

УДК 62-932:62-53

РОЗРОБКА СТЕНДУ РОБОТИЗОВАНОГО ЕКСКАВАТОРА

К.т.н. О.Г. Гурко, Ю.О. Доля, К.В. Молчанов, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Розглянуто стенд екскаватора EO2621A з системою керування, у якій реалізовано основні результати попередніх досліджень авторів стосовно синтезу робастної системи автоматичного керування маніпулятором гідравлічного екскаватора. Наведено експериментальні дані, що підтверджують ефективність отриманих рішень.

Рассмотрен стенд экскаватора ЭО2621А с системой управления, в которой реализованы основные результаты предыдущих исследований авторов касательно синтеза робастной системы автоматического управления манипулятором гидравлического экскаватора. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность полученных решений.

A robotic excavator prototype based on an operational model of the excavator EO2621A with the control system is considered, in which the main results of the authors' previous research concerning the synthesis of the robust control system of a hydraulic excavator manipulator are realized. Experimental data that confirm the effectiveness of the obtained solutions are presented.

Ключові слова: екскаватор, маніпулятор, система керування, стенд, експериментальні дослідження

Вступ

Жодне будівництво не обходиться без земляних робіт, причому вимоги до якості та ефективності їх виконання постійно посилюються. Значна кількість цих робіт виконується гідравлічними екскаваторами (ЕГ). Відповідно до будівельних норм [1-3], допустимі відхилення від проектних відміток більшості земляних споруд по висотним відміткам поздовжнього профіля складає ± 5 см, по глибині кюветів $\pm 0,5$ см а відхилення поздовжнього ухилу дна деяких траншей не повинно перевищувати 0,01 см. В той же час, недобір ґрунту ЕГ в основі земляної споруди, що допускається нормативами, становить від 5 до 12 см в залежності від розмірної групи екскаватора [1, 3]. Однак, як показують експериментальні дослідження, на практиці недобори ґрунту можуть перевищувати 20 см і залежать не тільки від технічного стану машини та зовнішніх умов, а й від кваліфікації і психофізіологічного стану оператора. Тому після механізованої розробки ґрунту часто доводиться виконувати доопрацювання до проектної відмітки, тобто ручну зачистку земляної споруди, наприклад, перед укладанням бетону або залізобетону.

Для підвищення ефективності використання ЕГ необхідне поліпшення точності виконання робочого процесу копання та зниження енергетичних і часових витрат на його виконання. Рішення вказаної проблеми можливо лише за рахунок автоматизації робочого процесу та, відповідно, впровадження систем автоматизованого керування робочим процесом ЕГ (САКРПЕГ) та автоматичного керування маніпулятором

ЕГ (САКМЕГ) як складової САКРПЕГ, що допоможуть машиністу при виконанні робочого процесу або повністю візьмуть на себе функції керування ЕГ. Наявність САКРПЕГ та САКМЕГ, по суті, перетворює ЕГ у складну мехатронну систему та повинні стати невід'ємними частинами машини [4].

Аналіз публікацій та постановка задачі

Сучасна тенденція розвитку САК робочим процесом ЕГ пов'язана з їх роботизацією і, відповідно, застосуванням методів робототехніки з урахуванням особливостей робочого процесу екскаватора. Однією з фундаментальних робіт, в якій запропоновано робототехнічний підхід до автоматизації робочого процесу ЕГ є [5], де була розглянута динамічна модель роботизованого екскаватора. Цей підхід швидко став популярним і розвивається в цілому ряді досліджень. Зокрема, в [6 - 9] для керування маніпуляторами ЕГ запропоновано регулятори на основі ПІ/ПД та ПІД-законів.

У середині 1990-х широку відомість здобув проект університету Ланкастера (Великобританія) зі створення роботизованого екскаватора LUCIE (the Lancaster University Computerised Intelligent Excavator) [10, 11]. Перед екскаватором ставилися наступні завдання:

- здійснювати копання траншей в автоматичному режимі з високою якістю і гладкою підшоною;
- адаптуватися до різних типів ґрунту без втручання оператора;
- усувати перешкоди, що виникають при копанні, наприклад, валуни;
- екскаватор повинен бути автономним і не мати дротового зв'язку із зовнішніми комп'ютерами.

Роботи в рамках зазначеного проекту ведуться до теперішнього часу [8, 12].

В [6] запропоновано варіант системи керування виконавчими механізмами екскаватора EO4121. Система забезпечує два режими роботи:

- автоматичну стабілізацію швидкості виконавчих механізмів (її бажане значення задається оператором);
- програмне керування рухом РО за заданою оператором траєкторією.

Однак динамічна модель маніпулятора екскаватора лінеаризована і зведена до передаточних функцій, що не дозволяє досить точно описати нелінійні нестационарні процеси, що протікають в маніпуляторі при виконанні операцій робочого циклу. Крім того, запропоновані алгоритми керування засновані на застосуванні класичних ПІД-законів.

Аналіз результатів досліджень, присвячених автоматизації робочого процесу ЕГ, показує, що класичні закони не забезпечують задану якість керування в силу наявності в системі великої кількості невизначеностей, що пов'язані як з нестационарністю процесів в механічних і гідравлічних вузлах екскаватора, так і з

наявністю збурень, що викликані діями зовнішнього середовища, зокрема, ґрунту. Для підвищення якості керування в умовах невизначеності, наприклад, в роботі [13] розроблені адаптивні та робастні варіанти регуляторів з обчислювальним моментом, а в [14] розроблено нечіткий ПІ-регулятор з нечіткими правилами, що засновані на методі м'яких переключень. В [15] метод ковзаючого режиму спільно з нечіткою логікою застосовані для керування рухом маніпулятора ЕГ за заданою траєкторією. В [16] динамічний ковзаючий режим з алгоритмами на нечіткій логіці були застосовані для керування рухом маніпулятора ЕГ за заданою траєкторією. В [7] запропонована нейронна мережа в комбінації з ПД-регулятором для реалізації інтелектуального керування маніпулятором ЕГ.

В [8] запропоновані пропорційно-інтегральний-плюс (ПІП) регулятор і нелінійний ПІП регулятор на основі моделі зі змінною структурою.

Усі вказані методи керування маніпулятором ЕГ володіють як значними перевагами, так й недоліками. Зокрема, є істотні проблеми при підвищенні швидкості навчання / перенавчання нейронних мереж, а також у складанні експертами правил нечіткого виводу.

Провідні виробники екскаваторів проводять масштабні дослідження з розробки повністю автономного роботизованого екскаватора. Зокрема, у Komatsu на протязі декількох років діє проект «IES» (Intelligent Excavation System) [17, 18], а Volvo підтримує проект «Thor» (Terraforming Heavy Outdoor Robot) [19, 20].

У [21 - 23] автором даної роботи запропоновано САКМЕГ з робастним регулятором на основі гарантованого підходу для автоматичного керування процесом копання в умовах невизначеності. Результати моделювання показали, високу ефективність запропонованої системи. Зокрема, САКМЕГ забезпечує точність копання забою заданої конфігурації у межах 3,5% (до 1,2 см) в умовах невизначеності відносно параметрів ґрунту та шумів вимірювань кутів повороту ланок маніпулятора ЕГ.

Для перевірки адекватності одержаних рішень необхідно проведення відповідних експериментальних досліджень. Задачею даної роботи є розробка стенду екскаватора з запропованою в [21 - 23] САКМЕГ та порівняльний аналіз результатів моделювання та натурних експериментів.

Склад експериментального стенду

Для практичного підтвердження працездатності та ефективності запропонованих в ході робіт з розробки САКМЕГ рішень, створено діючу модель роботизованого екскаватора. В якості об'єкта керування використано маніпулятор стенду одноківшевого екскаватора EO2621A (рис. 1). Попереднє керування екскаваторним маніпулятором (поз. 1-3 на рис. 1) здійснювалося вручну за допомогою релейно-контакторної апаратури, що розташована в пульті 7, включення якої проводилося за допомогою важелів керування 8. В якості приводів 4,5,6 маніпулятора використовувалися електродвигуни УЛ-061-УХЛ4 120Вт і УЛ-042-28УХЛ4 60Вт, які можуть працювати на постійному і змінному струмі.

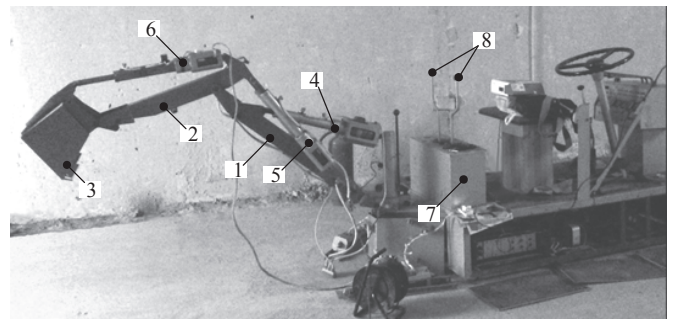


Рис. 1. Стенд одноківшевого екскаватора EO2621A: 1 – стріла; 2 – рукояті; 3 – ківш; 4, 5, 6 – приводи стріли, рукояті і ківша, відповідно; 7 – пульт керування екскаваторним маніпулятором; 8 – важелі керування маніпулятором

Морально і фізично застаріла керуюча апаратура стенду була замінена новою САКМЕГ. Вона являє собою сукупність вимірювального і керуючого обладнання, а також програмного забезпечення, в якому реалізовані основні результати, запропоновані в [21 - 23]. Принцип роботи системи полягає в керуванні маніпулятором в ручному і автоматичному режимах з контролем і коригуванням виконання робіт за допомогою аналізу даних, отриманих від мережі датчиків.

Система включає в себе (рис. 2):

- а) блок керування на основі мікропроцесорного пристрою (МПП) та ПЕОМ верхнього рівня;
- б) симісторно-релейний силовий блок з фазовим керуванням (рис. 3);
- в) органи керування (виконавчі приводи);
- г) мережу датчиків;
- д) для переходу на ручне керування маніпулятором передбачено підключення джойстиків.

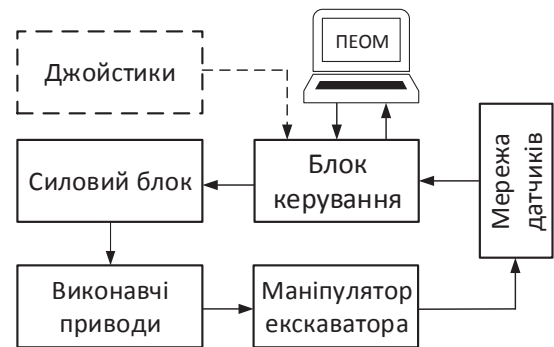


Рис. 2. Структура системи керування екскаватором EO2621A

У поточному варіанті стенду мережа датчиків складається з потенціометричних датчиків кутів повороту стріли, рукояті та ківша [24]. У подальшому, мережу датчиків планується розширити датчиками динамічних навантажень на маніпуляторі.

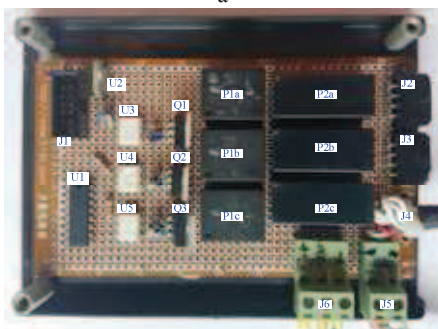
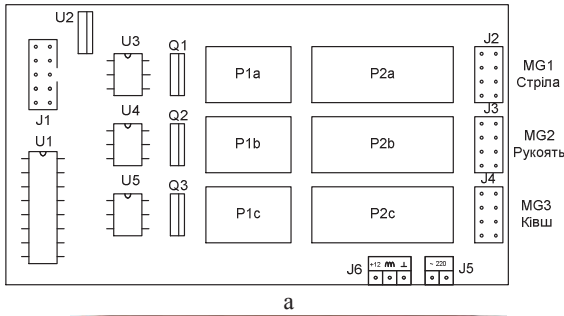
Апаратне забезпечення САКМЕГ стенду

Блок керування з базовою платою на основі мікроконтролера (МК) ATmega 8535 несе основне навантаження по обробці даних і включає інтерфейс введення-виведення для взаємодії з ПЕОМ та платами розширення, через які реалізується обмін і опитування датчиків.

Для використання можливості ручного керування маніпулятором екскаватора використано аналогові

джойстики, сигнали від яких надходять на аналогові входи мікроконтролера. Лівий джойстик, за стандартом ISO, відповідає за рух стріли, а правий – за рух рукояті і ківша.

На рис. 3 а: U1 –комутатор ULN2003APG; U2 – лінійний стабілізатор L7805CV; U3 - U5 – оптоізолятор MOC3052, Q1 - Q3 – симістори BTA 204, P1a - P1c – електромагнітні реле LEG-12, P2a – P2c – електромагнітні реле LMR2-12D; J1–J6 – роз'єми.



а – монтажна схема; б – зовнішній вигляд
Рис. 3. Силовий блок керування електроприводами ланок маніпулятора екскаватора

Швидкість обертання двигунів приводу ланок маніпулятора екскаватора регулюється зміною напруги на статорних і якірних обмотках, а напрямок обертання змінюється переключенням полярності якоря. Для обмеження переміщення лінійних двигунів на кожен з них встановлена пара кінцевих вимикачів, які розривають ланцюг живлення електродвигуна при досягненні крайніх положень. У залежності від напрямку переміщення, напруга живлення надходить через один з кінцевих вимикачів.

Схема з'єднання елементів електродвигунів приведена на рис. 4.

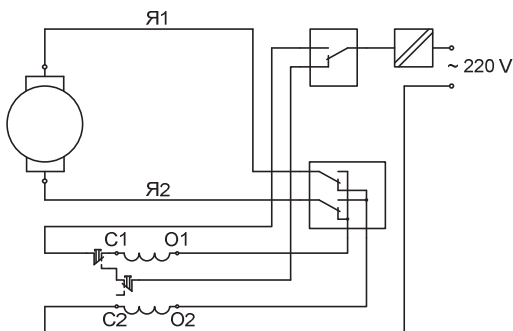


Рис. 4. Схема включення електродвигунів приводу ланок маніпулятора екскаватора

У вихідній комплектації стенду комутація здійснювалась за допомогою реле, яке вмикалось контакторами, що пов'язані з органами керування.

Симісторно-релейний силовий блок з фазовим керуванням

Одним із завдань при створенні системи була розробка регулятора для виконавчих електродвигунів, частота обертання якоря яких змінюється при зміні навантаження. Використання замість аналогового регулятора МК дозволило істотно поліпшити процес регулювання.

Електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням мають обмотку з невеликою кількістю витків товстого дроту, і при її послідовному включенні в ланцюг якоря струм у всьому ланцюзі буде однаковий. Регулювання обертів електродвигуна постійного струму з послідовно включеною обмоткою статора може здійснюватися двома способами:

а) підключенням паралельно статора регульовального пристрою, що змінює магнітний потік. Однак цей спосіб досить складний в реалізації;

б) регулюванням (зниженням) обертів за допомогою зменшення напруги; саме його застосовано при реалізації САКМЕГ.

При керуванні швидкістю електродвигуна з використанням фазового регулювання напруги, напруга передається не повністю, а частково. Це досягнуто використанням керованого випрямляча на основі симісторів (рис. 5). Випрямлення кожної напівхвилі синусоїдальної напруги живлення починається з регульованою затримкою θ , так званим кутом включення (рис. 6). Осцилограма на рис. 6,а відповідає найменшому куту включення, а осцилограми на рис. 6,б і в – збільшенню фазового кута включення. При цьому змінюється середнє значення вихідної напруги. Аналогічно здійснюється регулювання в керованих двохполуперіодних випрямлячах.

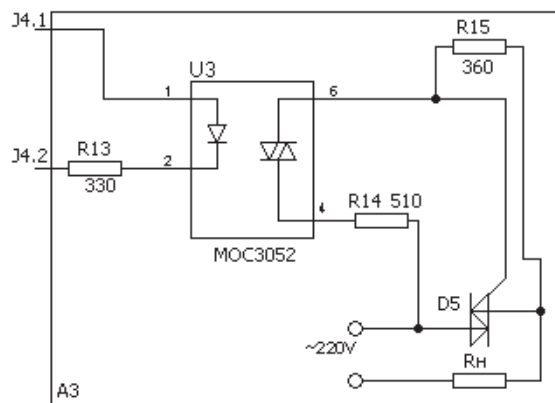


Рис. 5. Симісторний модуль керування навантаженням

Загальний вигляд силового блоку керування електроприводами наведено на рис. 3.

Для дослідження залежності середньої напруги керованого двухперіодного випрямляча від кута включення і визначення діапазону регулювання приводами, в пакеті MathCad побудована відповідна імітаційна модель випрямляча.

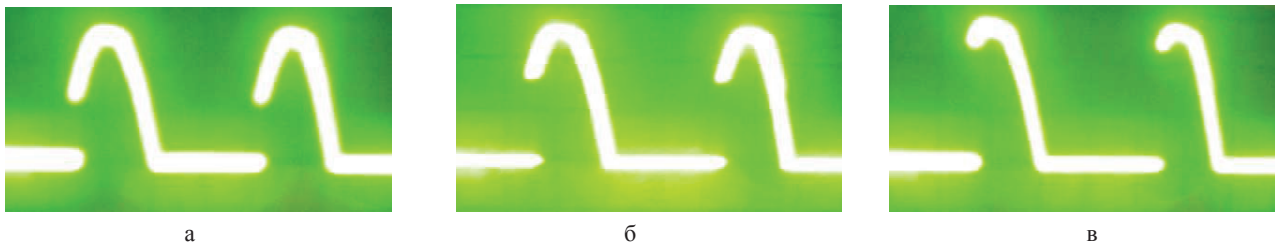
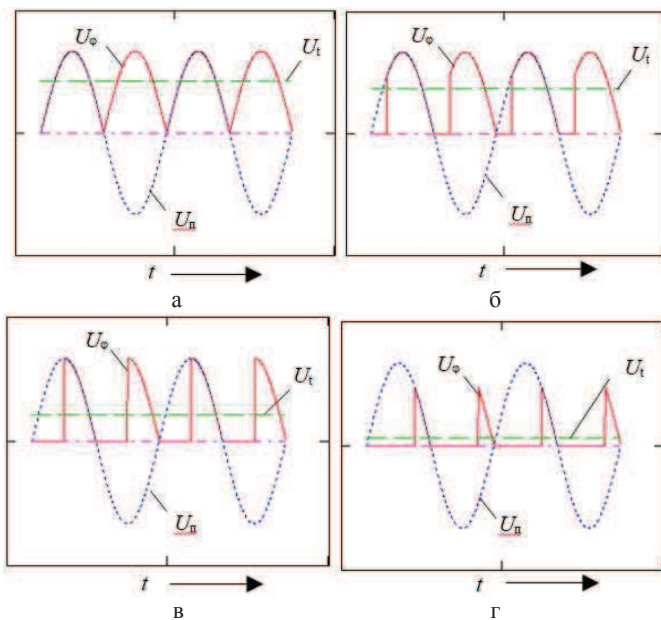


Рис. 6. Осцилограми напруг, що відображають зміну кута включення

На рис. 7 наведено вигляд випрямленої напруги для кутів затримки – 0° , 45° , 90° и 135° , а також рівень середньої напруги – 0,637; 0,542; 0,316 та 0,092 від значення напруги живлення U_n .

При збільшенні кута включення φ форма напруги U_φ починає сильно відрізнятися від синусоїдальної. Це призводить до появи великої кількості гармонік, що негативно позначається на роботі двигуна. Тому напруга на двигун подається через реактор – індуктивний фільтр, що згладжує пульсації напруги.



U_n – напруга живлення; U_φ – сигнал затримки U_t – випрямлена середня напруга; а – $t_0=0$ (0°), $U_t = 0,637$;
 б – $t_0=64$ (45°), $U_t = 0,542$; в – $t_0=128$ (90°), $U_t = 0,316$;
 г – $t_0=192$ (135°), $U_t = 0,092$

Рис. 7. Залежність випрямленої напруги від кутів затримки

Залежність середньої напруги U_{10} від кута φ включення $0 - \pi$ наведена на рис. 8. Тут кути включення $0 - 180^\circ$ представлені кодами $t_0^\circ = 0 \dots 255$. Аналіз цього рисунка показує, що достатньою лінійністю для побудови автоматичних регуляторів є діапазон кодів $t_0^\circ = 64 \dots 192$, що відповідає кутам включення $45^\circ \dots 135^\circ$ – діапазон в 90° , де рівень середньої напруги змінюється від $0,542U_n$ до $0,092U_n$. Враховуючи, що напівперіод напруги живлення U_n з частотою 50 Гц становить 10^3 мкс, кожному коду t_0 , куту φ можна поставити у відповідність значення часових затримок T_0 .

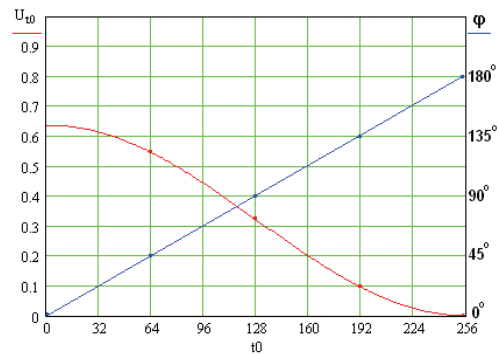


Рис. 8. Залежність середньої напруги від кута затримки включення

Результати експериментальних досліджень моделі САКМЕГ

При проведенні експериментальних досліджень використано запропонований в [25] протокол обміну між ПЕОМ та МПП, що полягає у синхронному (точніше, майже синхронному, беручи до уваги особливості опитування МПП портів) зчитуванні та аналогово-цифровому перетворенні даних з усіх датчиків з подальшою послідовною передачею отриманих даних до ПЕОМ. Це дозволило підвищити якість керування маніпулятором екскаватора за рахунок зменшення області невизначеності стану системи керування. Функції попередньої обробки показань датчиків виконувалися засобами МПП.

Керування маніпулятором екскаватора здійснювалося в умовах невизначеності щодо масово-інерційних параметрів маніпулятора, значення яких визначено приблизно виходячи з геометричних розмірів маніпулятора та товщини сталі. Результати роботи САКМЕГ наведені на рис. 9, 10 та показують її високу ефективність. Зокрема, середньоквадратичні значення помилок відпрацювання кутів повороту ланок маніпулятора екскаватора для кожного моменту дискретизації за часом (рис. 10 д), що одержані в результаті проведення серії з 20 опитів, не перевищують $0,5$ градусів. Це призводить до того, що максимальне значення помилки відпрацювання траєкторії руху ківша не перевищує $1,5$ см (рис. 9, в). Одержані результати добре корелюються з результатами моделювання (до $1,2$ см) та відповідають показникам, які забезпечуються системами провідних виробників систем керування екскаваторами ($1 \div 2$ см).

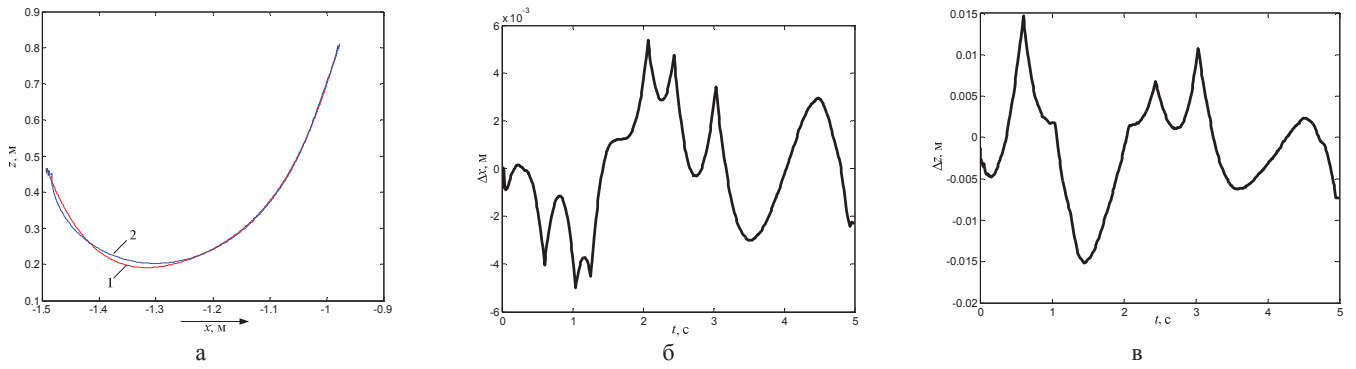


Рис. 9. Проходження ківшем заданої траєкторії: а – бажана (1) та дійсна (2) траєкторії ківшу; б – помилка Δx відпрацювання траєкторії по осі x ; в – помилка Δz відпрацювання траєкторії по осі z

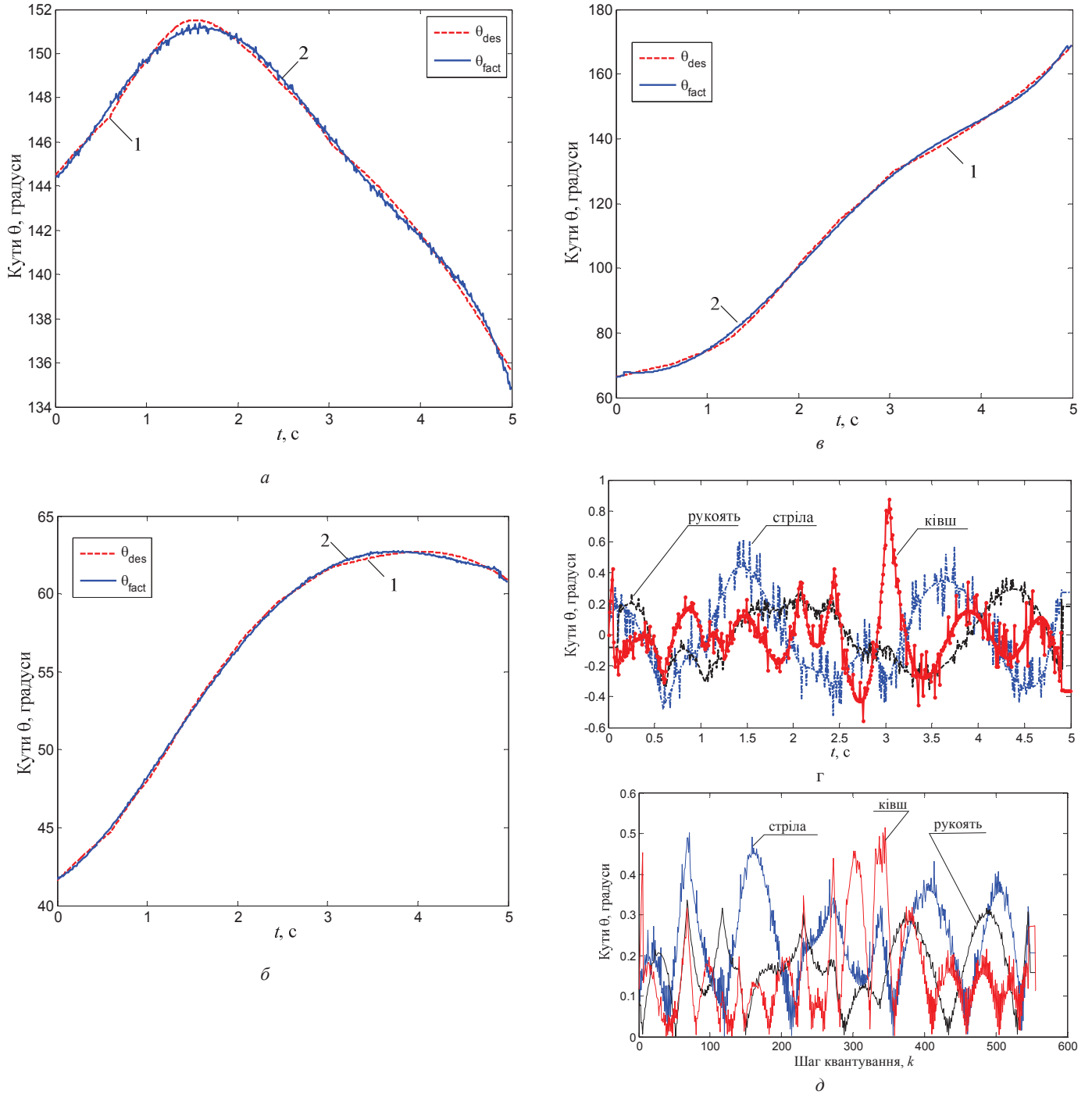


Рис. 10. Результати дослідження роботи стенду з САКМЕГ: а, б, в – бажані (1) та дійсні (2) закони зміни приєднаних координат стріли, рукояті та ківшу, відповідно, при одному з опитів; г – абсолютні похибки відпрацювання приєднаних координат при одному з опитів; д – середньквдратичне відхилення дійсних вимірних значень приєднаних координат від бажаних

Висновки

З метою підтвердження ефективності отриманих у попередніх дослідженнях результатів, вони реалізовані в САК маніпулятора стенду екскаватора EO2621A.

В результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що запропонована система автоматичного керування маніпулятором екскаватора забезпечує стеження ківша за заданою траєкторією в умовах невизначеності з точністю до 1,5 см, що добре узгоджується з результатами моделювання (до 1,2 см) і відповідає заявленій точності існуючих світових розробок (1–2 см), проте, на відміну від існуючих, виконує робочий процес в автоматичному режимі.

Запропонований стенд є проміжним варіантом. У подальшому планується його модернізація за рахунок розвитку мережі датчиків та удосконалення алгоритмів керування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Дегтярєв А.П. Комплексная механизация земляных работ./ А.П. Дегтярєв, А.К. Рейш, С.И. Руденский [и др.] – М.: Стройиздат, 1987. – 335 с.
2. Настанова з будівництва, монтажу та контролю якості трубопроводів зовнішніх мереж водопостачання та каналізації: ДСТУ-Н Б В.2.5-68:2012. – К.: Мінрегіон України, 2013. – 74 с.
3. Настанова щодо проведення земляних робіт та улаштування основ і спорудження фундаментів ДСТУ-Н Б В.2.1-28:2013. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 88 с.
4. Гурко О.Г. Структурна модель системи керування робочим процесом екскаватора [Текст] / О.Г. Гурко // Автомобільний транспорт. – 2016. – Вып. 39. – С. 33–38.
5. Vaha P.K. Excavator dynamics and effect of soil on digging / P.K. Vaha, A.J. Koivo, M.J. Skibiniewski // Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. – 1991. – P. 297–306.
6. Дуданов И.В. Автоматизация исполнительных систем гидравлического экскаватора: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)» / И.В. Дуданов. – Самара, 2008. – 16 с.
7. Dai Q. L. Electro-Hydraulic Servo Control Based on CMAC Neural Network for Excavating Robot / Q. L. Dai, H. L. Dai, X. H. Qu // Applied Mechanics and Materials. – 2010. - V. 34-35. - P. 825-830.
8. Gu J. Improved control of intelligent excavator using proportional-integral-plus gain scheduling // J. Gu, D. J. Seward // Journal of Central South University. – 2012 – V. 19 – № 2. – P. 384-392. doi:10.1007/s11771-012-1016-3
9. Hoan Le Quang. Study on modeling and control of excavator / Le Quang Hoan, Chan Se Jeong et al // Proceedings of the 28th ISARC, Seoul, Korea. – 2011. – P. 969-974.
10. Seward D. LUCIE the Robot Excavator-Design for System Safety / D. Seward, F. Margrave, I. Sommerville, R. Morrey // Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1996. – V.1. – P. 963-968.
11. Bradley D. A. The development, control and operation of an autonomous robotic excavator / D. A. Bradley, D. W. Seward // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 1998. – V. 21. – №. 1. – P. 73-97. DOI:10.1023/A:1007932011161
12. Gu J. Proportional-Integral-Plus Control of an Intelligent Excavator / J. Gu, J. Taylor., D. Seward // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2004. – V. 19. – №. 1. – P. 16-27.
13. Yu H. Review of Modelling and Remote Control for Excavators / H. Yu, Y. Liu, M.S. Hasan // International Journal of Advanced Mechatronic Systems. – 2010. – V.2. – No 1. – P. 68-80.
14. Bo L. High Performance Control of Hydraulic Excavator Based on Fuzzy-PI Soft-Switch Controller / L. Bo, Y. Jun, G. Gang, Z. Yonghua, L. Wenxing // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering. – 2011. – V. 2. – P. 676-679.
15. Zhang J. 4-DOF Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control of Excavator / J. Zhang, K. Liu, J. Lin, X. Ma, W. Yu // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2010. – V. 46. – No 21. – 87-92.
16. Choi J. Tracking Control of Hydraulic Excavator Using Time Varying Sliding Mode Controller with Fuzzy System / J. Choi // Advanced Science Letters. – 2012. – V.15. – No 1. – P. 78-82.
17. Seo J. Task planner design for an automated excavation system / J. Seo, S. Lee, J. Kim, S. K. Kim // Automation in Construction. – 2011. – Vol. 20. – N. 7. – P. 954-966.
18. Shimano Y. Development of PC210LCi-10/PC200i-10 Machine Control Hydraulic Excavator / Y. Shimano, Y. Kami, K. Shimokaze // Komatsu Technical Report. 2014. – Vol.60. – No.167.
19. Schmidt D. Simulation and Control of an Autonomous Bucket Excavator for Landscaping Tasks / D. Schmidt, M. Proetzsch, K. Berns // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation Anchorage Convention District Anchorage, Alaska, USA, May 3-8, 2010. – P. 55108-5113
20. Schmidt D. Behavior-based Collision Avoidance using a Cylinder-Coordinate Octree / D. Schmidt, F. Göckel, K. Berns // Proceedings of the 14th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-14), 2016, July 3-7, Shanghai, China. – 12 p.
21. Sergiyenko O.Yu. Optimal Kinematic Control of a Robotic Excavator with Laser TVS feedback/O.Yu. Sergiyenko, D.Hernandez-Balbuena, A.G.Gurko et al. // Proc. of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, Austria, 10 – 14 November, 2013. – P 4239-4244.
22. Gurko A. Trajectory Tracking Control of an Excavator Arm Using Guaranteed Cost Control [Text] / A. Gurko, O. Sergiyenko, Juan Ivan Nieto Hipolito, et al // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2016. – V. 383. – P. 177-196.
23. Gurko A. Guaranteed Control of a Robotic Excavator During Digging Process [Text] / A. Gurko, O.Yu .Sergiyenko, et al // Proceeding of 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics [ICINCO 2015], (Colmar, France, 21–23 July, 2015). – SciTePress, 2015. – Vol. 2. – P. 52–59.
24. Гурко А.Г. Выбор датчика положения рабочего оборудования экскаватора / А.Г.Гурко, А.П. Плахтеев, П.А. Плахтеев // Автомобильный транспорт. – 2014. – Выпуск 35. – С. 72–79.
25. Гурко А.Г. Повышение точности оценки состояния динамических объектов комплексом MATLAB-Arduino при проектировании кибер-физических систем А.Г. Гурко, А.П. Плахтеев, П.А. Плахеев // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2016 – №1. – С. 84–91.