



**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

УДК 681.513.5:664.12

РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБАСТНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Луцька Н.М., Ладанюк А.П.

Національний університет харчових технологій, м. Київ

E-mail: lutskaya@yandex.ru

Copyright © 2014 by author and the journal "Automation technological and business - processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



DOI: [10.15673/2312-3125. 21/](https://doi.org/10.15673/2312-3125.21/)

Анотація

В роботі досліджується контур регулювання рівнями п'ятикорпусної випарної установки цукрового заводу, що описується системою лінійних диференціальних рівнянь п'ятого порядку. Так як об'єкт працює в умовах невизначеності, причому як параметричних так і структурних, то для побудови системи стабілізації необхідно використати робастний регулятор, що синтезований за алгоритмом Loop Shaping, який об'єднує частотні підходи та H-оптимізацію. При цьому використовуються числові методи пошуку мінімуму H_{∞} -норми від різниці між передатною матрицею розімкненої системи та бажаною передатною матрицею на множині стабілізованих зворотних зв'язків. Замкнена система з синтезованим регулятором має значно нищу функцію чутливості та добре відтворює сигнал завдання на робочих частотах, що обґрунтовано на приведених логарифмічних амплітудно-частотних характеристиках (АЧХ). Так як синтезований регулятор має високий порядок, то його порядок було знижено без втрати суттєвих властивостей. Моделювання системи з регуляторами повного та пониженого порядку з невизначеностями та без показали високі якісні характеристики перехідних процесів з різними сигналами завдання, що підтверджує доцільність використання даного підходу.

Abstract

In the paper the contour level adjustment five-block evaporating sugar factory settings, described a system of linear differential equations of the fifth order. Since the facility operates under uncertainty, both parametric and structural, for the construction of the system is necessary to use robust stabilization controller that synthesized Loop Shaping algorithm, uniting frequency approaches and H-optimization. It uses numerical methods for finding the minimum of H_{∞} -norm the difference between open-loop transfer matrix system and transfer the desired matrix on the set stabilization feedback. A closed system with synthesized regulator has low sensitivity and function reproduces the signal problem at the operating frequency, which resulted in reasonably logarithmic amplitude-frequency characteristics (AFC). Since synthesized regulator has a high order, his order was reduced without significant loss of properties. Simulation system with full controls and reduced order with uncertainties and no, demonstrated high quality characteristics transients signals with different objectives, confirming the feasibility of using this approach.

Ключові слова

Випарна установка, математична модель, невизначеності, передатна матриця, сингулярне значення, логарифмічна АЧХ.



1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ

Вступ

Технологічні об'єкти харчової промисловості працюють в умовах невизначеності, які мають різноманітну природу та лише деякі з них можуть бути оцінені кількісно. Зокрема при описі математичної моделі об'єкта основну невизначеність складають постійні часу, що в свою чергу для теплового об'єкта залежать від зміни робочого об'єму та теплоємності робочої рідини. Також невизначеність проявляється в припущеннях при складанні математичної моделі, при лінеаризації та дискретизації останньої. При неточностях розрахунку параметрів регулятора та спостерігача також виникає похибка, що може бути включена в область невизначеності. Не слід забувати про невизначеність мети функціонування технологічного об'єкта, що веде до неточного задання критерію керування, а в результаті – неефективного функціонування об'єкта керування.

Також свої похибки в роботу системи вносять первинні та вторинні перетворювачі, цифрові перетворювачі пристрою керування, лінії зв'язку, похибки розрахунку алгоритмів керування.

Все це, а також інші непередбачені невизначеності, що виникають під час роботи технологічної системи керування утворюють область невизначеності, в якій працює система. Внаслідок цього збільшуються витрати сировини та енергії та погіршується якість продуктів, а в деяких випадках внаслідок неврахування невизначеностей в об'єкті система може втратити стійкість, що призведе до псування продукту.

На сьогодні найбільш обґрунтованим підходом до розробки ефективних систем з невизначеностями є робастна теорія. Для лінійних систем більшість методів засновано на мінімізації норм H_2 та H_∞ , так як дозволяє просто та зручно задавати міру невизначеності та межі областей робастної стійкості та якості.

Розроблено багато методів для побудови систем робастної стабілізації, робастної стійкості та якості. Всі ці методи умовно можна поділити на три групи [1]:

1) Loop Shaping – синтез зворотного зв'язку з бажаними властивостями на основі об'єднання частотних підходів та H -оптимізації [2];

2) μ -Synthesis Approach – синтез робастного регулятора за «2-Риккаті» та D-K підходами [3];

3) LMI – синтез регулятора на основі лінійних матричних нерівностей [4].

Перша група методів заснована М. Сафоновим, [2] мінімізує розбіжність за H_∞ -нормою між матрицею $L(s)=G(s)K(s)$ та заданою бажаною матрицею на множині стабілізованих зворотних зв'язків, при цьому критерій пошуку набуває вигляду:

$$\begin{cases} \underline{\sigma}(G(j\omega)K(j\omega)) \geq \frac{1}{\gamma} \overline{\sigma}(G_d(j\omega)) \text{ при } \omega < \omega_0, \\ \overline{\sigma}(G(j\omega)K(j\omega)) \leq \frac{1}{\gamma} \underline{\sigma}(G_d(j\omega)) \text{ при } \omega > \omega_0 \end{cases}$$

де $G(s)$ – передатна функція об'єкта керування; $K(s)$ – передатна функція синтезованого регулятора; $G_d(s)$ – бажана передатна функція системи, що гарантує бажані міру придушення зовнішніх збурень та границі робастної стійкості для адитивного та мультиплікативного відхилення математичної моделі об'єкта; $\underline{\sigma}(\cdot)$, $\overline{\sigma}(\cdot)$ – відповідно найменше та найбільше сингулярне значення передатної матриці; γ – точність досягнення; ω , ω_0 – частота та частота зрізу амплітудно-частотної характеристики розімкненої системи.

При синтезі використовуються числові методи пошуку мінімуму H_2 - та H_∞ -норм в просторах матриці $K(s)$ відповідної розмірності зі стійкими дрібно-раціональними компонентами. Основним недоліком даного методу є високий порядок регулятора.

Мета статті: розробити ефективну систему керування технологічним об'єктом, що працює в умовах невизначеності, що дасть змогу покращити якість продукту та зменшити витрати енергоносіїв.

Постановка задачі

Розглянемо математичну модель за рівнями 5-ти корпусної випарної установки цукрового виробництва:



**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

$$\begin{cases} \rho_1 \eta_1 \frac{d(\Delta h_1(t))}{dt} = \Delta S_0(t) - \Delta S_1(t) - \Delta W_1(t); \\ \rho_2 \eta_2 \frac{d(\Delta h_2(t))}{dt} = \Delta S_1(t) - \Delta S_2(t) - \Delta W_2(t); \\ \rho_3 \eta_3 \frac{d(\Delta h_3(t))}{dt} = \Delta S_2(t) - \Delta S_3(t) - \Delta W_3(t); \\ \rho_4 \eta_4 \frac{d(\Delta h_4(t))}{dt} = \Delta S_3(t) - \Delta S_4(t) - \Delta W_4(t); \\ \rho_5 \eta_5 \frac{d(\Delta h_5(t))}{dt} = \Delta S_4(t) - \Delta S_5(t) - \Delta W_5(t), \end{cases}$$

де h_i – рівень в i -тому корпусі, [л]; ρ_i – густина соку в i -тому корпусі, [$\text{кг}/\text{м}^3$]; η_i – еквівалентна площа поперечного перерізу i -того корпусу, [м^3]; $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$ – приток соку в I корпус, виток сиропу з I корпусу і приток в II корпус, виток з II корпусу і приток в III корпус, виток з III корпусу і приток в IV корпус, виток з IV корпусу і приток в V корпус, виток з V корпусу відповідно, [$\text{кг}/\text{с}$]; W_i – витрата вторинної пари в i -ому корпусі випарної установки [$\text{кг}/\text{с}$]. Початкові відхилення нульові.

Для номінального об'єкта маємо:

$$\begin{cases} 4391.08 \frac{d(\Delta h_1)}{dt} = \Delta S_0 - \Delta S_1 - \Delta W_1, \\ 6820.8 \frac{d(\Delta h_2)}{dt} = \Delta S_1 - \Delta S_2 - \Delta W_2, \\ 5056.92 \frac{d(\Delta h_3)}{dt} = \Delta S_2 - \Delta S_3 - \Delta W_3, \\ 4973.14 \frac{d(\Delta h_4)}{dt} = \Delta S_3 - \Delta S_4 - \Delta W_4, \\ 3947.02 \frac{d(\Delta h_5)}{dt} = \Delta S_4 - \Delta S_5 - \Delta W_5. \end{cases}$$

Перейдемо до простору змінних стану:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1(q)w(t) + B_2(q)u(t); \\ y(t) = Cx(t) + D_1w(t) + D_2u(t), \end{cases}$$

де $x = (\Delta h_1; \Delta h_2; \Delta h_3; \Delta h_4; \Delta h_5)$ – вектор-стовпець координат стану, $y = (\Delta h_1; \Delta h_2; \Delta h_3; \Delta h_4; \Delta h_5)$ – вектор-стовпець вимірювань, $u = (\Delta S_1; \Delta S_2; \Delta S_3; \Delta S_4; \Delta S_5)$ – вектор-стовпець керування,

$w = (\Delta S_0; \Delta W_1; \Delta W_2; \Delta W_3; \Delta W_4; \Delta W_5)$ – вектор-стовпець зовнішніх збурень об'єкта. Матриці об'єкта складають:

$$A = [0]_{5 \times 5}, \quad C = I_{5 \times 5}, \quad D_1 = [0]_{5 \times 6}, \quad D_2 = [0]_{5 \times 5},$$

$$B_1(q) = \begin{bmatrix} \frac{1}{4.26q_1} & -\frac{1}{4.26q_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{6.12q_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{4.26q_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{4.02q_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{1.12q_5} \end{bmatrix},$$

(1)



**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

$$B_2(q) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{4.26q_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{6.12q_2} & -\frac{1}{6.12q_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4.26q_3} & -\frac{1}{4.26q_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4.02q_4} & -\frac{1}{4.02q_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{1.12q_5} & -\frac{1}{1.12q_5} \end{bmatrix},$$

де

$$q = (\rho_1; \rho_2; \rho_3; \rho_4; \rho_5) \in Q, \quad Q = \{q \in R^5 : \underline{q}_i \leq q_i \leq \overline{q}_i\},$$

$$1021.5 \leq q_1 \leq 1040.0;$$

$$1053.2 \leq q_2 \leq 1175.8;$$

$$1187.1 \leq q_3 \leq 1235.7;$$

$$1237.1 \leq q_4 \leq 1256.7;$$

$$1265.0 \leq q_5 \leq 1270.1.$$

Відмітимо, що крім параметричної невизначеності в об'єкті існує структурна невизначеність, що обумовлена неврахованими втратами, технічною реалізацією датчиків та регулювальних органів.

Методика дослідження

Виконаємо синтез регулятора при зміні завдання, вважаючи $w(t) = 0$ та задамо час моделювання 1000 с. Відповідно до алгоритму [2] синтез робастного регулятора стабілізації реалізується виконанням наступних кроків:

1. Дослідження об'єкта керування та вибір $G_d(s)$.

Як видно з матриць математичної моделі, об'єкт є нестійким та не має нулів.

Для забезпечення точного відтворення сигналу завдання логарифмічна АЧХ $G_d(s)$ на низьких частотах повинна мати нахил -20 дБ/дек, для зменшення впливу шумів та забезпечення необхідної робастної стійкості логарифмічна АЧХ $G_d(s)$ на високих частотах повинна мати нахил -20 дБ/дек. Крім того, повинна мінімізуватися функція чутливості системи $S(j\omega)$ та бажаний час наростання перехідного процесу 100 с (відносно часу моделювання 0.1 с). Отже:

$$G_d(s) = \frac{10}{s}.$$

2. Синтез регулятора та аналіз передатних функцій розімкненої системи $L(s)$, замкненої системи $T(s)$ та чутливості $S(s)$.

Відповідно з GCD формулою [5] синтезується передатна функція коефіцієнта підсилення $K(s)$, що має 5 входів, 5 виходів та 20 координат стану. При цьому точність синтезу $\gamma = 1.42$, що відповідає максимальному відхиленню на резонансній частоті замкненої системи 3дБ. На рис.1 наведена логарифмічна АЧХ системи, з якої видно що для 5-ти контурів системи характеристики однакові, функція чутливості мала, а характеристики замкненої системи покращені.

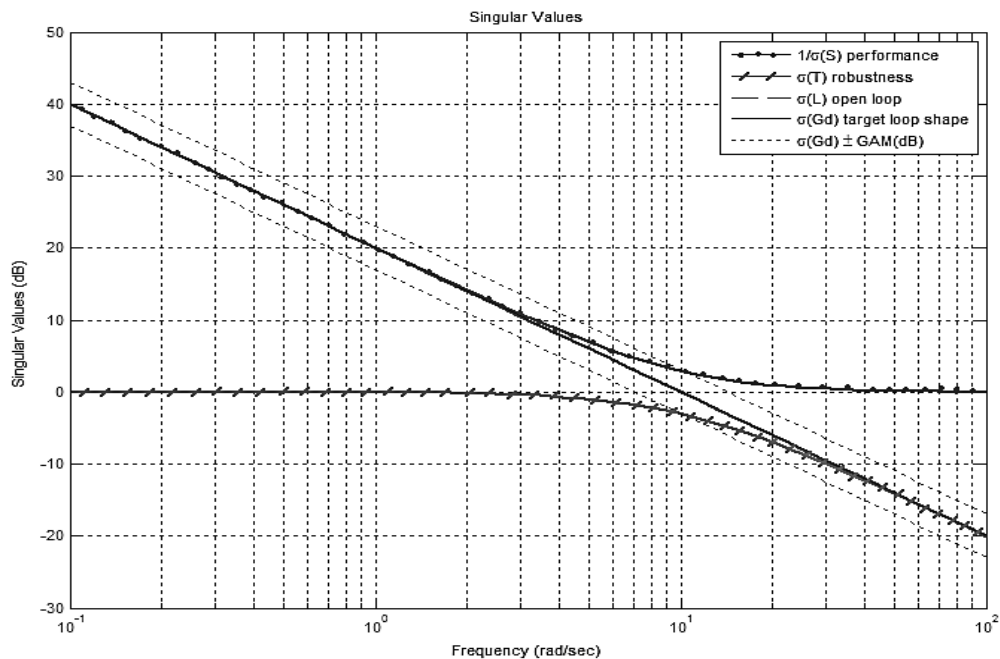
**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

Рис. 1. Логарифмічна АЧХ розімкненої системи

3. Зменшення порядку регулятора та перевірка перехідних процесів.

Як зазначалося, недоліком даного синтезу є високий порядок регулятора. Як видно на рис. 2 порядок регулятора можна зменшити принаймні з 20-го до 15. Понизимо порядок регулятора $Kr(s)$ до 12-го, як видно з рис. 3 похибка між регуляторами пониженого та повного порядку для більшості контурів мала.

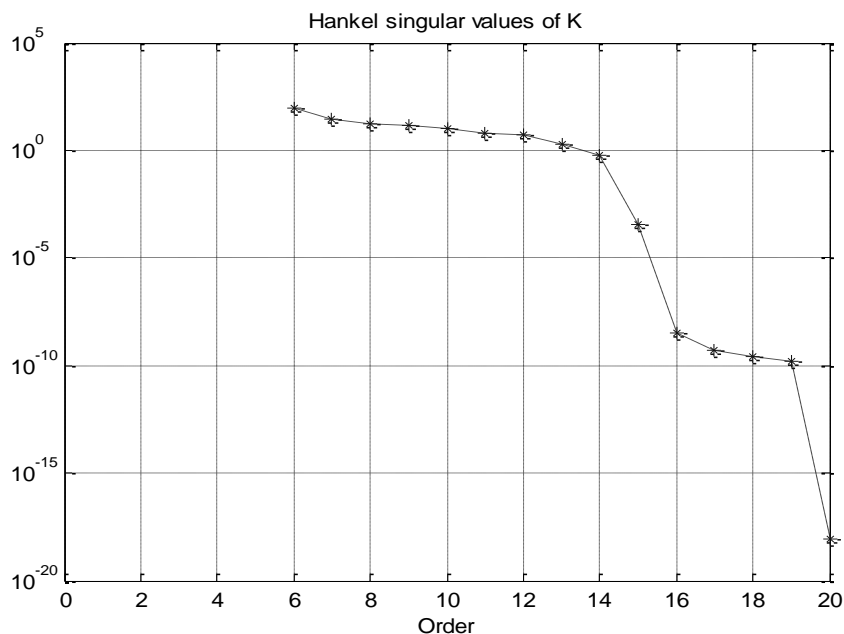


Рис. 2. Розкладання Хенкеля порядку регулятора

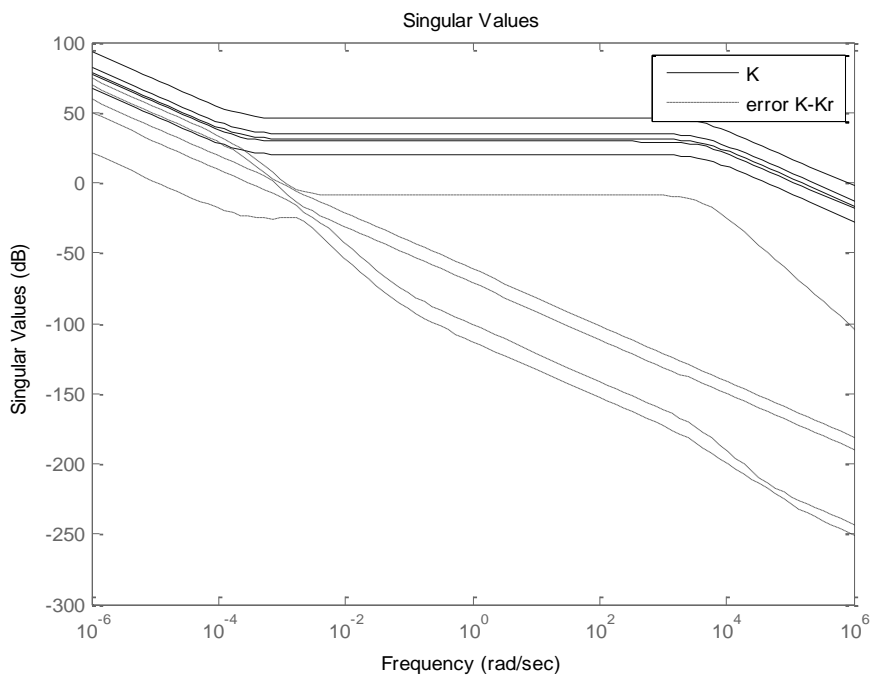
**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

Рис. 3. Логарифмічна АЧХ регуляторів повного та пониженого порядків

На рис. 4 зображено перехідні процеси з регулятором пониженого та повного порядку відносно стрибкоподібного сигналу завдання, характер їх співпадає, процеси аперіодичні, час перехідного процесу складає < 3 с. Крім того, як видно з графіків синтезований регулятор в статичному режимі розв'язує перехресні зв'язки, які, як видно з моделі об'єкта, за суміжними каналами однозначні з прямими.

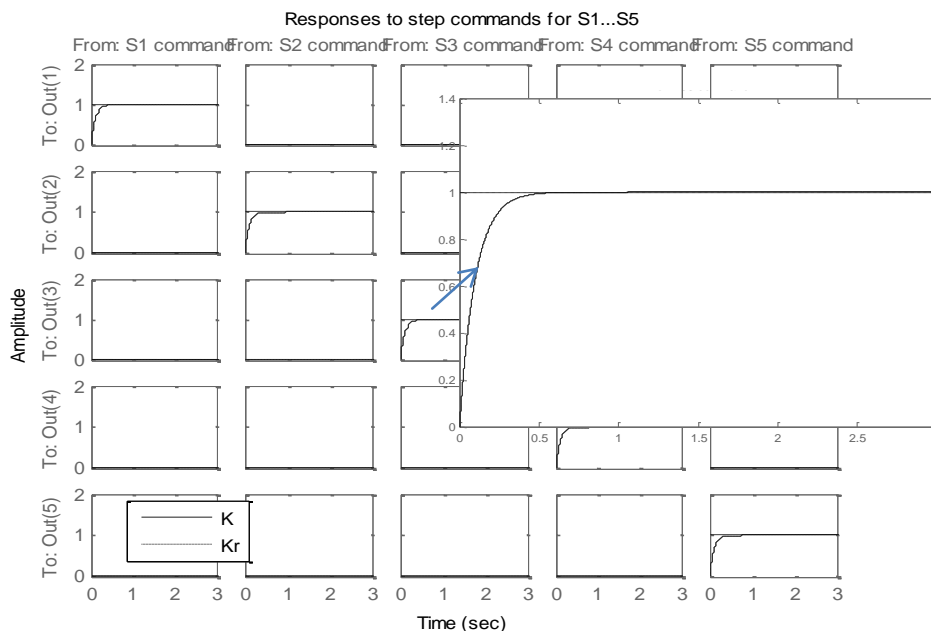


Рис. 4. Перехідні процеси з регуляторами повного та пониженого порядків відносно одиничного сигналу завдання

**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

Дослідження системи з лінійним сигналом завдання показав якісні характеристики (рис. 5).

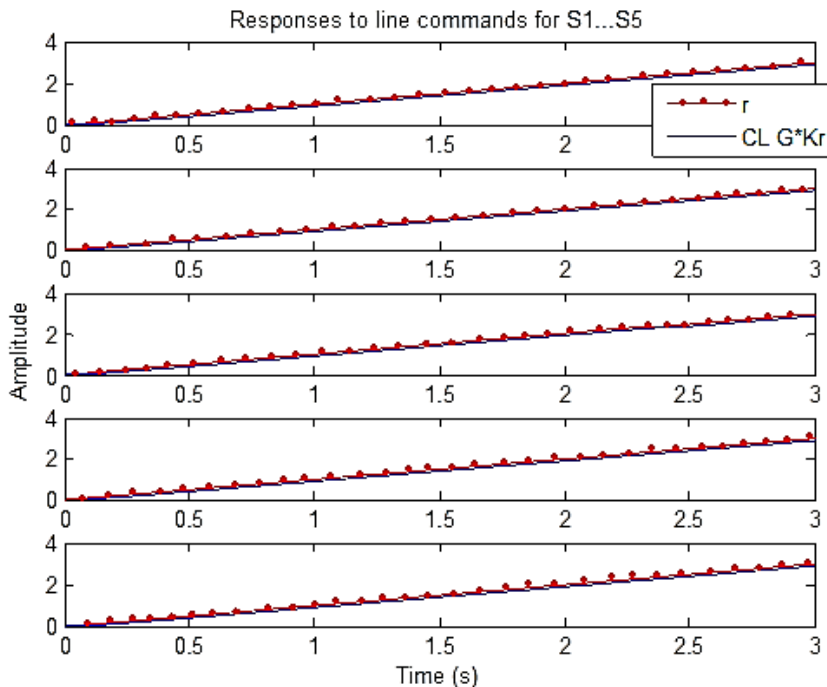


Рис. 5. Перехідні процеси з регулятором пониженого порядку відносно лінійного сигналу завдання

Для системи, що збурена відхиленнями параметрів об'єкта від номінальних значень отримали перехідні процеси, що показані на рис. 6, з яких видно, що характер процесів майже не змінюється.

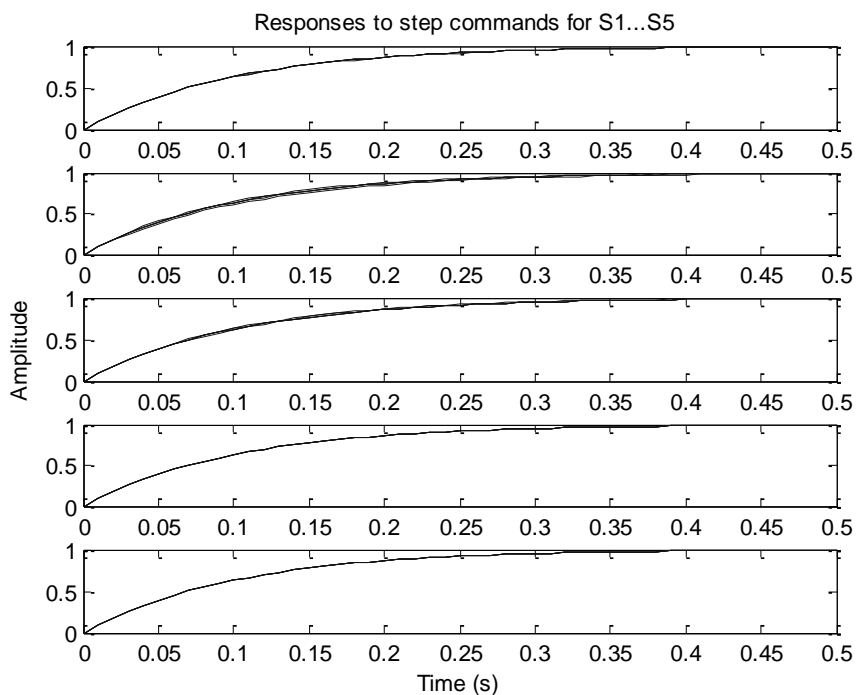


Рис. 6. Перехідні процеси з регулятором пониженого порядку та параметричними збуреннями

**1 ПИТАННЯ ТЕОРІЇ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ЕФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ****Висновок**

Синтезована передатна функція регулятора повного та пониженого порядків $Kr(s)$ за критерієм H_∞ . Результати моделювання підтвердили ефективність функціонування системи для номінального та внутрішньо збуреного об'єкта. Отже, в результаті впровадження синтезованої системи очікується покращення якості продукту та зменшення витрат енергоносіїв.

Література

1. Francis B.A. A course in H_∞ control theory. - Berlin: Springer-Verlag, 1987. - (Lecture Notes in Control and Information Sciences; Vol. 88);
2. Chiang, R.Y., and M.G. Safonov. H_∞ synthesis using a bilinear pole-shifting transform. AIAA J. Guidance, Control and Dynamics, 15(5):1111-1115, September-October 1992.;
3. Doyle, J.C., K. Glover, P. Khargonekar, and B. Francis, "State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 34, no. 8, pp. 831-847, August 1989.;
4. Поляк, Б. Т. Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств / Б. Т. Поляк, М. В. Хлебников, П. С. Щербаков. - М.: ЛЕНАНД, 2014. - 560 с.;
5. Le, V.X., and M.G. Safonov. Rational matrix GCD's and the design of squaring-down compensators - a state space theory. IEEE Trans. Autom.Control, AC-36(3):384-392, March 1992.

References

1. Francis B.A. A course in H_∞ control theory. - Berlin: Springer-Verlag, 1987. - (Lecture Notes in Control and Information Sciences; Vol. 88).;
2. Chiang, R.Y., and M.G. Safonov. H_∞ synthesis using a bilinear pole-shifting transform. AIAA J. Guidance, Control and Dynamics, 15(5):1111-1115, September-October 1992.;
3. Doyle, J.C., K. Glover, P. Khargonekar, and B. Francis, "State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 34, no. 8, pp. 831-847, August 1989.;
4. Polyak, B. T. Upravlenye lynejnimoj systemamoj pry vneshnyh vozmushhenyayah: Tehnyka lynejnih matry`chnih neravenstv / B. T. Polyak, M. V. Xlebnykov, P. S. Shherbakov. - M.: LENAND, 2014. - 560 s.;
5. Le, V.X., and M.G. Safonov. Rational matrix GCD's and the design of squaring-down compensators - a state space theory. IEEE Trans. Autom.Control, AC-36(3):384-392, March 1992.

УДК 681.513.7

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗОБЕТОНА

Кулинич Э.М.

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

E-mail: kulinich.eduard@mail.ru, kulinich@zntu.edu.ua

Copyright © 2014 by author and the journal "Automation technological and business - processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

DOI: 10.15673/2312-3125. 21/