

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-5>

Георгій КУЛІНЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007, georgv@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8501-5636

Петро ЛЕОНТЬЄВ

кандидат технічних наук, завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007, p.leontiev@ksu.sumdu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9494-9078
Scopus Author ID: 57192820868

Андрій ПАНИЧ

асистент кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007, a.panych@ksu.sumdu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-2511-5763

Арсен САВЕНКО

студент факультету електроніки та інформаційних технологій, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007, a.savenko@student.sumdu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7621-2777

Бібліографічний опис статті: Кулінченко, Г., Леонт'єв, П., Панич, А., Савенко, А. (2022). Керування підйомом платформи будівельного принтера. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 30–38, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-5>

КЕРУВАННЯ ПІДЙОМОМ ПЛАТФОРМИ БУДІВЕЛЬНОГО ПРИНТЕРА

Метою роботи є отримання необхідних даних для розробки системи підйому платформи стріли будівельного 3D-принтера, що дозволить підвищити точність позиціонування за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання. Реалізація поставленої мети передбачає вирішення завдань: розробки математичної моделі електромеханічного перетворювача, що забезпечує точне переміщення платформи стріли будівельного 3D-принтера на базі вибраної електричної машини; дослідження взаємозв'язку конструктивно-технологічних параметрів системи підйому; формування засад побудови схеми керування електроприводом та гідроприводом, що забезпечує утримання заданої позиції в підйомних гідроприводах. **Методологія** вирішення поставленого завдання полягає в імітаційному моделюванні процесу переміщення гідроприводів платформи завдяки зміні тиску в гідравлічній системі за допомогою насоса і крокового двигуна в якості приводу. Використані методи теорії автоматичного керування електричними апаратами, перетворень Лапласа, методи теорії електроприводу, електричного та магнітного поля, теорії гідромеханіки і математичного моделювання. **Наукова новизна.** В ході виконання роботи створено методику побудови електроприводу системи підйому платформи будівельного 3D-принтера і отримання характеристик приводу на основі крокового двигуна в середовищі Matlab/Simulink. **Висновки.** Основним результатом досліджень є підвищення точності позиціонування висоти платформи стріли будівельного 3D-принтера завдяки опрацюванню режимів роботи крокового двигуна у складі електроприводу гідравлічної системи підйому. Розроблена модель каналу керування позиціонуванням стріли будівельного 3D-принтера, досліджені алгоритми керування кроковим двигуном по зміні витрат робочого середовища, продуктивність і точність під час позиціонування платформи стріли. Модель дозволяє впровадити запропоновані методи моделювання для інших контурів керування об'єктом.

Ключові слова: будівельний принтер, гідропривід підйому платформи, кроковий двигун, керування, математична модель.

Heorhii KULINCHENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Computerized Control Systems, Sumy State University, 2 Rimsky-Korsakov str., Sumy, Ukraine, 40007, georgv@ukr.net

ORCID: 0000-0002-8501-5636

Petro LEONTIEV

Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Computerized Control Systems, Sumy State University, 2 Rimsky-Korsakov str., Sumy, Ukraine, 40007, p.leontiev@ksu.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-9494-9078

Scopus Author ID: 57192820868

Andrii PANYCH

Assistant Lecturer at the Department of Computerized Control Systems, Sumy State University, 2 Rimsky-Korsakov str., Sumy, Ukraine, 40007, a.panych@ksu.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2511-5763

Arsen SAVENKO

Student at the Faculty of Electronics and Information Technology, Sumy State University, 2 Rimsky-Korsakov str., Sumy, Ukraine, 40007, a.savenko@student.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-7621-2777

To cite this article: Kulinchenko, H., Leontiev, P., Panych, A., Savenko, A. (2022). Keruvannia pidiomom platformy budivelnoho pryntera [Construction printer platform lift control]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 30–38, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-5>

CONSTRUCTION PRINTER PLATFORM LIFT CONTROL

The aim of the work is to obtain the necessary data for the development of the boom platform lifting system of the construction 3D-printer, which will increase the accuracy of positioning by optimizing the operating modes of the equipment. Realization of the set purpose provides the decision of problems: development of mathematical model of the electromechanical converter providing exact movement of a boom platform of the construction 3D-printer on the basis of the chosen electric machine; study of the relationship between structural and technological parameters of the lifting system; formation of bases of construction of the control scheme of the electric drive and the hydraulic drive providing holding of the set position in lifting hydraulic drives. **The methodology** for solving this problem is to simulate the process of moving the hydraulic drives of the platform by changing the pressure in the hydraulic system using a pump and a stepper motor as a drive. Methods of the theory of automatic control of electric devices, Laplace transforms, methods of the theory of electric drive, electric and magnetic field, theory of hydromechanics and mathematical modeling are used. **Scientific novelty.** In the course of the work the method of construction of the electric drive of the lifting system of the construction 3D-printer platform and obtaining the characteristics of the drive based on the stepper motor in the Matlab/Simulink environment was created. **Conclusions.** The main result of the research is to increase the accuracy of positioning the height of the boom platform of the construction 3D-printer by developing the modes of operation of the stepper motor as part of the electric drive of the hydraulic lifting system. A model of the boom positioning control channel of a construction 3D printer has been developed, stepper motor control algorithms for changing the operating medium flow rate, productivity and accuracy during boom platform positioning have been studied. The model allows to implement the proposed modeling methods for other object control loops.

Key words: construction printer, platform lifting hydraulic drive, stepper motor, control, mathematical model.

Актуальність проблеми. Актуальність дослідження полягає в оцінці можливостей забезпечення точності позиціонування платформи стріли будівельного 3D-принтеру за рахунок використання відповідного приводу гідронаосу. Крім того, дослідження методів та каналів керування елементами і апаратами подачі гідравлічної рідини дає змогу оптимізувати параметри механічної частини установки підйому тим самим підвищити точність позиці-

онування, швидкість переміщення, зменшення реакції на зовнішні збурення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Галузь 3D-будівництва почала активно розвиватись тільки в останньому десятиріччі. Відповідно, зараз активно досліджуються і розвиваються технології та обладнання для 3D-будівництва, зокрема засоби автоматизації та інформаційні технології (Edenhofer S., 2016; Labonnote N., 2016). Одним з типів застосо-

вуваних будівельних 3D-принтерів є радіальний. Радіальні 3D-принтери відрізняються по типу конструкції від інших будівельних і промислових установок для друкування, схемами керування та методами подавання матеріалу. Однією із основних конструктивно-технологічних відмінностей цього типу принтерів є використання гідравлічної системи підйому стріли. Гідравлічна система підйому стріли складається з гідронасосу зі своїм приводом, телескопічних гідроприводів та гідророзподільників. До параметрів процесу підйому платформи висуваються досить жорсткі вимоги, зокрема точність позиціонування. При недотриманні точності подачі будівельного розчину утворюються зсуви кладки, через що знизиться рівень надійності будівлі. Відповідно, основним контуром керування будівельного принтера є система позиціонування, що забезпечує точне переміщення платформи будівельного принтера, на якій знаходиться екструдер із робочою сумішшю. Сукупність характеристик (Кулинченко Г.В., 2013) зумовлює доцільність використання для приводу гідронасосу крокового двигуна (КД). Для покращення характеристик гідроприводу доцільно використати підходи, описані у (Жданов А.В., 2016). Аналізуючи публікації, що присвячені розбудові математичних моделей КД, можна констатувати, що досить ефективний підхід демонструється при використанні моделі КД у просторі станів (Лекомцев П.В., 2020), що дозволяє обчислювати керуючі впливи з урахуванням змінних навантажень на валу КД.

Метою дослідження є отримання необхідних даних для розробки системи підйому платформи стріли будівельного 3D-принтера, що дозволить підвищити точність позиціонування за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання. Реалізація поставленої мети передбачає вирішення завдань: розробки математичної моделі електромеханічного перетворювача, що забезпечує точне переміщення платформи стріли будівельного 3D-принтера на базі

вибраної електричної машини; дослідження взаємозв'язку конструктивно-технологічних параметрів системи підйому; формування засад побудови схеми керування електроприводом та гідроприводом, що забезпечує утримання заданої позиції в підйомних гідроприводах.

Виклад основного матеріалу. Структурну схему агрегату підйому платформи будівельного 3D-принтера можна представити у вигляді, показаному на рис. 1.

Агрегат підйому являє собою мехатронний модуль (Кулинченко Г.В., 2013) та складається з наступних функціональних вузлів: приводний кроковий двигун (КД), шестерінчастий насос (НШ), трубопровід, гідропривод. Частота керуючих імпульсів f_i задає швидкість обертання ω двигуна КД, який обертає насос НШ, в результаті чого під дією тиску гідравлічної рідини P в трубопроводі гідросистеми здійснюється переміщення штоків гідроприводу на висоту підйому платформи. Структурна схема контуру керування по висоті підйому платформи зображена на рис. 2.

Збільшення висоти підйому платформи стріли принтера здійснюється в результаті видачі керуючих сигналів на драйвер КД, який обертає насос НШ, в результаті чого створюється тиск переміщення. Реверс напрямків переміщення здійснюється шляхом перемикавання розподільника P . При зменшенні висоти підйому платформи потрібна швидкість переміщення досягається завдяки керуванню гідравлічним потоком робочою рідиною на злив. Тиск в гідроциліндрі G_c зменшується під дією ваги платформи. Швидкість опускання платформи регулюється з допомогою клапану зливу K_l , що встановлений у трубопроводі зливу.

Критеріями ефективного керування підйомом/опусканням платформи принтера є точність позиціонування та рівномірність переміщення платформи в умовах дії змінних навантажень. Вирішення цих завдань залежить від вирішення часткових задач керування, зокрема:

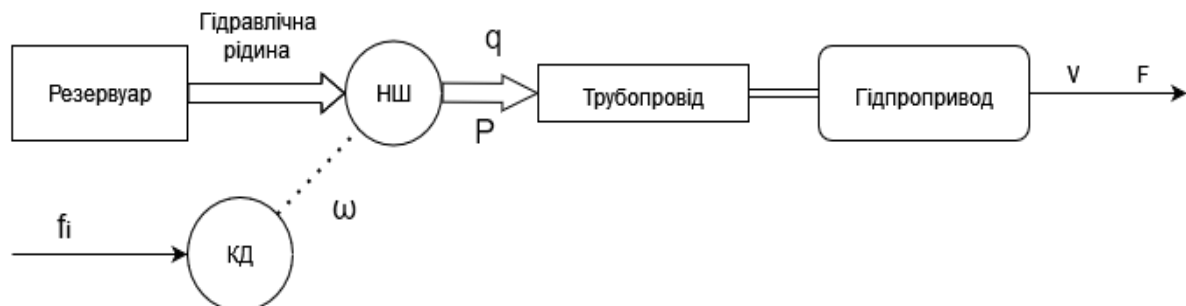


Рис. 1. Структурна схема агрегату підйому платформи

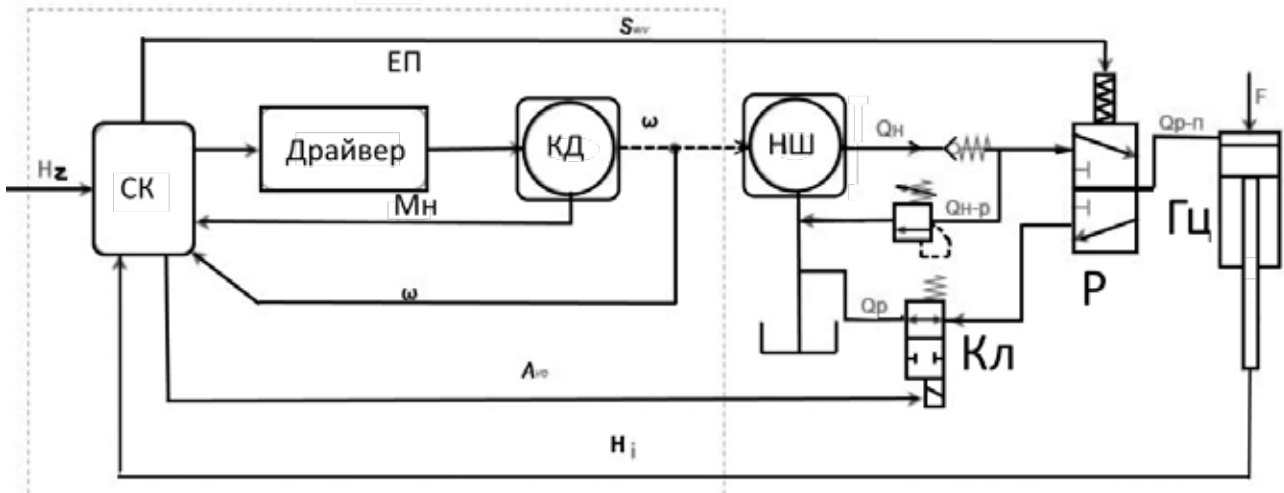


Рис. 2. Структурна схема каналу керування по висоті підйому платформи

- мінімізація інтенсивності зміни пов'язаних параметрів робочої рідини, параметрів трубопроводів, відповідно, гідромеханічних втрат;
- зниження інтенсивності зношування елементів установки з використанням адаптивного регулювання процесів тертя та буксування;
- врахування наслідків комутаційних процесів, які відбуваються в драйвері та засобах електроприводу;
- прогнозування параметрів динамічних процесів, які відбуваються внаслідок перерозподілу механічних навантажень при переміщенні та споживанні будівельної суміші;
- врахування впливу гідравлічної системи на характер електромеханічного навантаження на електричну машину (КД).

Саме намагання забезпечити високу точність позиціонування та мінімізацію інтенсивності зміни механічних параметрів переміщення платформи зумовлюють використання малопотужного приводу. Це дозволяє забезпечити досить точне дозування робочої рідини при необхідності малих переміщень.

Для забезпечення вирішення сформульованих задач в системі керування необхідні дані про реальну швидкість зростання/зменшення навантаження гідросистеми та механізмів, а також синхронізація вмикання/вимикання відповідних клапанів гідросистеми. Саме використання цієї інформації дозволяє реалізувати необхідні стабілізатори навантаження і швидкості.

Як видно із схеми (рис. 2), керування витратами та тиском (зусиллям переміщення) здійснюється з допомогою дроселюючих та розподільчих електромагнітних клапанів. Керуючі сигнали надходять із мікропроцесорної системи

керування, яка дозволяє отримати потрібну динаміку перехідних процесів в результаті обробки сигналів, що надходять від датчиків параметрів установки підйому.

Формування керуючих сигналів для електричних апаратів (електромагнітних клапанів) повинно здійснюватися з урахуванням можливостей виникнення гідравлічних ударів, або, навпаки провалів тиску. Використання в засобах автоматизації приводу розподільчого пристрою, який вмикається в контур зворотного зв'язку, дає змогу запобігти провалам тиску та підвищити точність позиціонування (Жданов А.В., 2016). Тому, в процесі керування поряд із завданням перерозподілу робочої рідини гідравлічній системі, вирішується завдання зміни швидкості переміщення штоку гідроциліндра відповідно до значення керуючого впливу. Відповідність досягається з допомогою корегування швидкості обертання насоса дозатора.

Для дослідження динаміки процесів, що відбуваються при переміщенні телескопічної платформи та зміні навантажень, що виникають при зміні маси екструдера в процесі споживання будівельної суміші, з урахуванням схеми рис. 2, побудована модель системи. На рис. 3 представлений загальний вигляд моделі системи підйому платформи, що переміщується електроприводом (ЕП) на базі КД. До складу схеми (рис. 3) входять три підсистеми: система керування (1), механічна система (2) та гідравлічна система (3).

Відповідно до алгоритму обчислення параметрів руху, електромагнітний момент M_E , створюваний обмотками фаз статора, обчислюється за наступною формулою (Лекомцев П.В., 2020):

$$M_E = -\psi_{m1} * i_1 \sin p\Theta - \psi_{m2} * i_2 \sin(\Theta - \lambda), \quad (1)$$

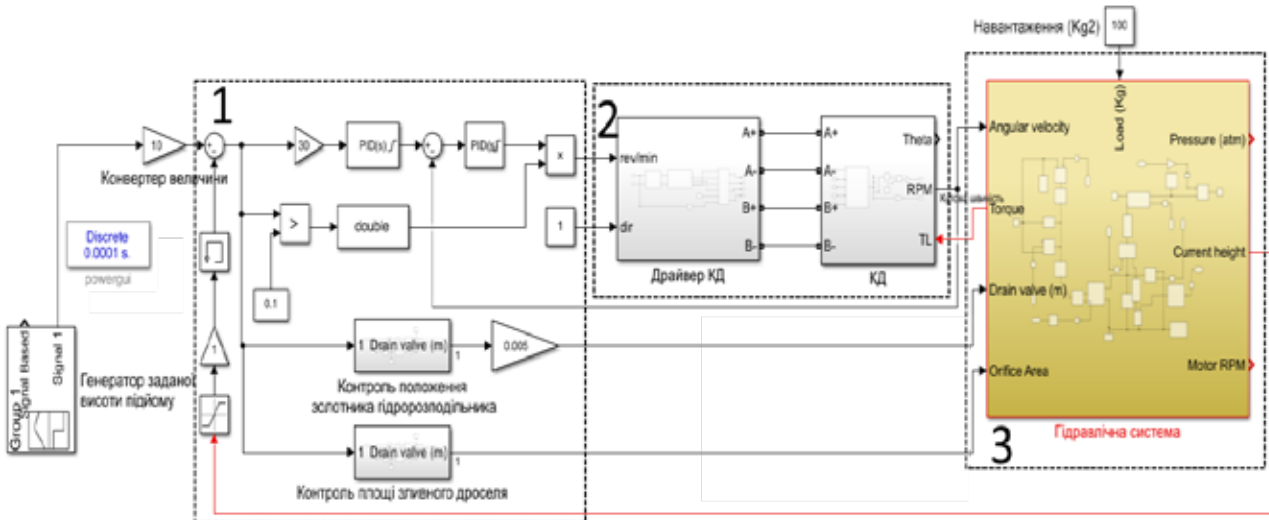


Рис. 3. Модель контуру керування підйомом платформи будівельного принтера

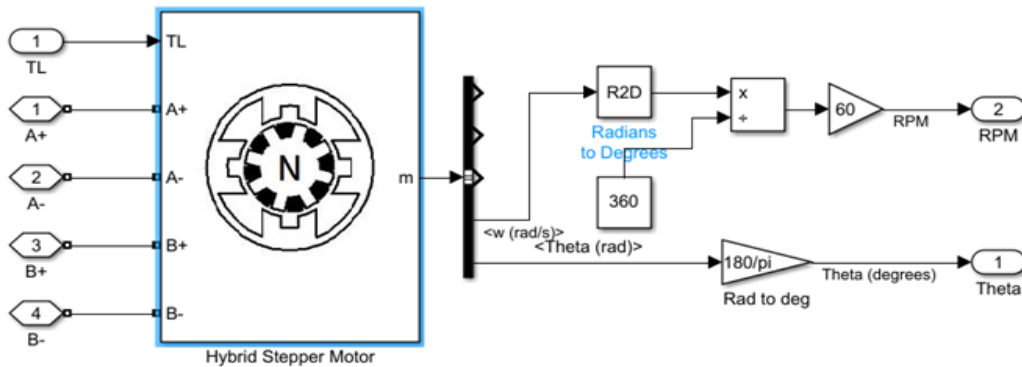


Рис. 4. Модель крокового двигуна

де i_1, i_2 – струми фаз, що протікають по обмотках статора; $\psi_{M1} = \psi_M \cdot (\sin p\Theta)$ та $\psi_{M2} = \psi_M \cdot (\sin p(\Theta - \lambda))$ – потокозчеплення фаз; λ – кут кроку полюсів p ; Θ – кут положення ротора.

Рівняння руху електроприводу з урахуванням діючих моментів:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J_\Sigma} (M_E - M_C), \quad (2)$$

де $J_\Sigma = J_p + J_H$ – сумарний момент інерції електроприводу, приведений до валу ротора; p – число пар полюсів; $\omega = d\Theta/dt$ – частота обертання; $M_C = M_H + M_T$ – сумарний момент опору двигуна; M_H – момент опору навантаження; $M_T = D \cdot d\Theta/dt$ – момент опору в'язкого тертя (D – коефіцієнт в'язкого тертя).

Приведені співвідношення використовуються при побудові моделі КД в середовищі Matlab/Simulink (рис. 4):

Обов'язковим елементом розбудови електроприводу на базі КД, є використання драйвера, що забезпечує комутацію обмоток КД. Драйвер будується на основі керуваного генератора сиг-

налу змінної частоти з використанням логічного пристрою. Останній формує імпульси різної довжини, яка відповідає заданому напрямку та швидкості обертання. Модель драйвера КД показана на рис. 5. В схемі вихід драйверу безпосередньо підключений до обмоток КД, що дає змогу контролювати значення струму в обмотках КД та оцінювати навантаження драйвера.

Відповідно до схеми контуру керування підйомом платформи вал КД жорстко зв'язаний звалом шестерінчастого насосу. Відповідно, об'єм подачі рідини в гідравлічну систему визначається пропорційною залежністю від швидкості обертання ω_H . Система рівнянь, що описує функціонування шестерінчастого насосу, буде мати вигляд (Репінський С.В., 2019):

$$\begin{aligned} M_H &= \frac{P_{P-H} \cdot q_H \cdot e_H}{\eta_{ГН}}, \\ Q_{HK} &= q_H \cdot e_H \cdot \omega_H \cdot \eta_{OH}, \\ e_H &= q_H / q_{HM}, \end{aligned} \quad (3)$$

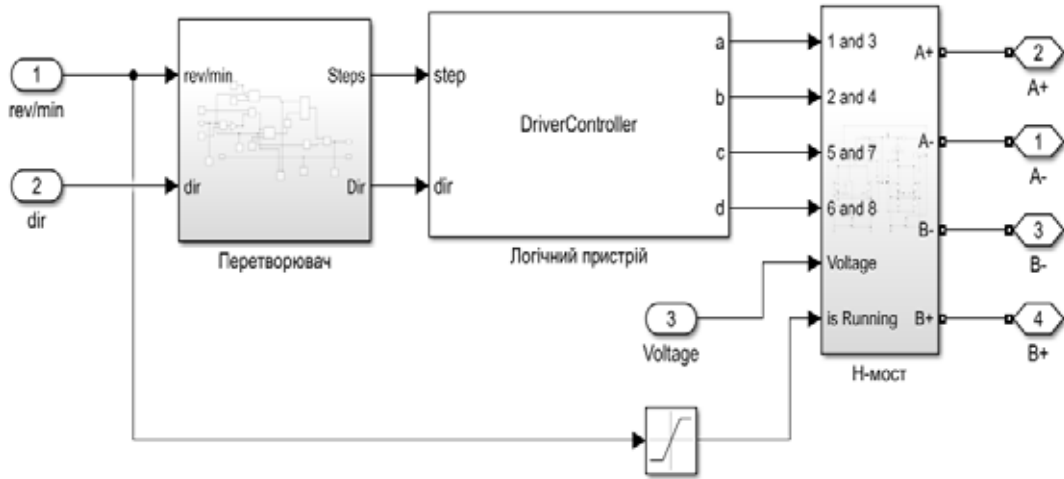


Рис. 5. Модель драйвера крокового двигуна

де Q_{HK} – подача від насоса до клапана розподільника; P_{P-H} – тиск між насосом та гідророзподільником; ω_H – кутова швидкість валу насоса; e_H – параметр регулювання; q_{HM} – максимальний робочий об’єм насоса; q_H – робочий об’єм насоса; M_H – момент навантаження на валу гідронасосу; $\eta_{ГН}$, $\eta_{ОН}$ – ККД насоса, відповідно, механічний та об’ємний.

Витрати робочої рідини через запобіжний клапан:

$$Q_{HP} = Q_{HK} - Q_K, \quad (4)$$

де Q_K – витрати робочої рідини, що проходить через клапан; Q_{HK} – подача між насосом і запобіжним клапаном; Q_{HP} – витрати між насосом і розподільником.

Рівняння витрати рідини на виході розподільника:

$$Q_P = \mu \cdot A_{\partial p} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \sqrt{P_H - P_1}} \cdot \text{sign}(P_H - P_1), \quad (5)$$

де $A_{\partial p}$ – площа робочого вікна розподільного золотника; μ – коефіцієнт витрати робочого вікна розподільного золотника; ρ – густина робочої рідини; P_H – поточне значення тиску робочої рідини на виході насоса; P_1 – поточне значення тиску робочої рідини в напірній гідролінії гідроциліндра.

Динаміка гідроциліндра може бути описана (Дусанюк Ж.П., 2015) за допомогою рівняння поступального руху поршня під дією тиску в залежності від зовнішнього навантаження, сухого та в’язкого тертя та рівнянь витрат на вході та виході:

$$Q_{PNC}^{\Pi} = \frac{dP_{\text{ЦРН}}}{dt} k_{\text{УЛРП}} + \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{dz}{dt} + k_{\text{ПЕРП}} (P_{\text{ЦРН}} - P_{\text{PCЦ}}),$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = (P_{\text{ЦРН}} - P_{\text{PCЦ}}) \cdot \frac{\pi D^2}{4} - \sigma_{\text{Ц}} \frac{dz}{dt} - (R_{\text{ТРП}} + R_{\text{ТРШ}} + k(P_{\text{ЦРН}} + P_{\text{PCЦ}})) \cdot \text{sign} \frac{dz}{dt} - F, \quad (6)$$

де Q^{Π} – витрати рідини від розподільника до порожнини циліндра, z – переміщення штоку гідроциліндра; m – приведена до штока маса рухомих частин гідроциліндра; D – діаметр поршня; d – діаметр штока; $\sigma_{\text{Ц}}$ – коефіцієнт в’язкого тертя; $R_{\text{ТРП}}$ та $R_{\text{ТРШ}}$ – сила сухого тертя в ущільненнях відповідно поршня та штока; F – сила навантаження на штоку гідроциліндра; $k_{\text{УЛРП}}$ – коефіцієнт пружності порожнин із рідиною; $k_{\text{ПЕРП}}$ – коефіцієнт перетікань порожнин з рідиною; $k_{\text{ПЕРШ}}$ – коефіцієнт перетікань рідини в порожнинах між штоком і поршнем; $P_{\text{ЦРН}}$ – тиск між циліндром і розподільником; $P_{\text{PCЦ}}$ – тиск між зливним портом розподільника і циліндром.

Для побудови імітаційної моделі гідравлічної системи обрано компоненти із стандартної бібліотеки SimHydraulics та SimMechanic пакета Matlab/Simulink. Модель гідравлічної підсистеми зображена на рис. 6.

Як видно із схеми, модель складається з двох частин: механічної та гідравлічної. У механічній частині моделюється взаємодія сил, що діють при підйомі платформи будівельного принтера. Ця взаємодія відображується сукупністю пов’язаних між собою блока додаткової інерції та оберտального демпфера. Візуалізація значень механічних параметрів здійснюється з допомогою віртуальних датчиків швидкості обертання валу та датчиків оберտального моменту на валу. Блок додаткової інерції дає змогу імітувати дію оберտальної інерції, яка присутня в реальному прототипі будівельного 3D-принтера. З допомогою віртуальних датчиків

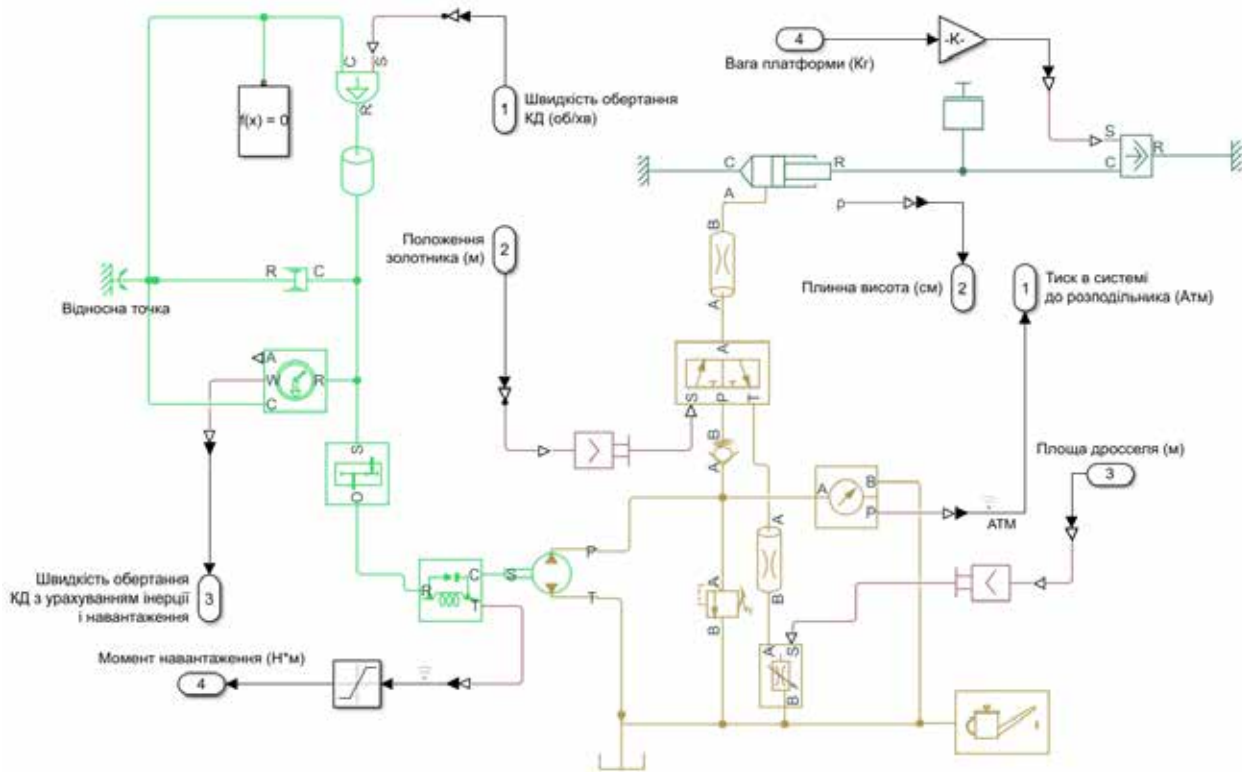


Рис. 6. Модель гідравлічної системи підйому платформи

швидкості та обертального моменту в моделі організовуються зв'язки та впливи, які необхідні для відтворення функціонування системи керування електроприводом. В свою чергу, при моделюванні процесів підйому платформи, враховується навантаження, що діє з боку гідравлічної частини у вигляді моментів опору, які треба подолати, щоб створити зусилля для переміщення платформи.

Гідравлічна частина складається з наступних блоків: гідравлічного насосу; гідропроводу, якій характеризується певним гідравлічним опором; перепускного клапану; 3х-позиційного розподільника; дроселю із змінною площею перерізу; давача тиску; джерела навантаження; резервуара з гідравлічною рідиною; зворотнього (запобіжного) клапану. Взаємодія механічної і гідравлічної частин відбувається в результаті обертання валу насоса, який створює тиск в гідросистемі. Розподілення потоків здійснюється з допомогою 3х-позиційного розподільника.

Специфікою функціонування діючого механізму підйому платформи принтера є обертання насоса тільки в одному напрямку, що створює тиск в гідравлічному потоку від резервуара до гідроциліндрів. Перевищення значення цього тиску над тиском у штоковій порожнині, який залежить від ваги платформи, дає змогу переміщувати телескопічні циліндри тільки вгору,

тобто таким чином ми можемо тільки збільшувати висоту підйому платформи. Зменшення висоти підйому платформи здійснюється за рахунок зменшення тиску робочої рідини, яка зворотнім потоком, у разі необхідності, спрямовується від гідроприводу до резервуару збору робочої рідини. Перенаправлення потоків між насосом та гідроциліндром здійснюється з допомогою згаданого 3х-позиційного гідророзподільника. Для запобігання попадання робочої рідини від гідроциліндру до насоса під час переключення розподільника, а також після зупинки платформи на необхідній висоті, в трубопроводі після насоса встановлюється зворотній клапан, який пропускає потік тільки в одному напрямку. Регулювання швидкості опускання платформи здійснюється з допомогою електромагнітного клапану, який дає змогу встановлювати необхідний тиск та зусилля переміщення шляхом відстежування витрат потоку робочої рідини. Значення витрат потоку робочої рідини у зливній магістралі буде залежати від режимів комутації електромагнітного клапану, які проходять відповідно до параметрів сигналів, що надходять від пристрою керування. Встановлення необхідного положення золотника гідророзподільника здійснюється керуванням величиною струму в обмотках соленоїда, енергія якого переміщує золотник.

Головною характеристикою контуру керування підйомом платформи будівельного 3D-принтера є динаміка відпрацювання заданих значень висоти підйому платформи. Випробування моделі здійснювалося шляхом зміни уставок заданої висоти. В моделі використані параметри крокового двигуна 86BYG250D. Задані вихідні дані: швидкість для КД, маса вантажу (100 кг), висота підйому (0,1 м). Динаміка відпрацювання заданого значення висоти підйому реєструвалась осцилографами, які представлені на рис. 7 та рис. 8.

Із осцилограм зміни заданої H_z та плинної висоти H_i видно, що окрім затягування у часі, процес переміщення супроводжується коливаннями тиску. В момент початку обертання валу насоса, тиск в системі різко зростає, оскільки для зрушення штоку гідроциліндра

необхідно подолати момент опору від навантаження.

Отримані результати моделювання дають змогу сформулювати вимоги до типів і параметрів регуляторів, які необхідні для зменшення інтенсивності коливань параметрів механізму підйому платформи та точності її позиціонування.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Основним результатом досліджень є підвищення точності позиціонування висоти платформи стріли будівельного 3D-принтера завдяки опрацюванню режимів роботи крокового двигуна у складі електроприводу гідравлічної системи підйому. Розроблена модель каналу керування позиціонуванням стріли будівельного 3D-принтера, досліджені алгоритми керування кроковим двигуном по зміні витрат

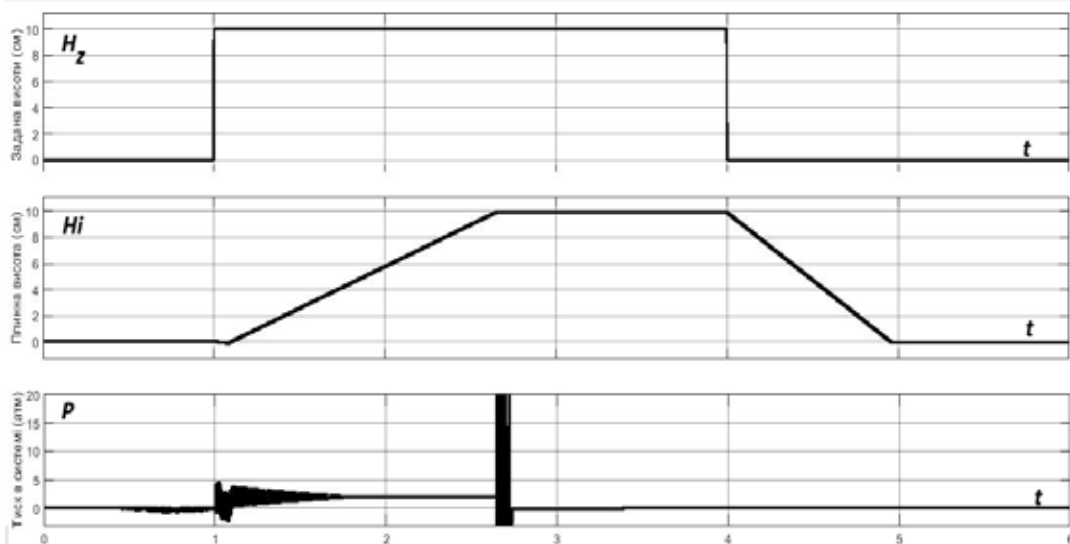


Рис. 7. Осцилограми зміни параметрів висоти та тиску в системі

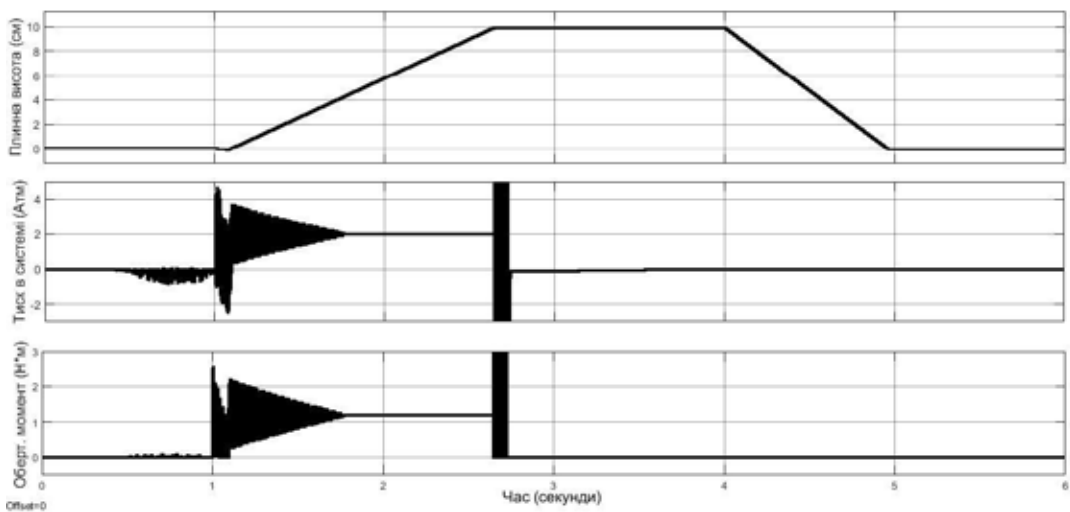


Рис. 8. Осцилограми зміни тиску і обертового моменту

робочого середовища, продуктивність і точність під час позиціонування платформи стріли. Модель дозволяє впровадити запропоновані методи моделювання для інших контурів керу-

вання об'єктом. Дані, отримані в ході моделювання, використані при розробці програмного забезпечення будівельного 3D-принтера радіального типу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Edenhofer S., Radler S., Hoss M., Von Mammen S. Self-organised construction with Revit. *IEEE 1st International Workshops on Foundations and Applications of Self-Systems. FAS-W 2016*. 2016. P. 160–161. DOI: 10.1109/FAS-W.2016.44.
2. Labonnote N., Ronnquist A., Manum B., Ruther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*. 2016. Vol. 72. P. 347–366. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.
3. Кулинченко Г.В., Багута В.А., Коробов А.Г. Оценка характеристик мехатронного модуля на базе шагового двигателя. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2013. № 51 (1024). С. 43–53.
4. Жданов А.В. Математическая модель распределителя позиционного гидропривода строительно-дорожных машин. *Омский научный вестник*. 2016. № 4 (148). С. 41–44.
5. Лekomtsev П.В., Никитин Ю.Р., Трефилов С.А. Моделирование гибридного шагового двигателя в пространстве состояний при переменном моменте сопротивления нагрузки. *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18, № 3. С. 58–63. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-58-63.
6. Репінський С.В., Козлов Л.Г., Паславська О.В., Мошноріз М.М., Бартецький А.А. Математична модель мехатронного гідроприводу маніпулятора з частотним керуванням асинхронного електродвигуна. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2019. Т. 9, № 1. С. 107–114. DOI: 10.31649/2413-4503-2019-9-1-107-114.
7. Дусанюк Ж.П., Петров О.В., Дерібо О.В., Черниш А.В. Математична модель та алгоритм дослідження динаміки гідроприводу ковша неповноповоротного екскаватора з урахуванням хвильових процесів в напірній гідролінії. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 3. С. 121–128. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2015_3_21.

REFERENCES:

1. Edenhofer, S., Radler, S., Hoss, M., Von Mammen, S. (2016). Self-organised construction with Revit. *IEEE 1st International Workshops on Foundations and Applications of Self-Systems. FAS-W 2016*, 160–161. DOI: 10.1109/FAS-W.2016.44.
2. Labonnote, N., Ronnquist, A., Manum, B., Ruther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347–366. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.
3. Kulichenko, H.V., Bahuta, V.A., Korobov, A.H. (2013). Otcenka kharakteristik mekhatronnogo modulja na baze shagovogo dvigatelja [Evaluation of the characteristics of a mechatronic module based on a stepper motor]. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of the NTU «KhPI»*, 51, 43–53 [in Russian].
4. Zhdanov, A.V. (2016). Matematicheskaia model raspredelitelja pozitcionnogo gidroprivoda stroitelno-dorozhnykh mashin [Mathematical model of the distributor of the positional hydraulic drive of road-building machines]. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 4 (148), 41–44 [in Russian].
5. Lekomtsev, P.V., Nikitin, Yu.R., Trefilov, S.A. (2020). Modelirovanie gibridnogo shagovogo dvigatelja v prostranstve sostoianii pri peremennom momente soprotivleniia nagruzki [Simulation of hybrid step motor by state space at variable torque of load]. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve – Intelligent systems in production*, 18 (3), 58–63 [in Russian]. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-58-63.
6. Repinskyi, S.V., Kozlov, L.H., Paslavaska, O.V., Moshnoriz, M.M., Bartetskyi, A.A. (2019). Matematychna model mekhatronnoho hidropyvodu manipuliatora z chastotnym keruvanniam asynkhronnoho elektrodvyhuna [Mathematical model of a mechatronic hydraulic actuator of a manipulator with frequency control of an asynchronous electric motor]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 9 (1), 107–114 [in Ukrainian]. DOI: 10.31649/2413-4503-2019-9-1-107-114.
7. Dusaniuk, Zh.P., Petrov, O.V., Deribo, O.V., Chernysh, A.V. (2015). Matematychna model ta alhorytm doslidzhennia dynamiky hidropyvodu kovsha nepovnopovorotnoho ekskavatora z urakhuvanniam khvylovykh protsesiv v napirni hidrolinii [Mathematical model and algorithm for studying dynamics of the hydraulic drive of part-turn excavator bucket taking into account wave processes in the pressure hydraulic line]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 2015, 3, 121–128 [in Ukrainian]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2015_3_21.