

Г. В. КУЛІНЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-8501-5636

П. В. ЛЕОНТЬЄВ

кандидат технічних наук,
завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-9494-9078

А. В. САВЕНКО

студент кафедри комп'ютеризованих систем управління
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-7621-2777

О. В. ЛЕВКОВСЬКИЙ

аспірант, асистент кафедри комп'ютеризованих систем управління
Сумський державний університет
ORCID: 0009-0005-3073-2952

МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯМ ПЛАТФОРМИ БУДІВЕЛЬНОГО ПРИНТЕРА

У будівельній галузі, використання будівельних 3D принтерів радіального типу стає все більш популярним. Ці інноваційні принтери вже успішно застосовуються в п'яти країнах світу. Вони дозволяють зменшити витрати людських, енергетичних і часових ресурсів, в порівнянні з традиційними методами будівництва. Радіальні принтери компактні й не потребують додаткових каркасних конструкцій. Якість та швидкість будівництва залежать від працездатності принтера та точності його позиціонування. Дослідники активно працюють над вдосконаленням цих параметрів, з метою поліпшення результатів будівництва.

Керування висотою підйому платформи грає важливу роль у досягненні високої точності позиціонування принтера, враховуючи вимоги до якості будівництва. Для ефективного розв'язання цих завдань застосовуються передові інформаційні технології, такі як імітаційне моделювання, автоматизоване керування. Результати експериментів і досліджень використовуються для вдосконалення функціональних характеристик системи підйому будівельного принтера і можуть бути застосовані при розробці систем керування для інших підйомних механізмів, таких як гідравлічний підйомник, гідравлічний прес або телескопічний вантажний кран.

Основною метою проведення досліджень є підвищення точності позиціонування платформи будівельного принтера в умовах дії збурень. У рамках роботи було проведено аналіз технологічних параметрів об'єкта керування, сформульовано вимоги до регуляторів, розроблена імітаційна модель системи підйому та налаштовані регулятори моделі позиціонування платформи. Результатом дослідження є опрацювання методики структурно параметричного синтезу керуючих пристроїв позиціонування платформи будівельного принтера.

Ключові слова: алгоритм, режими керування, гідравлічний привод, нечіткий регулятор, система керування, позиціонування, РІД регулятор, імітаційна модель.

H. V. KULINCHENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computerized Management Systems
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-8501-5636

P. V. LEONTIEV

Candidate of Technical Sciences,
Head of the Department of Computerized Management Systems
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-9494-9078

A. V. SAVENKO

Student at the Department of Computerized Management Systems
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-7621-2777

O. V. LEVKOVSKIYI

Postgraduate Student,
Assistant at the Department of Computerized Control Systems
Sumy State University
ORCID: 0009-0005-3073-2952

MODELING OF CONTROL ALGORITHMS POSITIONING OF THE CONSTRUCTION PRINTER PLATFORM

In the construction industry, the use of radial-type construction 3D printers is becoming more and more popular. These innovative printers are already successfully used in five countries of the world. They make it possible to reduce the costs of human, energy and time resources, compared to traditional construction methods. Radial printers are compact and do not require additional frame structures. The quality and speed of construction depend on the performance of the printer and the accuracy of its positioning. Researchers are actively working on improving these parameters in order to improve construction results.

Platform lift height control plays an important role in achieving high printer positioning accuracy, taking into account build quality requirements. Advanced information technologies, such as simulation modeling and automated control, are used to effectively solve these tasks. The results of experiments and research are used to improve the functional characteristics of the lifting system of the construction printer and can be applied in the development of control systems for other lifting mechanisms, such as a hydraulic lift, a hydraulic press or a telescopic loading crane.

The main goal of the research is to increase the accuracy of the positioning of the construction printer platform under conditions of disturbances. As part of the work, the technological parameters of the control object were analyzed, the requirements for regulators were formulated, a simulation model of the lifting system was developed, and the regulators of the platform positioning model were adjusted. The result of the study is the elaboration of the method of structural parametric synthesis of control devices by positioning the construction printer platform.

Key words: *algorithm, control modes, hydraulic drive, fuzzy controller, control system, positioning, PID controller, simulation model.*

Постановка проблеми

Можливості реалізації заданих параметрів систем позиціонування визначаються відповідно до результатів моделювання цієї системи [1]. Крім вирішення задач розробки регулятора, який забезпечує необхідні параметри роботи приводу, при модернізації засобів підйому будівельної платформи доводиться оптимізувати конструктивно – технологічні параметри цього обладнання. Підхід до оптимізації параметрів технологічного обладнання, заснований на представленні об'єкта керування (ОК) у вигляді мехатронного агрегату [2], дозволяє визначити структуру регулятора. Аналізуючи результати моделювання, можна узагальнити критерій керування, який би враховував взаємовплив технологічних параметрів мехатронного модуля. Це узагальнення дозволяє збалансувати вимоги до складових системи керування та задовільнити вимоги до параметрів регулятора без ускладнення системи керування приводом.

Жорсткі вимоги до точності позиціонування платформи, що розглядається, витікають із специфіки технології контурного будівництва та забезпечення надійності будівлі, що створюється за вибраною технологією. Прагнення спростити реалізацію системи керування платформою обумовлює певний функціональний розподіл між окремими складовими системи (технічна та програмна). Тому формулювання меж та об'ємів розподілу функцій системи керування визначає актуальність таких досліджень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Виконавчим органом системи підйому платформи є привод, який складається з електромеханічної і гідравлічної частини. Розглядаючи варіанти побудови систем підйому, можна констатувати, що вони в основному використовуються в системах спрямованих на підйом великих вантажів [3]. Враховуючи необхідність точного позиціонування системи підйому будівельного принтера, на відміну від згаданих систем, рух штоків гідроциліндрів здійснюється за рахунок подачі малих фіксованих об'ємів гідравлічної рідини. Точне дозування малих об'ємів робочої рідини в гідравлічну систему можна отримати, якщо керувати обертами насоса певного об'єму [4].

Звертаючи увагу на енергозберігаюче керування електроприводом насоса гідравлічного крана, в якому використовується асинхронний двигун з частотним перетворювачем [5], розглядаються варіанти налаштування робочих швидкостей головного насоса. При цьому за допомогою моделі «досліджуються можливості збільшення інтенсивності перехідних процесів з метою скорочення часу розгону насоса до технологічно припустимих

значень. Більш точно керування головним насосом може бути реалізоване шляхом завдання в системі тиску, необхідного для роботи з конкретним значення моменту навантаження кожного з механізмів».

Одним із недоліків використання такого типу двигуна у гідравлічних системах є його м'яка механічна характеристика. Тому під час різкої зміни механічного навантаження на гідромотор спостерігаються збурення моменту асинхронного двигуна. Для подолання провалів обертаючого моменту доводиться використовувати асинхронні двигуни великої потужності, що суттєво знижує ККД системи.

Порівняно з двигуном змінного струму, двигун постійного струму має відмінні характеристики регулювання швидкості, великий крутний момент, добру продуктивність на низькій швидкості та високу ефективність [6]. Проте, вплив умов експлуатації – наявність вологи, пилу та вібрації, що характерно для будівельних робіт, значно обмежує можливості його використання в системі підйому будівельного принтера. До того ж, при вирішенні задач точного дозування робочої рідини необхідно використовувати додаткові гальмівні елементів, які дозволяють запобігти утворенню надлишкового тиску в гідравлічній системі.

Альтернативою до згаданих двигунів при побудові приводу точних насосів може бути кроковий двигун (КД), який має фіксований кут повороту і момент утримання положення валу, незалежно від наявності живлення [7].

Отже, вибір КД в якості приводу гідравлічної системи підйому дозволяє сформувати завдання досліджень системи керування позиціонуванням платформи будівельного принтера.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розробка математичної моделі системи керування платформою будівельного принтера на базі КД, а також оцінка можливостей розробки алгоритму керування мікропроцесорними засобами системи, який забезпечить максимальну точність позиціонування платформи.

Для досягнення поставленої мети необхідно дослідити взаємозв'язок конструктивно-технологічних параметрів системи підйому.

На основі аналізу результатів моделювання оцінити характеристики побудованого приводу та здійснити параметричний синтез регулятора, який забезпечить рівномірний підйом платформи із заданою точністю.

Виконання цих завдань сприяє відпрацюванню взаємодії апаратної та програмної складових системи в аспекті розподілення її функцій.

Крім того, дослідження методів та каналів керування елементами і апаратами подачі гідравлічної рідини дає змогу оптимізувати параметри механічної частини установки підйому та сформувати шляхи подальшої модернізації.

Матеріали дослідження

Схема ОК, що представляє собою систему підйому платформи будівельного принтера зображена на рис. 1. Ця схема складається з двох частин: гідравлічної підсистеми та електромеханічного приводу.

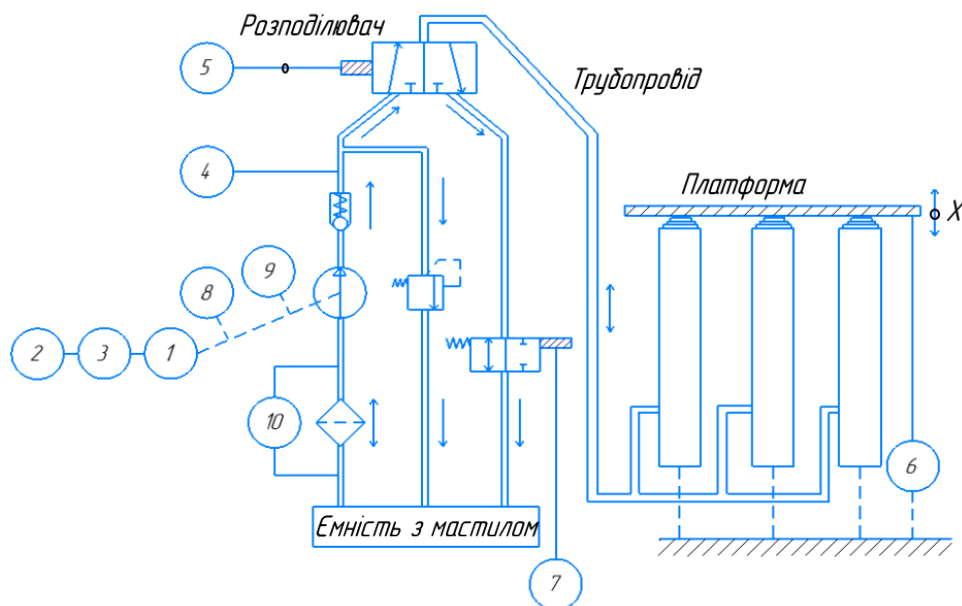


Рис. 1. Функціональна схема гідравлічної системи підйому: 1 – КД; 2 – драйвер; 3 – давач струму в обмотках КД; 4 – давач тиску; 5 – контролер розподільника; 6 – давач висоти підйому платформи; 7 – контролер клапана зливної магістралі; 8 – давач швидкості обертання валу КД; 9 – давач кута повороту валу КД; 10 – диференціальний давач тиску

Електромеханічний привод будується на базі КД, який, механічно зв'язаний з насосом. При їх обертанні в напірній магістралі системи створюється необхідний тиск гідравлічної рідини, якого достатньо для руху платформи. Для опускання платформи конструктивно передбачена зливна магістраль, в якій встановлено електричний клапан. Відкриття клапану 7 (рис. 1) знижує тиск, в результаті чого тиск в магістралі зменшується, і платформа принтера змінює напрямок руху. Стабілізація положення здійснюється за рахунок компенсації втрат тиску, який контролюється давачем тиску 4.

Структурна схема системи підйому (СП) платформи будівельного принтера представлена на рис. 2.

Частота керуючих імпульсів f_i , що надходять з мікроконтролера (МК), задає швидкість обертання ω КД, який обертає шестерінчастий насос (НШ). Тиск гідравлічної рідини P , що утворюється в трубопроводі гідроприводу, визначає переміщення штоку гідроприводу. Від тиску P і витрати q залежить швидкість переміщення штоку гідроциліндра V та висота підйому платформи h .

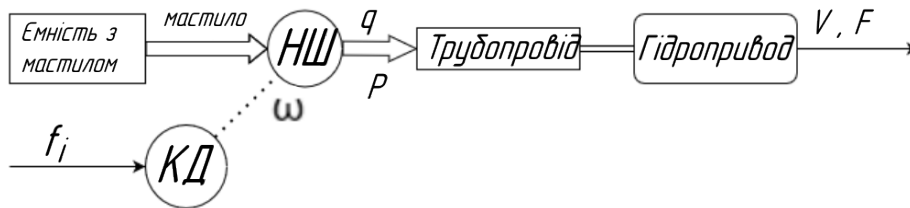


Рис. 2. Структурна схема СП

Електромеханічний модуль складається з наступних функціональних вузлів: приводний КД; шестерінчастий насос (НШ); трубопровід; гідропривод.

Відповідно до відомих методів моделювання КД [8] в середовищі MATLAB побудовано функціональний блок «ПРИВОД», який входить до складу підсистеми електромеханічного перетворювача. Схема електромеханічного перетворювача зображена на рис. 3. До складу цієї схеми також входить блок «Speed controller», який через блок «ПРИВОД» видає керуючі впливи до гідророзподільвача підйомника.

Схема моделювання гідравлічного підйомника, яка використовує мнемоніку MATLAB Simhydraulic [9], зображена на рис. 4. На схемі показана взаємодія гідронасосу, гідроциліндру і гідророзподільвача. Керуючий вплив на насос надходить із підсистеми електромеханічного перетворювача.

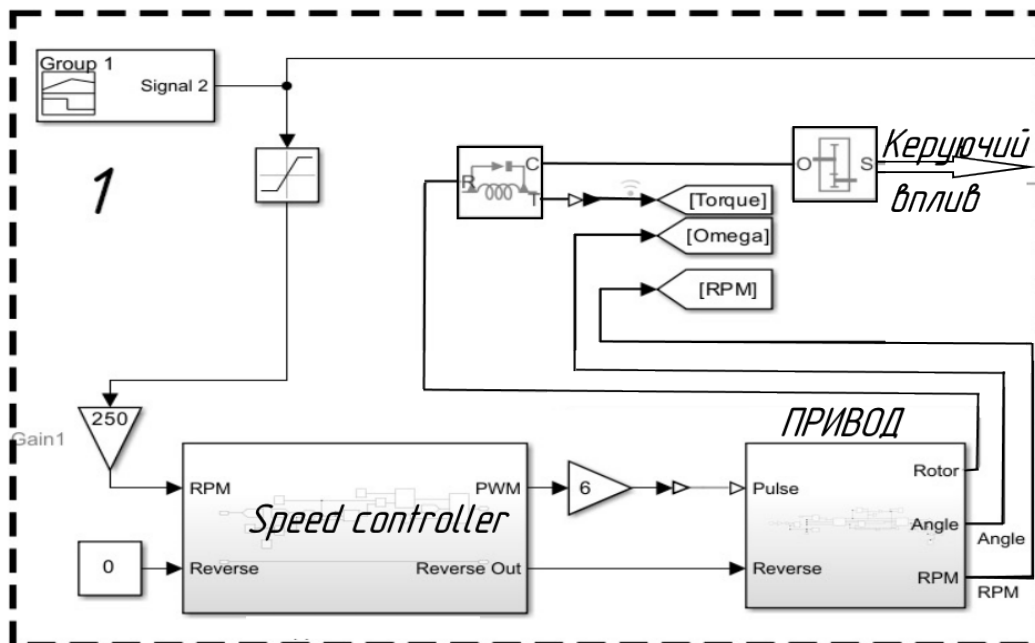


Рис. 3. Імітаційна модель електромеханічного перетворювача

В процесі досліджень імітаційної моделі виявилось [10], що процес переміщення платформи супроводжується коливаннями, які виникають в результаті взаємодії елементів конструкції платформи будівельного принтера.

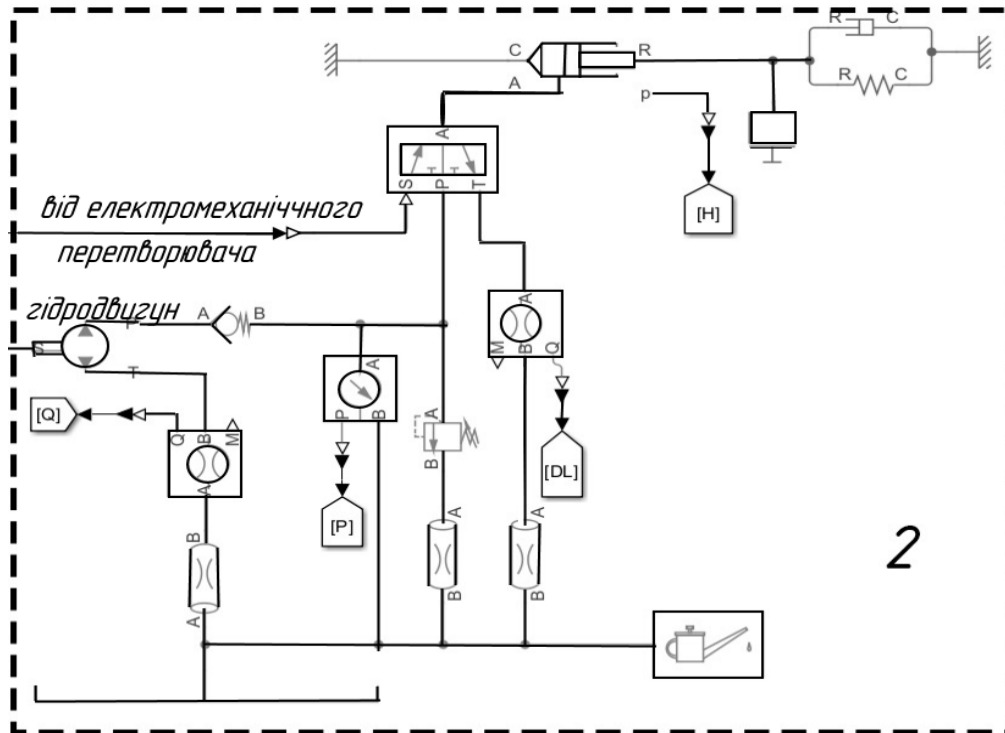


Рис. 4. Імітаційна модель гідравлічного підйомника

Як видно із осцилограм, що показані на рис. 5, коливання заданої висоти (рис. 5а) виникають під час різкої зміни швидкості руху платформи (рис. 5б). Коливання висоти, що спостерігаються, мають певний час згасання і залежать від сталих часу ОК. Зменшення величини коливань які впливають на точність позиціонування, відповідно, на якість роботи будівельного принтера, є додатковим завданням регулятора цього параметру.

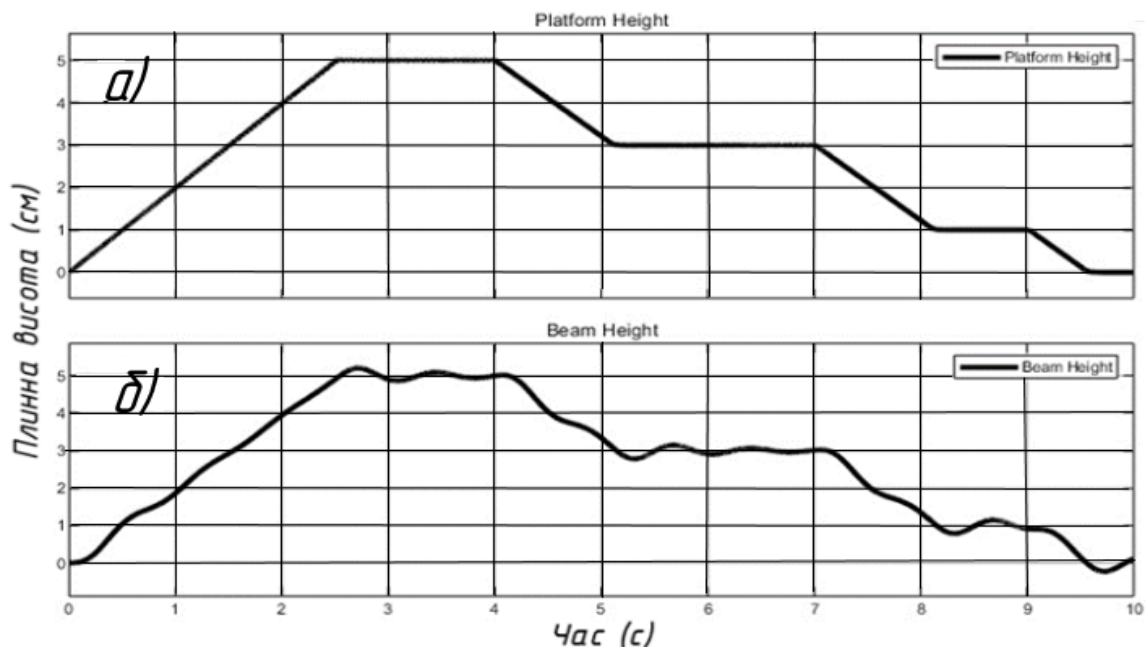


Рис. 5. Осцилограми зміни висоти підйому платформи: а – осцилограма заданої висоти; б – плинне значення висоти платформи

Традиційний підхід щодо компенсації збурень шляхом використання ПД регулятора висоти по каналу витрат виявляється неефективним, як це видно із рис. 6.

Одною із причин, що впливають на якість регулювання, може бути відмінність сталих часу каналу керування по висоті та каналу збурень. Така ситуація обумовлює побудову додаткового каналу керування, який би забезпечив компенсацію коливань.

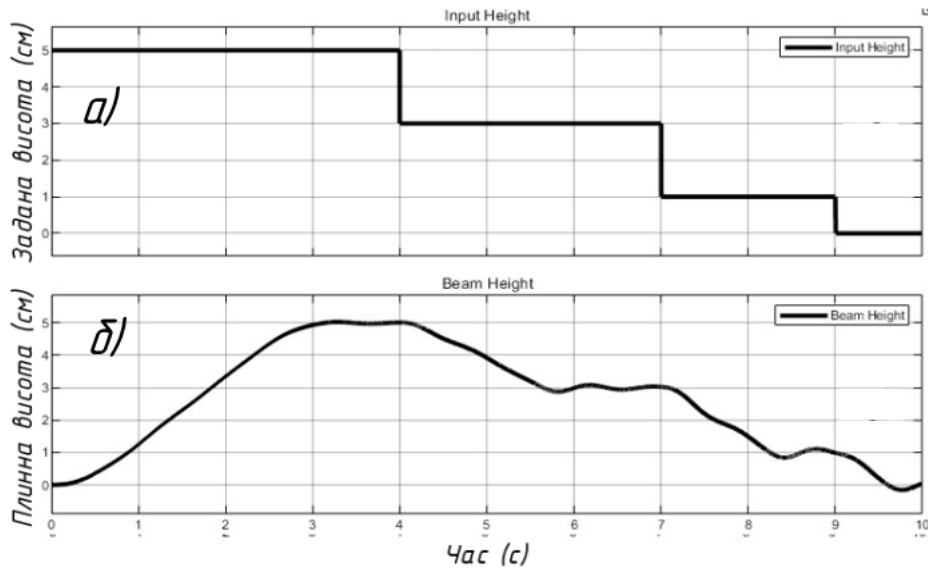


Рис. 6. Осцилограми зміни висоти з використанням ПІД регулятора: а – осцилограма заданої висоти; б – плинна значення висоти платформи

Недостатня ефективність традиційних ПІД регуляторів пояснюється тим, що зміна параметрів ОК або зміна характеру зовнішніх збурень вимагає ручного налаштування коефіцієнтів регулятора. Додаткові складнощі налаштувань виникають у випадках, коли необхідно забезпечити взаємодію цього регулятора із іншими контурами, наприклад, пов'язаного керування. Нелінійність та нестационарність рівнянь, що описують реальні переміщення в ОК, призводять до того, що при керуванні такими переміщеннями параметри налаштувань регулятора вибирають шляхом компромісу. Оптимізація системи здійснюється у декількох точках, відповідно до вибраного режиму шляхом корегувань параметрів регулятора.

Враховуючи, що коливальність перехідних процесів переміщення платформи залежить від декількох взаємопов'язаних параметрів гідроприводу, можна припустити, що аналітичний опис додаткового каналу керування буде мати складний характер. Тому для реалізації внутрішнього контуру керування системи вибрано регулятор з нечіткою логікою (Fuzzy Controller), який на першому етапі розробки будуватиметься в програмному середовищі MATLAB Simulink. Схема моделювання нечіткого регулятора тиску (контур стабілізації тиску гідроприводу) зображено на рис. 7.

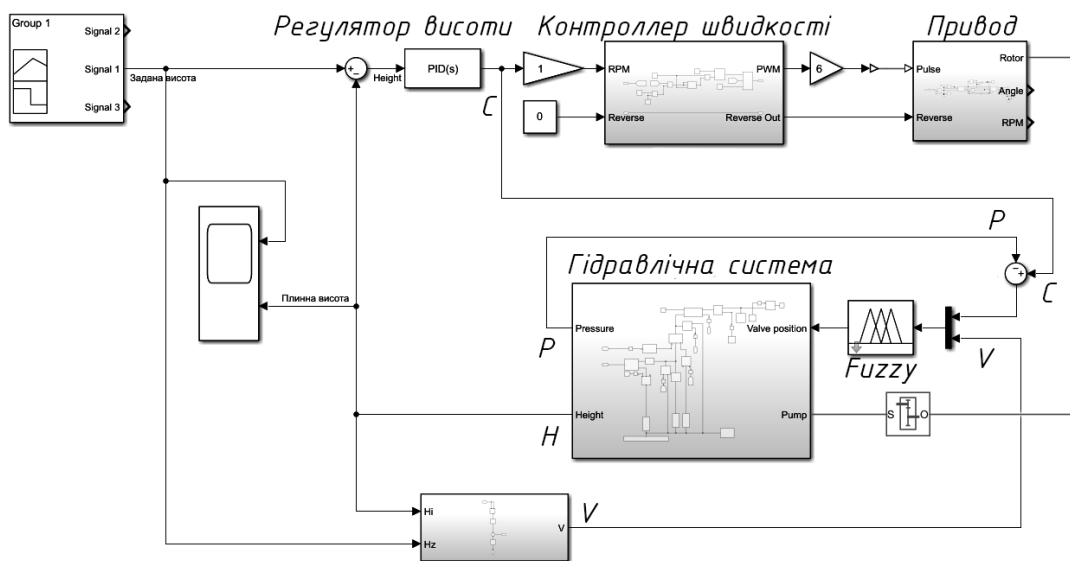


Рис. 7. Схема керування з використанням Fuzzy регулятора

Цей Fuzzy Controller на вході приймає два параметри: V – різниця між висотою на початку руху платформи і плинною висотою, C – керуючий вплив регулятора висоти (завдання Fuzzy регулятора тиску P).

Для мінімізації коливань висоти підйому формується набір правил, що дозволяють змінювати вихідне значення тиску в залежності від різниці плинної висоти платформи від заданої і коливань тиску в гідравлічному циліндрі. Ефективність дії регуляторів ілюструється рис. 8, де показано рівень коливань з використанням регулятора та без нього.

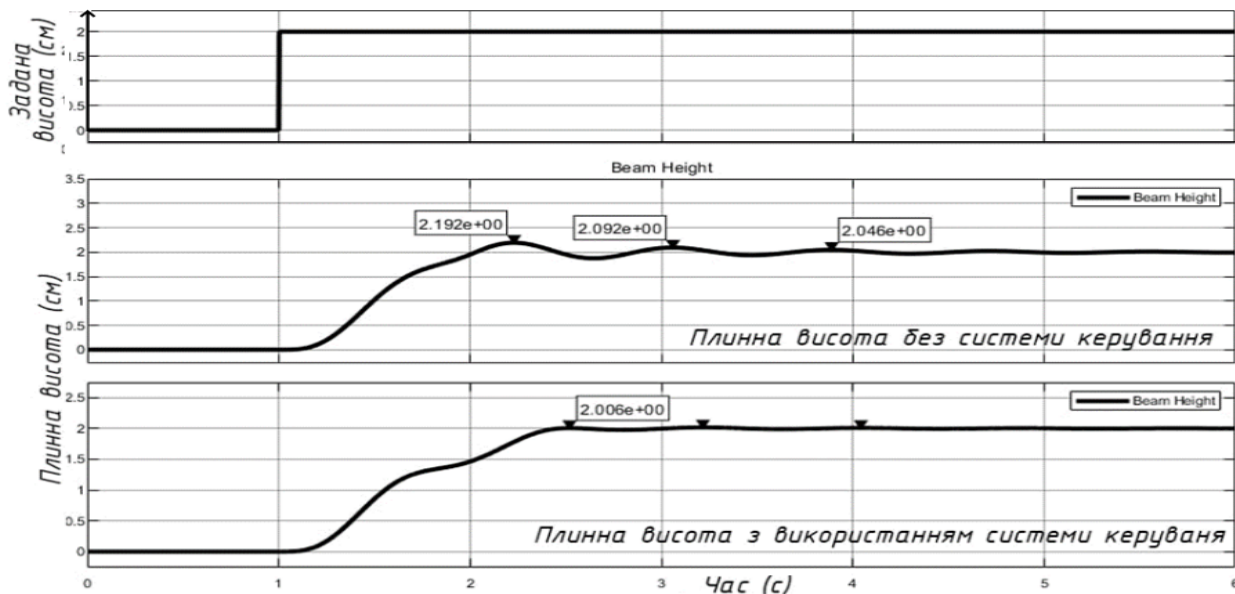


Рис. 8. Відображення процесу переміщення платформи

Результати тестування відпрацювання заданих значень висоти платформи показані на рис. 9.

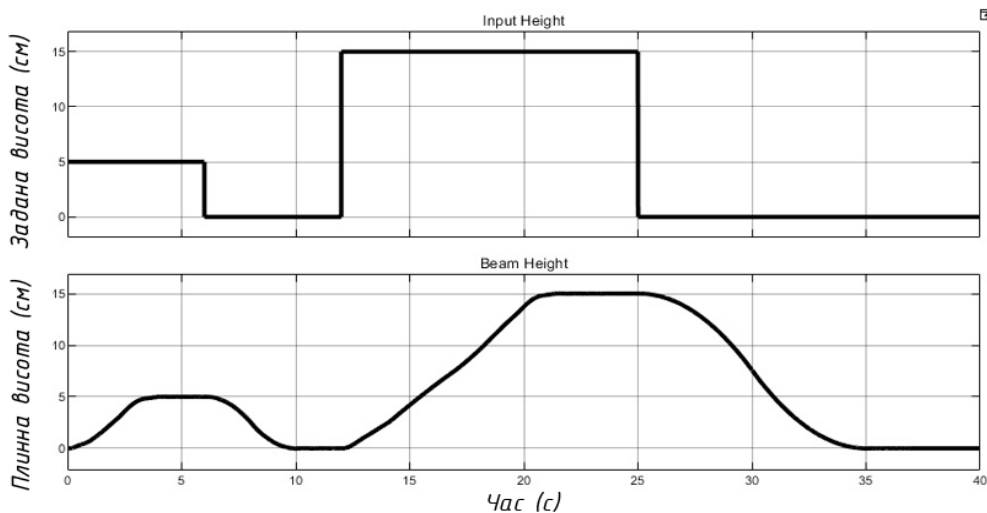


Рис. 9. Осцилограми зміни заданої і плинної висоти платформи

На осцилограмі рис. 9 видно, що під час імітації переміщення платформи на висоту 5 і 15 см коливання висоти мінімізовані в результаті адаптації виконавчого механізму до змін швидкості переміщення платформи. При цьому значення висоти платформи на виникнення коливань не впливають.

Підсумовуючи результати моделювання руху платформи будівельного принтера, можна констатувати, що точність позиціонування платформи забезпечується наступними вимогами:

- регулятор переміщення будується за багатоконтурною структурою;
- регулювання позиціонування платформи повинно реалізовувати процедури адаптації при зміні параметрів ОК;
- вибір енергетичних показників швидкість/вага повинен здійснюватися, виходячи із ККД, що досягається при реалізації системи керування.

Висновки

1. Розроблена модель переміщення платформи будівельного принтера радіального типу з урахуванням коливань висоти платформи.
2. На базі моделі проведена оцінка динамічних характеристики ОК, що дало змогу сформулювати вимоги до системи керування насосом та клапаном гідравлічної системи підйому платформи.
3. Дані, що отримані в результаті моделювання, забезпечили проведення структурно параметричний синтез регуляторів.
4. В результаті використання нечіткого регулятора мінімізовано рівень коливань платформи, що викликані зовнішніми збуреннями.

Список використаної літератури

1. Лупина І.Б., Ключко Т.Р., Скицюк В.І. Моделювання багатокритеріальної системи контролю роботи металообробного спец-обладнання. Київ : Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування. 2021. № 61(1). С. 52–60.
2. Panchenko A., Voloshina A., Kiurchev S. and others. Development of the universal model of mechatronic system with a hydraulic drive. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 4/7(94). P. 51–60. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.129577
3. Stastny J. Motycka V. Design Optimization of Lifting Mechanisms. WMCAUS 2018. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 471 (2019) 062032. DOI:10.1088/1757-899X/471/6/062032
4. Андренко П. М. Гідравлічні пристрої мехатронних систем. Харків: НТУ «ХПІ». 2014. С. 7–34.
5. Мельнікова Л.В., Шестака А.І., Калінін О.Г. Енергозберігаюче керування електроприводом насоса гідравлічного крана. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2018. № 27. С. 82–90.
6. Morales R., Somolinos J.A., Sira-Ramírez H. Control of a DC Motor using Algebraic Derivative Estimation with Real Time. Experiments Measurement. 2014. Vol. 47. P. 401–417.
7. Кулінченко Г.В., Леонтьєв П.В., Панич А.О., Савенко А.В. Керування підйомом платформи будівельного принтера. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. Видавничий дім «Гельветика». 2022. Вип. 1. С. 30–38.
8. Кухарчук В. В., Ведміцький Ю. Г., Граняк В. Ф. Вимірювання параметрів обертового руху електромеханічних перетворювачів енергії в перехідних режимах роботи. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця. 2018. С. 35–45.
9. Vechet, Stanislav, Jiri Krejsa. Hydraulic arm modeling via matlab simhydraulics. Svratka, Czech Republic : National Conference with International Participation. Engineering Mechanics 16.4. 2009. С. 287–296.
10. Кулінченко Г.В., Леонтьєв П.В., Савенко А.В., Папета А.О. Керування стрілою будівельного принтера з допомогою крокового двигуна. Кременчук : XX Міжнародна науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”: матеріали конференції. 2021. С. 14–16.

References

1. Lupina I. B., Klochko T. R., Skytsyuk V. I. (2021) Modeliuvannia bahatokryterialnoi systemy kontroliu roboty metaloobrobnoho spc-obladnannia. [Modeling of a multi-criteria control system for the operation of metalworking CNC equipment]. Kyiv: Visnyk Kyivskoho politekhnichnoho instytutu. Serii Pryladobuduvannia. № 61(1). P. 52–60.
2. Panchenko A., Voloshina A., Kiurchev S. and others. (2018) Development of the universal model of mechatronic system with a hydraulic drive. [Development of the universal model of mechatronic system with a hydraulic drive]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 4/7(94). P. 51–60. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.129577
3. Stastny J., Motycka V. (2019) Design Optimization of Lifting Mechanisms. [Design Optimization of Lifting Mechanisms]. WMCAUS 2018. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 471 062032. DOI: 10.1088/1757-899X/471/6/062032
4. Andrenko P. M. (2014) Hidravlichni prystroiy mekhatronnykh system. [Hydraulic devices of mechatronic systems]. Kharkiv: NTU “KhPI”. P. 7–34.
5. Melnikova L. V., Shestaka A. I., Kalinin O. G. (2018) Enerhozberezhennia keruvannia elektropryvidom nasosa hidravlichnoho krana. [Energy-saving control of the electric drive of a hydraulic crane pump]. Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy. № 27. P. 82–90.
6. Morales R., Somolinos J. A., Sira-Ramírez H. (2014) Control of a DC Motor using Algebraic Derivative Estimation with Real Time. [Control of a DC Motor using Algebraic Derivative Estimation with Real Time]. Experiments Measurement. Vol. 47. P. 401–417.
7. Kulichenko H. V., Leontiev P. V., Panych A. O., Savenko A. V. (2022) Keruvannia pidiomom platformy budivelnogo druku. [Control of platform lifting for a construction printer]. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. Vidavnichyi dim “Helvetika”. Vyp. 1. P. 30–38.

8. Kukharchuk V. V., Vedmitskyi Yu. H., Graniak V. F. (2018) Vymiriuvannia parametriv obertalnoho rukhu elektromekhanichnykh peretvoriuvachiv enerhii v perekhidnykh rezhymakh roboty. [Measurement of parameters of rotational motion of electromechanical energy converters in transient modes of operation]. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia. P. 35–45.

9. Vechet, Stanislav, Jiri Krejsa. (2009) Hydraulic arm modeling via Matlab SimHydraulics. [Hydraulic arm modeling via Matlab SimHydraulics]. Svratka, Czech Republic: National Conference with International Participation. Engineering Mechanics 16.4. P. 287–296.

10. Kulinchenko H. V., Leontiev P. V., Savenko A. V., Papeta A. O. (2021) Keruvannia striloiu budivelnoho druku z dopomohoiu krokovoho dvyhuna. [Control of the boom of a construction printer using a stepper motor]. Kremenchuk: XX Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia “Fizychni protsesy ta polia tekhnichnykh i biolohichnykh obektiv”: materialy konferentsii. P. 14–16.