14,15	0,77
Адаптивний за моделлю	76	0,87	2,28

Для об'єктів великої розмірності (табл. 2) ефективність з точки зору витрат забезпечується вдалим вибором початкового напрямку, через який зменшується кількість необхідних оцінок стану вихідної координати, кожна з яких вносить додаткове запізнення та втрату в інтегральну оцінку ефективності.

**Таблиця 2. Порівняльний оцінка ефективності керування на об'єктах великої розмірності**

Алгоритм\характеристика	Швидкість сходження, хв	Інтегральний критерій якості	$\delta$ приведена
Симплекс	2,14	2,527	0,14
Градiєнтний	3,86	1,815	0,07
Адаптивний з за моделлю	1,88	1,37	3,47

**Висновки.** Запропонована процедура координатного сходження забезпечує адаптацію процесу оптимізації до динаміки міжпараметричних зв'язків. Вказана методика змінювання кроку призводить до мінімізації інтегральної похибки в розбіжностях динамічних реалізацій, що забезпечує мінімальні втрати, через надлишкової інтенсивності для здійснення задачі оптимізації. Врахування динамічних характеристик об'єкта виключає накопичувати помилки в процесі варіацій навколо цільових значень обраних координат. Отримані оцінки моделювання

підтверджують практичну ефективність при використанні методики оптимізації для промислових об'єктів. Поряд з визначеними проблемами оптимізації визначені такі, що пов'язані власне з теорією управління, а саме: існування і єдність оптимальних процесів; залежність оптимальних процесів від варіацій вихідних даних, які обгрутовують актуальність подальших досліджень.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Nonlinear system identification via direct weight optimization* / Roll J., Nazin A., Ljung L. // *J. Automatica*. — 2005. — V.41(3). — P. 475—490.
2. *Nonlinear observers for perspective time-invariant linear systems* / R. Abdursul, H. Inaba, B. K. Ghosh // *J. Automatica*. — 2004. — V.40. — P. 481—490.
3. *A new state observer for perspective systems* / X. Chen, H. Kano // *IEEE Transactions on Automatic Control*. — 2002. — V.47(4). — P. 658—663.
4. *Bertsekas, D.P. Convex Optimization Algorithms* / D.P. Bertsekas. — Athena Scientific, 2014. — 576p.
5. *Boyd S. Convex Optimization* / S. Boyd, L. Vandenberghe. — Cambridge: Cambridge University Press, 2004. — 727p.
6. *ACADO toolkit — An open-source framework for automatic control and dynamic optimization* / B. Houska, H.J. Ferreau M. Diehl // *J. Optimal Control Applications and Methods*. — 2011. — V.32(3). — P. 291—312.
7. *Обзор методов многомерной оптимизации* / Е.М. Захарова, И.К. Минашина // *Информационные процессы*. — 2014. — V.14(3). — P. 256—274.
8. *Струченков В.И. Методы оптимизации в прикладных задачах* / В.И. Струченков. — Москва: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. — 320 с.
9. *Многомерная многоэкстремальная оптимизация на основе адаптивной многошаговой редукции размерности* / Гегель В.П. Гришагин В.А. Гегель А.В. // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. — 2010. — №.1. — с. 163—170.
10. *Suboptimal model predictive control (feasibility implies stability)* / P.O.M. Sokaert, D.Q. Mayne, J.B. Rawlings // *IEEE Tr. Automatic Control*. — 1999. — V.44(3). — P. 648—654.
11. *Portfolio optimization by minimizing conditional value-at-risk via nondifferentiable optimization* / L. Churlzu, H. D. Sherali, S. Uryasev // *Computational Optimization and Applications*. — 2012. — V.46(3). — P. 391—415.
12. *Bagirov A. Introduction to Nonsmooth Optimization: Theory, Practice and Software* / A. Bagirov, N. Karmita, M.M. Mdkeld. — Switzerland: Springer International Publishing, 2014. — 372p.

## АДАПТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ МИНИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ МНОГОАССОРТИМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**В.В. Иващук, А.П.Ладанюк**

*Национальный университет пищевых технологий*

*В статье предложена методика построения оптимального управления многоассортиментным производством, с целью минимизации расходов во время переходного процесса к режиму настройки параметров технологической системы. Представлен анализ составляющих системы оптимизации. Указано на недостатки, что связаны с характеристиками реальных объектов промышленности, с позиции автоматизированного управления и наблюдаемости. Предложенная методика позволяет реализовать оптимальное управление, с точки зрения потерь наиболее затратных ресурсов технологической системы. Практическая оценка получена путем математического моделирования на аналитической модели технологических процессов, содержащих в своем составе объект исследования.*

**Ключевые слова:** *многопараметрические, управление, оптимизация, ассортимент, нелинейный.*