

СИНТЕЗ СУБОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МІНІМАЛЬНОЇ СКЛАДНОСТІ ВАКУУМНОЮ РЕКТИФІКАЦІЙНОЮ КОЛОНОЮ СПИРТОВОГО ВИРОБНИЦТВА

А. О. Стопакевич, О.А. Стопакевич

Державний університет інтелектуальних технологій та зв'язку,
1, Кузнечна, Одеса, 65029, stopakevich@gmail.com
Національний університет «Одеська політехніка»,
1, пр. Шевченка, Одеса, 65044, stopakevich@opu.ua

Розроблено новий метод синтезу багатовимірних систем автоматичного керування мінімальної складності з наближеним до інтегрально квадратичного критерієм оптимальності ISE, який доцільно застосовувати для синтезу систем керування ректифікаційними колонами. Метод включає розв'язок наступних задач: розробка нової форми запису багатовимірної системи в просторі станів; розробка процедури синтезу оптимального багатовимірного регулятора, який має властивість інтегрованості й зручну матричну розріджену структуру; розробка нового методу синтезу регулятора блочної структури, якість керування якого є наближеною до оптимального багатовимірного регулятора. Найбільш істотним результатом роботи є розробка ітеративного алгоритму синтезу, який базується на застосуванні процедури оптимізації за критерієм ISE. Процедура оптимізації не є ресурсовитратною, оскільки базується на застосуванні матричного рівняння Ляпунова. Розроблений метод має обмеження для всіх передаточних функцій повної матриці передаточних функцій об'єкта. Передаточні функції мають бути: стійкими; мінімально реалізованими, тобто ніякий член розкладу поліному чисельника не може бути скорочений з членом розкладу поліному знаменника, а всі моделі каналів за кожним рядком і кожним стовпцем матриці не повинні мати спільного множника в вигляді правильної передаточної функції. З застосуванням розробленого методу був проведений синтез нової системи автоматичного керування вакуумною бражною колоною спиртового виробництва брагоректифікаційної установки потужністю 6000 дал спирту на добу. Імітаційне моделювання перехідних процесів показало, що синтезована система керування дуже якісно пододала максимальне збурення – відхилення всіх виходів значно менші від допустимих.

Ключові слова: система керування, субоптимальна, блокова структура, ISE, критерій якості, оптимізація, Ляпунов, спирт, вакуумна, брагоректифікаційна установка

Вступ

Системи автоматичного керування (САК) ректифікаційними колонами (РК) як багатовимірними (МІМО) об'єктами керування можна розділити на два основних типи: децентралізовані й централізовані.

Докладно переваги й недоліки підходів до синтезу децентралізованих систем керування РК проаналізовані в роботах [1-6]. Децентралізовані САК мають мінімальну структуру, яка складається з переважно однотипних блоків з легко змінюваними параметрами. Кількість таких блоків дорівнює кількості керованих змінних. Структура децентралізованих систем в першу чергу визначається вибором каналів керування (конфігурації), який проводиться за критерієм працездатності й досягається мінімізацією перехресних впливів [3]. Може виявитись що вибору каналів керування не достатньо, наприклад в будь-якій конфігурації з можливих присутні істотні чи домінуючі перехресні впливи, що призводить до нестійкості чи малого запасу стійкості. Тоді настройки регуляторів в конфігурації змінюються для збільшення запасу стійкості САК [2]. Визначимо ключову перевагу й недолік децентралізованих САК з точки зору цього дослідження. Перевагою є те, що структура децентралізованої САК спрощує впровадження й експлуатацію систем, оскільки емпірично можна виявити непрацюючий

блок й змінити його настройки. Недоліком є те, що в цілому структура обирається виходячи з ідеї працездатності і нейтралізації перехресних впливів, тому в межах такої структури і підходу взагалі майже не можливо ставити за мету синтез САК з максимальною якістю перехідних процесів (оптимальну САК).

Якщо брати класичні централізовані оптимальні регулятори, такі як регулятори стану (чи лінійно-квадратичні регулятори) з спостерігачем [7-13], то задача синтезу таких регуляторів ставиться з врахуванням всіх перехресних впливів, а не їх нейтралізації. Тому в межах такого підходу можна ставити задачу синтезу оптимальної САК. Такі регулятори мають протилежні переваги й недоліки: регулятори, які фактично представляють собою декілька матриць, заповнених числами різного порядку складні для діагностування та не є параметризованими, тобто емпірично підібрати певні числа в матрицях регуляторів таких об'єктів як РК майже не можливо, але, з іншого боку, вони є теоретично оптимальними. Також, відмітимо, для задач керування РК при синтезі таких регуляторів не можливо обійтись без спостерігача, а його застосування вимагає додаткової уваги [7, 8]

Мета роботи

Мета синтезу САК полягає у формуванні МІМО регулятора простої блочно-каскадної структури, який наближається за якістю керування до оптимального МІМО регулятора стану. При цьому, регулятор формується поблочовим синтезом, а величина покращення критерію якості при додаванні кожного блоку є відомою розробнику. Таким чином кількість необхідних блоків можна визначити в процедурі синтезу, таким чином сформувавши регулятор мінімальної складності. Отриманий регулятор має бути зручним для впровадження в системах автоматизації, оскільки відомий порядок включення блоків та є критерії перевірки доцільності їх додавання до структури САК.

Задачі роботи

Для синтезу оптимального регулятора стану, який можливо перетворити в блочно-каскадний, треба вирішити три задачі: 1 – розробити нову форму запису багатовимірної системи в просторі станів (канонічну форму); 2 – розробити процедуру синтезу оптимального багатовимірного регулятора, який має властивість інтегрованості й зручну матричну розріджену структуру; 3 – розробити новий алгоритм синтезу регулятора блочно-каскадної структури (БКС), якість керування якого є наближеною до оптимального багатовимірного регулятора.

Розробка нової форми запису багатовимірної системи в просторі станів

Відомо, що формально перетворення з простору станів в матриці передавальних функцій (МПФ) може бути проведено за простою формулою $P(s) = C \cdot (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B$. Зворотне перетворення – задача складніша і кількість варіантів адекватного перетворення МІМО системи майже нескінченне. Для спрощення алгоритмічної реалізації вводять структурні обмеження. Системи в просторі станів, які записані в обмеженій структурі, називають канонічними формами [14-16].

Для того, щоб чітко відокремити канали керування один від одного нам необхідно, щоб: 1) вихід кожної підсистеми знаходився на першому стані цієї підсистеми; 2) було б точно зрозуміло, які стани належать підсистемі; 3) в матриці розрахованого для системи регулятора стану повинно бути відомо, які коефіцієнти регулятора стану зв'язані виключно зі станами кожної окремої підсистеми. Відомі канонічні форми таку мету не ставили, таким чином розроблена форма є новою. Назвемо нову канонічну форму формою з зовнішніми зв'язками CFOL (Canonical Form with Outer Links). При цьому будемо розглядати лише квадратні моделі, де число входів m дорівнює числу виходів.

Маючи МПФ $W(s)$, з елементами $W_{i,j}(s)$, відповідні системи в просторі станів позначимо $S(A, B, C)$ та $S_{i,j} = S(A_{i,j}, B_{i,j}, C_{i,j})$. Система є в CFOL, якщо

$$\begin{aligned}
 A &= \bigoplus_{i=1}^m A_i; \quad A_i = \bigoplus_{j=1}^m A_{i,j}; \quad B = \bigoplus_{i=1}^m B_i; \quad C_j = \bigoplus_{i=1}^m C_{i,j}; \\
 B_i &= \begin{bmatrix} B_{i,1} \\ B_{i,2} \\ \dots \\ B_{i,L} \end{bmatrix}; \quad C = [C_1, C_2, \dots, C_m]; \quad A \in \mathbb{R}^{n,n}; \\
 & \quad B \in \mathbb{R}^{n,m}; \quad A_{i,j} \in \mathbb{R}^{n_i \times n_{i,j}}; \\
 & \quad A_i \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}; \quad C \in \mathbb{R}^{m \times n}; \\
 & \quad C_i \in \mathbb{R}^{n_i}; \quad C_{i,j} \in \mathbb{R}^{n_{i,j}}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Зручно позначити $S = \bigoplus_{i=1}^m S_i$; $S_i = \bigoplus_{j=1}^m S_{i,j}$, де знак $\bigoplus_{j=1}^m$ означає розстановку елементів по діагоналі.

Для нашого використання система у вигляді CFOL має відповідати додатковим умовам: 1) МПФ є стійкою; 2) усі $W_{i,j}(s)$ є мінімально реалізованими, тобто ніякий член розкладу поліному чисельника не може бути скорочений з членом розкладу поліному знаменника; 3) всі $W_{i,j}(s)$ за рядками та стовпцями МПФ не мають спільного множника в вигляді передаточної функції. Приведені обмеження для опису моделей РК не є суттєвими. У випадку невиконання третьої умови можливо незначно змінити корені поліному знаменників $W_{i,j}(s)$, що не має дуже впливати на якість роботи системи керування, при умові що процедура її синтезу враховує факт значної неточності будь-якої експериментальної моделі РК. Для того, щоб перетворити стійку $W_{i,j}(s)$ в систему $S_{i,j}$ можна використати пакет Matlab.

Розробка нової процедури синтезу оптимального багатовимірного регулятора.

Регулятор стану K може бути синтезованим для системи S , заданій в CFOL, як у цілому (див. формулу 1), так і бути сформованим з регуляторів станів $K_{i,j}$ для систем $S_{i,j}$. В обох випадках результат має бути ідентичним.

Можливість такого формування можна математично обґрунтувати наступним чином.

$$\text{Нехай задані } R = \bigoplus_{i=1}^m R_i; \quad Q = \bigoplus_{i=1}^m Q_i; \quad R_i \in \mathbb{R}^{n_i}; \quad Q_i \in \mathbb{R}^{n_i}.$$

Тоді

$K = \bigoplus_{i=1}^m K_i$; $K_i = lqr(A_i, B_i, Q_i, R_i)$. Враховуючи, що $(A \oplus B)^T = A^T \oplus B^T$, підставимо в рівняння, яке визначає розв'язок, вихідні матриці. Тоді

$$\left[\bigoplus_{i=1}^m \bigoplus_{j=1}^L A_{i,j}^T \right] \cdot P + P \left[\bigoplus_{i=1}^m \bigoplus_{j=1}^L A_{i,j} \right] + \bigoplus_{i=1}^m Q_i - P \cdot \left[\bigoplus_{i=1}^m B_i \right] \cdot \left[\bigoplus_{i=1}^m R_i \right]^{-1} \cdot \left[\bigoplus_{i=1}^m B_i \right]^T \cdot P = 0$$

$$\text{Але } \left[\bigoplus_{i=1}^m B_i \right] \cdot \left[\bigoplus_{i=1}^m R_i \right]^{-1} \cdot \left[\bigoplus_{i=1}^m B_i \right]^T = \bigoplus_{i=1}^m B_i \cdot R_i^{-1} \cdot B_i; \quad \left[\bigoplus_{i=1}^m R_i \right]^{-1} = \bigoplus_{i=1}^m R_i^{-1}.$$

Прийнявши $P = \bigoplus_{i=1}^m P_i$ отримаємо m незалежних рівнянь Ріккати відносно P_i

$$A_i^T \cdot P_i + P_i \cdot A_i + Q_i - P_i \cdot B_i \cdot R_i^{-1} \cdot B_i^T \cdot P_i = 0.$$

$$\text{Тоді } K = R^{-1} \cdot B^T \cdot P = \bigoplus_{i=1}^m R_i^{-1} \cdot B_i^T \cdot P_i = \bigoplus_{i=1}^m K_i \text{ чи } K_i = R_i^{-1} \cdot B_i^T \cdot P_i.$$

Перевіримо задану властивість за допомогою Matlab. Перетворимо МПФ об'єкта в простір станів

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1.2 \\ 5 \cdot s + 1 & 6 \cdot s + 1 \\ 1 & 0.8 \\ 8 \cdot s + 1 & 9 \cdot s + 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} S_{1,1}(A_{1,1}, B_{1,1}, C_{1,1}) = ss(-0.2, 0.2, 1, 0); \\ S_{2,1}(A_{2,1}, B_{2,1}, C_{2,1}) = ss(-0.125, 0.125, 1, 0); \\ S_{1,2}(A_{1,2}, B_{1,2}, C_{1,2}) = ss(-0.1667, 0.2, 1, 0); \\ S_{2,2}(A_{2,2}, B_{2,2}, C_{2,2}) = ss(-0.1111, 0.0889, 1, 0). \end{cases} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.2000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1250 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1667 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1111 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.2000 & 0 \\ 0.1250 & 0 \\ 0 & 0.2000 \\ 0 & 0.0889 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Задавшись ваговими матрицями $Q = \text{diag}([5, 1, 1, 10])$, $R = I$ синтезуємо ЛКР в Matlab за допомогою функції `lqr` для моделі (3) і в результаті отримуємо матрицю

$$K = \begin{bmatrix} 1.3937e+00 & 2.5206e-01 & -1.4749e-17 & 3.5165e-17 \\ 1.4203e-16 & -4.0134e-16 & 3.2811e-01 & 1.9744e+00 \end{bmatrix}.$$

Якщо ж розрахувати регулятор стану для кожної підсистеми (2) і об'єднати їх в єдину систему за приведеними вище правилами, то отримуємо більш точну і зручну матрицю

$$K = \begin{bmatrix} 1.3937 & 0.2521 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3281 & 1.9744 \end{bmatrix} \quad (4)$$

яка підтверджує математичне обґрунтування. Підкреслимо, що матриця Q в приведеному вище математичному обґрунтуванні передбачається лише діагональною. Необхідність встановлення вагових коефіцієнтів саме на стани передбачає застосування моделей, одиниці виміру яких однакові чи коректне масштабовані.

Розробка нового алгоритму синтезу регулятора блоково-каскадної структури.

Алгоритм базується на застосуванні процедури оптимізації за критерієм $J = x^T \cdot Q \cdot x + u^T \cdot R \cdot u$ і не є розрахунково витратним, оскільки базується на застосуванні матричного рівняння Ляпунова виду

$$P = LP(A_{inp}, Q_{inp}) \rightarrow \text{solve}(A_{inp}^T \cdot P_{inp} + P_{inp} \cdot A_{inp} + Q_{inp} = 0). \quad (5)$$

Введемо операцію розрахунку критерію

$$J_{cnt}(A_{inp}, Q_{inp}) : x_o^T \cdot LP(A_{inp}, Q_{inp}) \cdot x_o, \text{ де } x_o - \text{початкові умови.}$$

Умови коректності виконання операції: 1) САК є стійкою; 2) $P = LP(A_{inp}, Q_{inp})$ є додатне визначеною матрицею; 3) результат розрахунку критерію більше 0.

Початкові умови звичайно отримуються як $B \cdot f_{\max}$, де f_{\max} – вектор максимуму величин збурюючих впливів.

Для системи (3) максимум критерію J_p (для об'єкта без підключеного оптимального регулятора стану) дорівнює $J_p = J_{cnt}(A, Q) = 0.2595$, а мінімум критерію J_c (для об'єкта з підключеним оптимальним регулятором стану) дорівнює $J_c = J_{cnt}(A - B \cdot K, Q + K^T \cdot K) = 0.1378$.

Процедура синтезу передбачає формування двох МІМО регуляторів C_o і C_f . C_f який початково є нульовими і має містити тільки регулятор виходу з блоків. Для розглянутого прикладу (3) C_o складається за (4)

$$\{C_{o11}, C_{o21}, C_{o12}, C_{o22}\} = \{K_{11}, K_{21}, K_{12}, K_{22}\} = \{1.3937, 0.2521, 0.3281, 1.9744\}.$$

Ітеративна процедура синтезу описується алгоритмом:

1. Знайти таку підсистему регулятора C_o , яка призводить до максимального зменшення критерію якості. Зафіксувати у відповідній підсистемі номер входу u_i і виходу y_i об'єкта.

2. Додати до C_f в якості регуляторів виходу $u_i - y_i$ блок

$$\Xi_N = \frac{a_0 \cdot s + a_1}{b_0 \cdot s + 1} \quad (6)$$

де a_0, a_1, b_0 – це параметри, які визначаються процедурою оптимізації з виконанням умов коректності виконання операції розрахунку критерію якості, N – номер блоку. Блок додається при умові, що він наближає J_f (для об'єкта з регулятором C_f) до величини J_c . Після додавання блоку Ξ_N до C_f він додається також у відповідну підсистему регулятора C_o , тобто виконується $Co_{i,j} = Co_{i,j} - \Xi_N$. Формула розрахунку критерію для регулятора C_f дорівнює $J_f = Jcnt(A - B \cdot K, Q + C_u)$, де C_u має враховувати не тільки K , а й додані блоки $\Xi_{1..N}$ в формі простору станів. Якщо умова наближення не виконується чи його величина занадто мала, то виконання ітеративного циклу завершується. Зони нечутливості вхідних параметрів блоку краще задавати такими, щоб найбільш важливими був коефіцієнт a_1 . У термінах прямих показників якості особливість такої оптимізації наступна: перший знайдений блок по каналу керування має амплітуду відхилень таку ж як у оптимального регулятора стану, наступні – зменшують час керування.

Опис об'єкту керування для дослідження ефективності розробленого методу

Як об'єкт керування розглянемо бражну колону (БК) вакуумної брагоректифікаційної установки (БРУВАК) потужністю 6000 дал спирту на добу з використанням розробленого методу. Особливістю установки є те, що в ній тільки БК працює під розрідженням, а її обігрів проводиться переважно вторинною парою, яка поступає з дефлегматора-випаровувача РК (річ йде про додатковий до звичайного дефлегматора апарат, який у типовій БРУ відсутній). Це так звана вакуумна установка першого типу [17]. Відомо, що такі установки зменшують використання пари на 32-35% у порівнянні з типовою БРУ [17, 18]. Крім того, перегонка бражки слабким вакуумом ~76 кПа (560-570 мм рт. ст.) при низькій температурі (біля 65°C) дозволяє отримати дистилат з вмістом ефірів, альдегідів й кислот у 5-8 разів меншим, ніж при звичайній перегонці [17, 18]. Проте у БК є і недоліки: 1) більш складне обслуговування й менша надійність вакуумних насосів; 2) більший вплив температурного режиму на ступінь сепарації від вуглекислоти; 3) підвищені вимоги до точності підтримання тиску як знизу, так й зверху вакуумного апарату. Саме до третьої проблеми, яка відноситься до задачі керування, будемо шукати розв'язок.

Повна експериментальна МПФ БК приведена в табл. 1.

Таблиця 1.

Експериментальна МПФ БК БРУВАК

N	u_1	u_2
y_1	$\frac{-7}{110 \cdot s + 1}$	$\frac{25}{40 \cdot s + 1}$
y_2	$\frac{-12}{200 \cdot s + 1}$	$\frac{20}{100 \cdot s + 1}$
y_3	$\frac{-0.15}{(110 \cdot s + 1)^2} e^{-160s}$	$\frac{0.005}{(150 \cdot s + 1)^2} e^{-80s}$

У таблиці 1 керуючі впливи: u_1 – витрата бражки (%х.в.м.), u_2 – витрата пари (%х.в.м.).

Керовані змінні: y_1 – розрідження знизу (мм. вод. ст.), y_2 – розрідження зверху (мм.

вод. ст.),

y_3 – температура зверху (°C). Максимальні збурення, приведені до входу:

$\Delta u_{\max} = [10, 10]$. Допустимі відхилення керованих змінних: $\Delta y_{\max} = [2, 200, 200]$.

Синтез нової системи керування БК БРУВАК

Оскільки МПФ є неквадратною, тому один з виходів для задачі оптимального керування не може бути безпосередньо задіяний; 2) динаміка каналів тиску є значно швидшою, ніж інших каналів; 3) для керування усіма параметрами об'єкта з врахуванням важливості якісного підтримання необхідного тиску необхідно застосування САК каскадної структури; 4) технологічно обґрунтованою є каскадна схема стабілізації температури зверху, впливаючи на один з тисків. Тоді для синтезу оптимального регулятора будемо використовувати МПФ

$$P = \begin{bmatrix} \frac{-7}{110 \cdot s + 1} & \frac{25}{40 \cdot s + 1} \\ \frac{-12}{200 \cdot s + 1} & \frac{20}{100 \cdot s + 1} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

яка переводиться у форму CFOL

$$A = \begin{bmatrix} -0.00(90) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0250 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0050 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0100 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -0.0(63) & 0 \\ 0.6250 & 0 \\ 0 & -0.0600 \\ 0 & 0.2000 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для визначення вагових коефіцієнтів використаємо правило Брайсона, яке найбільш адекватне для мінімальнофазових об'єктів. Ідея правила в тому, що кожен i діагональний елемент матриці Q дорівнює $1/Ym_i^2$, де Ym_i^2 – максимальне допустиме відхилення відповідного виходу. Аналогічно визначається діагональні елементи матриці R . Потім емпірично залишається визначити загальний множник матриці Q . Тоді

$$Q = ky \cdot \text{diag}([1/200^2, 1/200^2, 1/200^2, 1/200^2]), R = 1/10^2, \text{ де } ky=1000.$$

Оптимальний ЛКР має наступний вигляд

$$K = \begin{bmatrix} -0.29264181 & 1.52049751 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.63398538 & 1.41419545 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Використовуючи алгоритм синтезу регулятора блокової структури нами були знайдено 4 блоки регулятора наступного виду

$$\Xi_1[u_1 - y_2] = -0.059371888306747$$

$$\Xi_2[u_2 - y_1] = 0.155238499856077$$

$$\Xi_3[u_2 - y_1] = \frac{a_0 \cdot s + a_1}{b_0 \cdot s + 1} \quad \begin{aligned} a_0 &= 1.243045604992952 \cdot 10^{-4} \\ a_1 &= -0.313709800335321 \\ a_2 &= 0.429145965506400 \end{aligned}$$

$$\Xi_4[u_1 - y_2] = \frac{1.05 \cdot s + 2.5}{s + 1}$$

Імітаційне моделювання перехідних процесів при імпульсному збуренні показані на рис. 1.

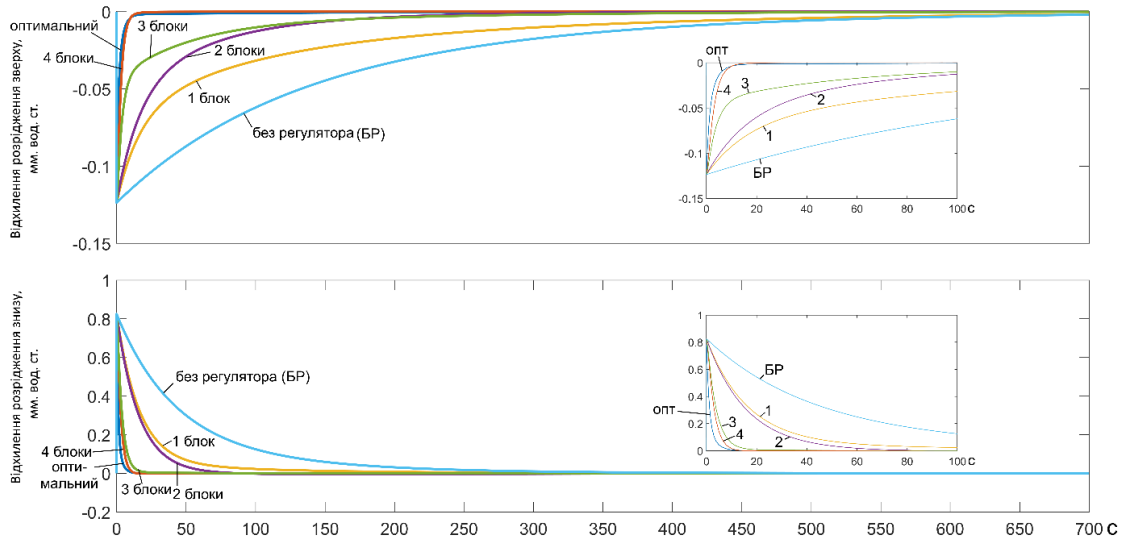


Рис.1. Результати моделювання перехідних процесів за тиском в БК при збуренні одиничним імпульсом по обом входам

Результати моделювання, показані на рис. 1 було проведено для наступних випадків:

- 1) без регулятора;
- 2) субоптимальний регулятор з одним блоком;
- 3) субоптимальний регулятор з двома блоками;
- 4) субоптимальний регулятор з трьома блоками;
- 5) субоптимальний регулятор з чотирма блоками;
- 6) з оптимальним регулятором стану.

Представлені графіки показують, що дійсно додавання кожного блоку збільшує якість керування:

- САК з одним блоком має ~42 відсотки критерію об'єкту без регулятора;
- САК з двома блоками має ~37% відсотки критерію об'єкту без регулятора;
- САК з трьома блоками має ~10% відсотки критерію об'єкту без регулятора;
- САК з чотирма блоками має ~7.5% відсотки критерію об'єкту без регулятора.

Додавання 5-го блоку вже не має сенсу, оскільки рівень покращення наближається до меж розрахункових помилок та помилок каналів вимірювання. Вихідний оптимальний регулятор має ~5% критерію.

Останній крок – додаймо каскадний ПІ-регулятор для керування температурою зверху колони виду

$$C(s) = -27.0133570327766 - \frac{0.167792240312229}{s}$$

Структурна схема математичної моделі САК БК БРУВАК показана на рис. 2.

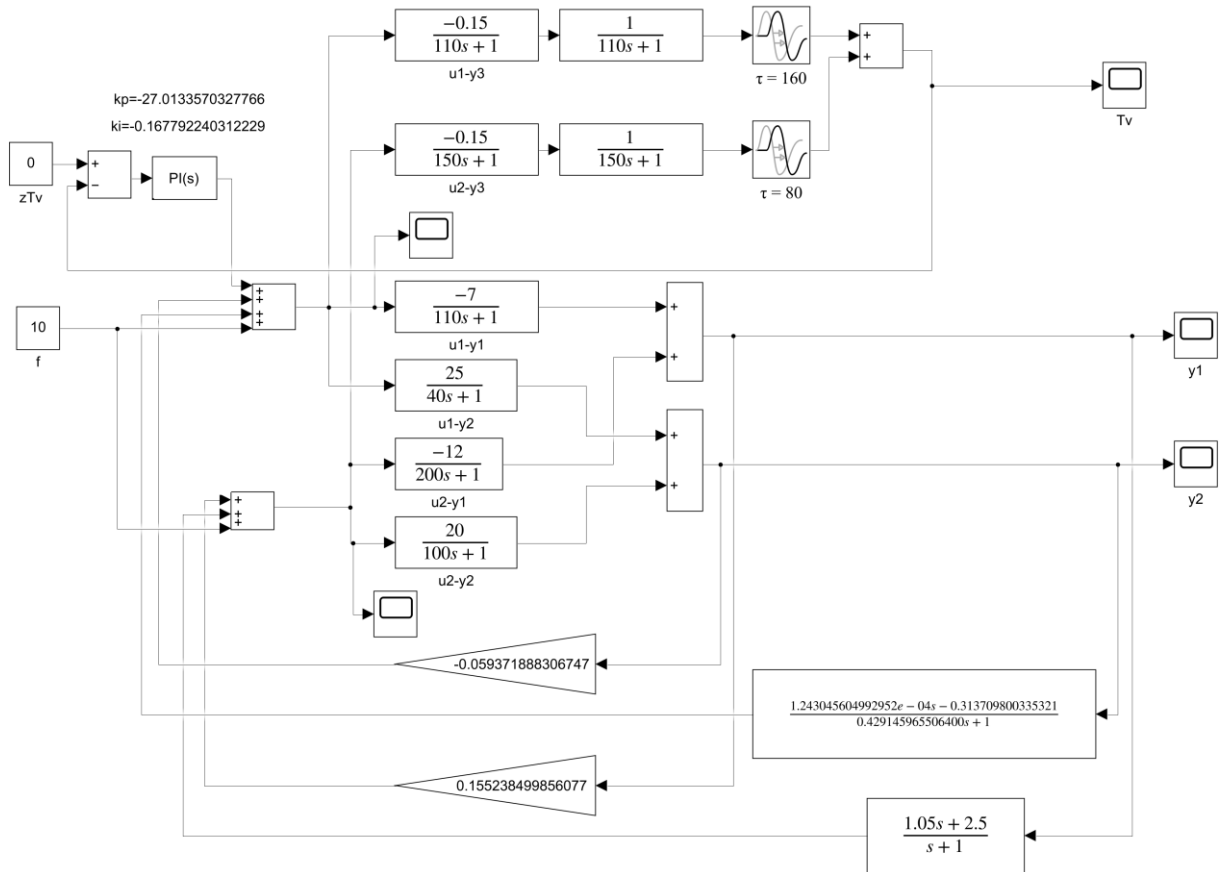


Рис.2. Структурна схема імітаційної моделі САК БК

Перехідні процеси по керуванням і вимірюванням при подачі максимального збурення стрибком 10% х.в.м. по обом входам показані на рис. 3.

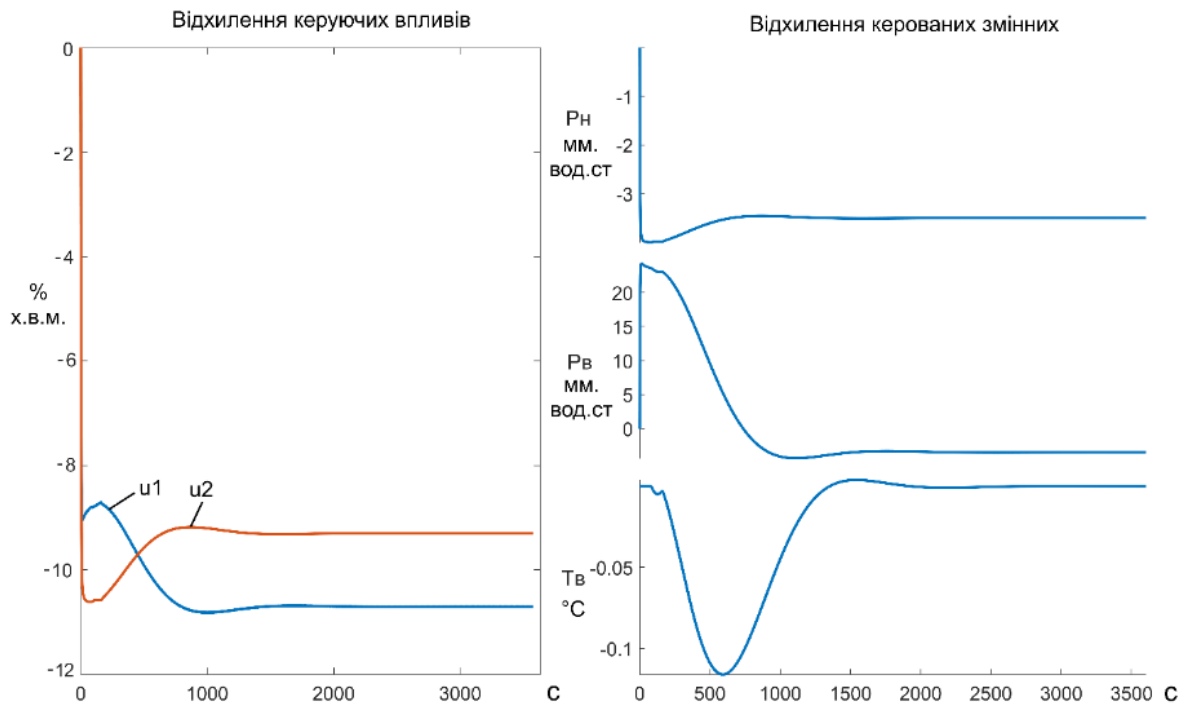


Рис.3. Перехідні процеси в САК БК

Перехідні процеси показують дуже незначне відхилення температури при максимальному відхиленню тиску зверху у 10% від максимально допустимої величини.

Висновки

1. Розроблено новий алгоритм синтезу багатовимірних субоптимальних регуляторів, які складаються з блоків та додавання кожного з яких вносить відоме покращення в сенсі інтегрального квадратичного критерію, що дуже спрощує впровадження й відлагодження САК.

2. Розроблена нова система керування промисловою вакуумною бражною колоною виробництва спирту з використанням запропонованого методу. Імітаційне моделювання перехідних процесів показує, що загалом САК дуже якісно пододала максимальне збурення – відхилення всіх виходів значно менші від допустимих.

Список літератури

1. Stopakevych A. Analysis of the major approaches to the design of multivariable decentralized control systems for distillation columns. *Eurasian scientific discussions : proceedings of the 6th International scientific and practical conference*. Barcelona, Spain: Barca Academy Publishing, 2022. P. 80-84.

2. Stopakevych A., Stopakevych O. Design of Robust Decentralized Control Systems for Distillation Columns. *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. №2 (54). P. 38-52. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.04>

3. Стопакевич А.О., Стопакевич О.А. Аналітичний огляд методів розв'язування задачі синтезу децентралізованих систем керування ректифікаційними колонами *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2021. Т. 11. №. 4. С. 343–356. <https://doi.org/10.15276/imms.v11.no4.343>

4. Sedigh A. K., Moaveni B. Control Configuration Selection for Multivariable Plants. Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. ISBN : 978-3642031922

5. Thone M., Potters M., Baldi S. Control configurations in distillation columns: A comparative study. *European Control Conference : Proceedings 2016 European Control Conference*. IEEE: Denmark, Aalborg. 2016. P. 37-42. <https://doi.org/10.1109/ECC.2016.7810260>

6 Zhu Z.-X. Variable Pairing Selection Based on Individual and Overall Interaction Measures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1996. V. 35, No 11. P. 4091–4099. <https://doi.org/10.1021/ie960143n>

7. Стопакевич А.О., Стопакевич О.А. Синтез та дослідження астатичних оптимальних цифрових систем керування ректифікаційною колоною. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2021. Т. 11. №. 1-2. С. 91-103. <https://doi.org/10.15276/imms.v11.no1-2.91>

8. Стопакевич А. А., Стопакевич А. А. Разработка робастной системы управления колонной атмосферной перегонки нефти. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. Т.5, № 77. С. 49–57 . <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.50964>

9. Stopakevych A., Stopakevych O. Development of Resilient Control Systems for Technological Plants *Problemele energeticii regionale*. 2021. №2 (50). P.114-126. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.2-50.10>

10. Rojas-Moreno A. Control of MIMO Time-Delay Processes Having Disturbances with Time Delays. *BTSym 2021 : proceedings of the 7th Brazilian Technology Symposium*. São Paulo, Brazil : Springer. P. 443-451. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08545-1_42

11. Rojas-Moreno A. PI LQR control of MIMO time-delay processes subject to output disturbances. *International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (IEEE INTERCON) : proceeding of XXVII conference*. Lima, Peru: IEEE. 2020. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/INTERCON50315.2020.9220212>

12. Maldonado J. L. B., Valarezo J. M., Peralta D.T. Multivariable Control of a Binary Distillation Column. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 2. No. 12. P.18-23. <https://doi.org/10.31873/IJEAS.2.12.05>

13. Kiss A. A. Advanced Distillation Technologies. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2013. ISBN: 9781119993612

14. Albertos, P., Sala A. *Multivariable Control Systems: An Engineering Approach*. Springer-Verlag, 2004. ISBN: 978-1-85233-738-4
15. Skogestad S., Postlethwaite I. *Multivariable feedback control. Analysis and design*. John Wiley & Sons, 2005. ISBN: 978-0470011683
16. Стопакевич А.А. *Системный анализ и теория сложных систем*. Одесса: Астропринт, 2013. 350 с. ISBN 978-966-190-760-6.
17. Цыганков П. С., Цыганков С. П. *Руководство по ректификации спирта*. Москва : Пищепромиздат, 2001. ISBN: 5-89703-035-9.
18. Шиян П.Л., Сосницький В.В., Олійнічук С.Т. *Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика*. Київ: Асканія, 2009. ISBN: 978-966-2203-01-1.

DESIGN OF A MINIMAL COMPLEXITY SUBOPTIMAL CONTROL SYSTEM FOR THE VACUUM DISTILLATION COLUMN OF AN ALCOHOL PRODUCTION PLANT

Andrii Stopakevych, Oleksii Stopakevych

National University of Intellectual Technologies and Communications,
1, Kuznechna street, Odessa, 65029, Ukraine, stopakevich@gmail.com
National Odessa Polytechnic University,
1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine, stopakevich@op.edu.ua

It is developed a new design method for multivariable control systems with the following properties: a system has minimum complexity and its performance index is close to the integral of square error ISE. The intended scope of the new method is to solve distillation column control problems. The desired aim is achieved by solving the following problems: to develop a new form of notation of multivariable systems in the state space; to develop a procedure for the design of the optimal multivariable controller, which has the property of integrity and convenient matrix sparse structure; to develop a new method for the design of the controller with the block structure, the performance index of which is close to the optimal multivariable controller. The most significant result of the work is the development of a new iterative design algorithm, which is based on the application of the optimization procedure on the base of the ISE performance index. The optimization procedure is not resource-demanding since it is based on the Lyapunov matrix equation usage. The developed method has the following restrictions for the transfer function matrix of the plant model: all channel models must be stable; all channel models must be minimally realized; all channel models by rows and columns of the matrix have no common right multiplier in the form of the transfer function. A new automatic control system for the vacuum distillation column has been synthesized. The distillation is part of the distillation unit with the capacity of 60000 liters of alcohol per day. Simulation of transients shows that the developed control system very qualitatively overcame the maximum disturbance because the deviation of all outputs is significantly less than the permissible.

Keywords. Control system, suboptimal, block structure, ISE, performance index, optimization, Lyapunov, alcohol, vacuum distillation column.