



ДВУХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ УЗЛА СИНТЕЗА КАРБАМИДА НА ОСНОВЕ СПОСОБА КООРДИНАЦИИ

Ботиров Тулкин ^{1[0000-0001-5422-9140]}, **Бахронов Алишер**²

¹Навоийский государственный горно-технологический университет, кафедра
«Автоматизация и управление», д.т.н. профессор, E-mail: btv1979@mail.ru

²Магистрант кафедры «Автоматизация и управление» Навоийского государственного
горно-технологического университета

Аннотация. В статье исследуется двухуровневая система оптимизации узла синтеза карбамида на основе метода координации. На основе иерархического подхода к управлению рассмотрены задачи минимизации локальных и глобальных функций качества. Предложенная модель позволяет повысить эффективность технологических процессов, снизить энергозатраты и обеспечить устойчивость системы.

Ключевые слова: синтез карбамида, двухуровневая оптимизация, метод координации, иерархическая система управления, управление технологическими процессами.

Annotatsiya. Maqolada koordinatsiya usuliga asoslangan karbamid sintezi uzeli ikki darajali optimallashtirish tizimi tadqiq etilgan. Ierarxik boshqaruv yondashuvi asosida lokal va global sifat funksiyalarini minimallashtirish masalalari ko'rib chiqilgan. Taklif etilgan model texnologik jarayonlarning samaradorligini oshirish, energiya sarfini kamaytirish va tizim barqarorligini ta'minlash imkonini beradi.

Kalit so'zlar: karbamid sintezi, ikki darajali optimallashtirish, koordinatsiya usuli, ierarxik boshqaruv tizimi, texnologik jarayonlarni boshqarish.

Annotation. The article investigates a two-level optimization system for the urea synthesis unit based on the coordination method. Using a hierarchical control approach, the problems of minimizing local and global quality functions are considered. The proposed model makes it possible to improve the efficiency of technological processes, reduce energy consumption, and ensure system stability.

Key words: urea synthesis, two-level optimization, coordination method, hierarchical control system, technological process control.

Введение

Создание и успешная реализация систем управления технологическими процессами и комплексами с непрерывным характером производства предполагают решение комплекса научных и технических задач, связанных с алгоритмизацией, моделированием и оптимизацией процессов производства, рассмотрением теоретических аспектов управления сложными системами, совершенствованием алгоритмов синтеза разнообразных вычислительных схем обработки информации и управления.

При этом важным способом преодоления противоречий между желаемой простотой и потребностью учета широкого спектра производственных характеристик сложных технологических объектов и комплексов является иерархическое многоуровневое представление как объектов управления, так и процессов формирования управленческих решений. Такая многоуровневая структура

предусматривает расчленение системы управления на ряд взаимодействующих подсистем, выявление между ними связей, соподчиненность уровней управления, сбор информации о состоянии подсистем, координацию структурных связей, реализацию принципов приспособления системы к действию сигнальных, параметрических и структурных возмущений [1-2].

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция роста доли карбамида в структуре потребления азотных удобрений. Это обусловлено его высокой концентрацией азота, благоприятными агрохимическими свойствами, а также рядом эксплуатационных и экологических недостатков аммиачной селитры и других аммиачных удобрений. Расширение областей применения мочевины обуславливает необходимость совершенствования существующих технологических схем с целью увеличения выхода целевого продукта и снижения удельных энергетических затрат.

Карбамид представляет собой кристаллическое вещество белого или слегка желтоватого цвета и является наиболее концентрированным твердым азотным удобрением. Он хорошо растворяется в жидком аммиаке, образуя нестойкие соединения, растворимость которых существенно возрастает с увеличением температуры. Промышленное производство карбамида основано на реакции взаимодействия аммиака с диоксидом углерода - принципиальная возможность такого синтеза была экспериментально подтверждена более века назад.

Современные технологические схемы синтеза карбамида включают многостадийную переработку, в том числе процессы синтеза под высоким давлением, ступенчатую дистилляцию, вакуумное выпаривание, гранулирование и последующую обработку готового продукта. Эффективность работы узла синтеза определяется совокупностью факторов, среди которых особую роль играют качество исходного сырья, способ подачи CO_2 , степень превращения карбамата аммония, температурно-давленческие режимы реактора, а также надёжность оборудования и энергопотребление [3-6].

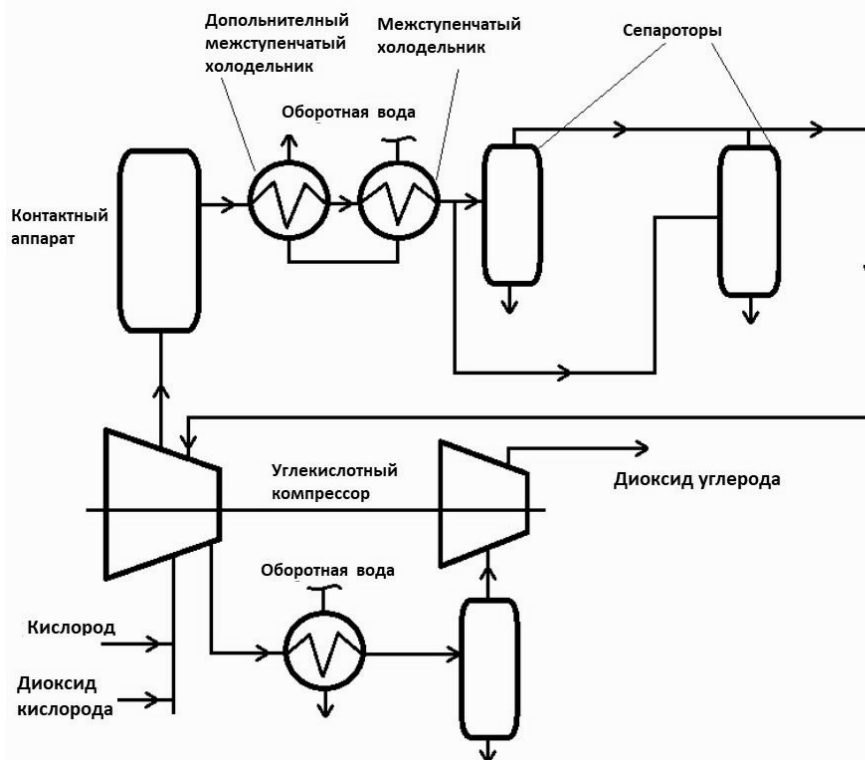


Рис.1. Принципиальная схема межступенчатого размещения узла выжигания горючих газов.



С учётом изложенного процесс управления узлом выжигания горючих газов целесообразно рассматривать как многоуровневую систему со стационарной структурой и априорно неопределёнными параметрами. Для формализации задачи используется двухуровневая модель, в рамках которой система декомпозируется на два взаимосвязанных подпроцесса, взаимодействующих через связующие входы [7,8].

Пусть $M_i = Y_i = U_i = R$, где $i=1,2$. Рассмотрим двухуровневую систему, имеющую два подпроцесса P_1 и P_2 , описываемые уравнениями

$$y_1 = m_1 - u_1 \equiv P_1(m_1, u_1), \quad y_2 = m_2 - 2u_2 \equiv P_2(m_2, u_2).$$

со связующими входами

$$u_1 = y_2 - \frac{1}{2}m_2 \equiv H_1(m, y), \quad u_2 = y_1 - \frac{1}{2}m_1 \equiv H_2(m, y).$$

Исходя из этого $P: M \rightarrow Y$ и $K: M \rightarrow U$ тогда получим:

$$P(m) = Pm, \quad K(m) = Km,$$

здесь P и K - матрицы с размерностями 2×2

$$P = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix},$$

Пусть глобальная функция качества G задана на $M \times Y$ в виде суммы $G(m, y) = G_1(m_1, y_1) + G_2(m_2, y_2)$ локальных функций качества G_1 и G_2 , которые являются квадратичными формами

$$G_i(m_i, y_i) = m_i^2 + (y_i - 1)^2,$$

здесь $i=1,2$. оптимальной управляющий сигнал определен с помощью минимизации $g(m) = G(m, P(m))$ на M , $\hat{m} = (\frac{1}{2}, 0)$.

Если задано множество $B = R^2$ и для координирующего воздействия $\beta \in B$ найден функции качества $G_{i\beta}$ в виде

$$G_{1\beta}(m_1, u_1, y_1) = G_1(m_1, y_1) + \beta_1 u_1 + \frac{1}{2}(\beta_2 - 2\beta_1)m_1,$$

$$G_{2\beta}(m_2, u_2, y_2) = G_2(m_2, y_2) + \beta_2 u_2 + \frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2)m_2.$$

Функции качества являются скомпенсированными, что обеспечивает согласование взаимодействий и координируемость системы. Каждая задача обладает оптимальным решением для β .

$$\begin{aligned} m_1(\beta) &= -\frac{1}{4}\beta_2, \quad u_1(\beta) = -(1 + \frac{1}{2}\beta_1 + \frac{1}{4}\beta_2), \\ m_2(\beta) &= -\frac{1}{4}\beta_1, \quad u_2(\beta) = -\frac{1}{2}(1 + \frac{1}{4}\beta_1 + \frac{1}{4}\beta_2) \end{aligned} \quad (1)$$

Сигнал $\hat{\beta} = (-\frac{8}{5}, -2)$.

Координатор формируется $\hat{\beta}$ в случае, если при выборе координирующего сигнала обеспечивается его последовательное улучшение:

$$\beta' = \beta + \lambda[u(\beta) - Km(\beta)], \quad (2)$$

здесь λ - диагональная матрица. Подставляя в (2) выражения для значений $m(\beta)$ и $u(\beta)$ подставляем (2), найдем β' :

$$\beta'_1 = (1 - \frac{3}{8}\lambda_{11})\beta - \lambda_{11}, \quad \beta'_2 = (1 - \frac{3}{4}\lambda_{22})\beta_2 - \frac{1}{2}\lambda_{22}.$$

Данные два выражения задают соответствующее преобразования $T: B \rightarrow B$. Поскольку оптимальные решения локальных задач единственны, а система координируема на основе принципа согласования взаимодействий, указанное



преобразования T обладает неподвижной точкой, соответствующей оптимальному координирующему сигналу $\hat{\beta}$.

При выборе диагональной матрицы λ , удовлетворяющей заданным условиям, $0 < \lambda_{11} < \frac{1}{3}$ и $0 < \lambda_{22} < \frac{8}{3}$ итеративное применение T соответствующего преобразования порождает последовательность координирующих сигналов $\hat{\beta}$, сходящуюся по норме $\|x\| = \max_i |x_i|$ к оптимальному координирующему сигналу. Сходимость не зависит от β [9,10].

Рассмотрим систему, аналогичную ранее описанной, с применением принципа прогнозирования взаимодействий через координацию целей. Для каждого координирующего сигнала, заданного парой (α, β) , здесь α - прогнозные значения связующих входов, соответствующие локальные задачи обладают единственными оптимальными решениями:

$$m_1(\alpha, \beta) = \frac{1}{8}(4 + 4\alpha_1 + 2\beta_1 - \beta_2),$$

$$m_2(\alpha, \beta) = \frac{1}{8}(4 + 8\alpha_2 - \beta_1 + \beta_2).$$

Прогнозирования взаимодействий используется к системе через отображение $\eta: M \rightarrow B$, задаваемое как $\eta(m) = \theta(K(m))$, где $\theta: A \rightarrow B$ определяется из соотношений:

$$\begin{aligned}\theta_1(\alpha) &= 4(-\alpha_1 + 2\alpha_2), \\ \theta_2(\alpha) &= 4(\alpha_1 - 4\alpha_2 - 1),\end{aligned}\tag{3}$$

(3) подставляя $\alpha = u(\beta)$ решаем задачи относительно β , α . Можно получить, что система координируема относительно η .

Используя преобразования получим, что пары (α, β) условие: $\beta = \eta(m(\alpha, \beta))$ и $\alpha = Km(\alpha, \beta)$ влечет за собой $m(\alpha, \beta) = m = (\frac{1}{2}, \frac{2}{5})$. Кроме того, пара $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$, здесь $\hat{\alpha} = (\frac{3}{10}, -\frac{1}{20})$ и $\hat{\beta} = (-\frac{8}{5}, -2)$, единственная пара координирующих сигналов, для которой $\beta = \eta(m(\hat{\alpha}, \hat{\beta}))$ и $\hat{\alpha} = Km(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$.

$(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ можно найдена координирующих воздействия на основе принципа координации [9-10].

$$\alpha' = \alpha + \mu[\beta - \eta(m(\alpha, \beta))], \quad \beta' = \beta + \lambda[\alpha, \beta)].$$

здесь λ и μ матрицы. Преобразуя правых частей уравнения виде через α и β , $T_\eta: A \times B \rightarrow A \times B$ получим:

$$\alpha'_1 = \alpha_1 + \frac{1}{4}\mu_{11}(16\alpha_1 - 24\alpha_2 + 15\beta_1 - 7\beta_2 + 4),$$

$$\alpha'_2 = \alpha_2 + \frac{1}{4}\mu_{22}(-24\alpha_1 + 40\alpha_2 - 17\beta_1 + 15\beta_2 + 12),$$

$$\beta'_1 = \beta_1 + \frac{1}{16}\lambda_{11}(8\alpha_1 + 8\alpha_2 - 5\beta_1 + 3\beta_2 - 4),$$

$$\beta'_2 = \beta_2 + \frac{1}{16}\lambda_{22}(4\alpha_1 + 8\alpha_2 + 3\beta_1 - 2\beta_2).$$

Например λ и μ выбраны с достаточно малыми нормами, то итеративное применение T_η порождает последовательность координирующих сигналов, сходящуюся к оптимальной паре $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$.

Заключение

Результаты исследования показывают, что двухуровневый подход оптимизации на основе метода координации позволяет существенно повысить



эффективность управления узлом синтеза карбамида. Иерархическая структура обеспечивает согласование работы локальных подсистем и достижение глобально оптимального режима. Предложенная модель имеет практическую значимость для повышения устойчивости технологических процессов, снижения энергозатрат и улучшения производственных показателей.

Список использованной литературы:

- [1]. Месарович М. Д., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем. — М.: Мир, 2002. — 344 с.
- [2]. Скурихин В. И., Ковалев В. Н. Координация и оптимизация в сложных системах управления. — Киев: Наукова думка, 2003. — 312 с.
- [3]. Астахов А. М. Оптимальное управление химико-технологическими процессами. — М.: Наука, 2004. — 286 с.
- [4]. Botirov, T., Latipov, S., & Khusanov, Z. (2023). Adaptability analysis of linear continuous control systems with reference model. In E3S Web of Conferences (Vol. 417, p. 05015). EDP Sciences.
- [5]. Cheng C., Wang J., Li P. Hierarchical coordinated predictive control for process industries // *Applied Sciences*. — 2024. — Vol. 14, No. 3. — P. 1–18.
- [6]. Botirov T. et al. Mathematical model of the movement of dust-contained air flows in the air filter of hydraulic systems // *E3S Web of Conferences*. — EDP Sciences, 2023. — T. 390. — C. 04012.
- [7]. Baxtiyorovich, Latipov Shahriyor. "KIMYOVIY TEXNOLOGIK TIZIMLARNING DIFFERENSIAL TENGLAMALAR ASOSIDA MODELLASHTIRILISHI." *IJODKOR O'QITUVCHI* 5.49 (2025): 233-235.
- [8]. Daoutidis P., Zachar M. Dynamics and control of integrated process systems // *Chemical Engineering Science*. — 2018. — Vol. 189. — P. 26–38.
- [9]. Igamberdiev H. Z., Botirov T. V. Algorithms for the Synthesis of a Neural Network Regulator for Control of Dynamic Advances in Intelligent Systems and Computing 1323 *AISC*. — 2021.
- [10]. Латипов Ш. Б. Адаптивная система управления с эталонной моделью в условиях параметрической неопределенности // *Journal of Advances in Engineering Technology*. — 2024. — №. 1. — С. 37-42.