

Д. О. Лозінський, канд. техн. наук, доц.; О. А. Сиротін

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ РОБОТИ З ПАСИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Електрогідравлічні системи відіграють ключову роль у сучасному промисловому обладнанні, забезпечуючи високу точність позиціонування (до $\pm 0,01$ мм), значні зусилля (до кількох МН) та швидкодію (до 2 м/с) в широкому спектрі застосувань. Вони є складовою технологічних та мобільних машин, оскільки мають ряд суттєвих переваг над іншими видами приводів. Оскільки дозволяють виконувати досить точні позиціонування та працювати зі значними навантаженнями за відносно невеликих габаритів самої системи. Теоретичні дослідження моделі електрогідравлічних систем на базі імітаційного чи математичного моделювання не завжди адекватно описують їх поведінку в реальних умовах експлуатації, в тому числі і під час роботи із пасивним навантаженням. Це пов'язано з наявністю нелінійностей, варіабельністю параметрів робочої рідини, впливом температурних факторів та інших збурюючих чинників, які складно врахувати в математичних моделях, а також наявністю певних спрощень, які застосовуються під час теоретичного моделювання. Експериментальні дослідження залишаються найбільш достовірним способом визначення реальних характеристик електрогідравлічних систем та верифікації теоретичних розробок.

В роботі розглянуто концепцію експериментального стенду для дослідження статичних і динамічних характеристик електрогідравлічних систем під час роботи з пасивним навантаженням. Описана структура стенду передбачає можливість фізичного моделювання робочих процесів в електрогідравлічних системах з різними типами пасивного навантаження та реєстрацію параметрів процесів за допомогою сучасної вимірювальної апаратури. Експериментальний стенд призначений для верифікації математичних моделей електрогідравлічних систем, оптимізації параметрів систем управління, дослідження граничних режимів роботи та розробки рекомендацій щодо проєктування електрогідравлічних приводів для конкретних застосувань з пасивним навантаженням.

Ключові слова: електрогідравлічна система, пасивне навантаження, експериментальний стенд, характеристики гідроприводу, моделювання робочих процесів.

Вступ

Електрогідравлічні системи відіграють ключову роль у сучасному промисловому обладнанні, забезпечуючи високу точність позиціонування (до $\pm 0,01$ мм), значні зусилля (до кількох МН) та швидкодію (до 2 м/с) в широкому спектрі застосувань. Особливої уваги заслуговують системи, що працюють з пасивним навантаженням, оскільки такі режими роботи характерні для 60 – 70 % технологічних процесів у машинобудуванні, металургії, авіаційній та космічній промисловості, а також в робототехніці та медичному обладнанні.

Дослідження характеристик електрогідравлічних систем під час роботи з пасивним навантаженням є актуальним науково-технічним завданням, що зумовлено необхідністю підвищення ефективності (збільшення ККД на 15 – 20 %), надійності (зменшення аварійності на 25 – 30 %) та точності функціонування гідравлічного обладнання. Пасивне навантаження створює специфічні умови роботи системи, при яких виникають особливості в динамічних характеристиках, енергетичних показниках та стабільності керування.

Основні проблеми, що виникають під час роботи з пасивним навантаженням:

- нелінійність статичних характеристик внаслідок змінного навантаження;
- коливальність перехідних процесів через низьку демпфуючу здатність системи;

- енергетичні втрати під час роботи з гравітаційним навантаженням;
- складність забезпечення стабільності за змінних параметрів навантаження.

Аналіз літературних джерел показує, що наявні теоретичні моделі електрогідравлічних систем не завжди адекватно описують їх поведінку в реальних умовах експлуатації з пасивним навантаженням. Це пов'язано з наявністю нелінійностей, варіабельністю параметрів робочої рідини (в'язкість змінюється в 5 – 10 разів за зміни температури від -20°C до $+80^{\circ}\text{C}$), впливом температурних факторів та інших збурюючих чинників, які складно врахувати в математичних моделях.

Експериментальні дослідження залишаються найбільш достовірним способом визначення реальних характеристик електрогідравлічних систем та верифікації теоретичних розробок. Однак для отримання якісних експериментальних даних необхідне створення спеціалізованих випробувальних стендів, що дозволяють відтворювати різноманітні режими роботи з пасивним навантаженням та забезпечують точні вимірювання основних параметрів системи..

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання дослідження характеристик електрогідравлічних систем розглядалися в роботах багатьох вітчизняних та зарубіжних науковців. Фундаментальні основи теорії гідроприводу та гідропневмоавтоматики [1], де детально розглянуто принципи функціонування гідравлічних систем та особливості їх проєктування. Подальший розвиток теорії ефективного керування гідроприводами мобільних машин [2], який запропонував комплексний підхід до оптимізації параметрів гідравлічних систем з урахуванням специфіки їх застосування в мобільному обладнанні.

У роботі [3] проаналізували теоретичні основи та практичні аспекти застосування гідравлічних систем з пропорційним управлінням. Дослідження показали, що пропорційні розподільники забезпечують високу точність управління витратою робочої рідини, проте мають певні обмеження під час роботи з пасивним навантаженням. Питання практичного застосування гідравлічних розподільників в мобільних машинах детально розглянуто З. Я. Лур'є та В. М. Александровим [4], які встановили, що характеристики розподільників суттєво впливають на динамічні властивості всієї гідравлічної системи.

Особливої уваги заслуговують зарубіжні дослідження в галузі експериментального вивчення електрогідравлічних систем з пасивним навантаженням [5]. Проведено комплексні експериментальні дослідження електрогідравлічних систем під час роботи з пасивним навантаженням та встановили, що характер навантаження суттєво впливає на стабільність системи управління. Робота показала необхідність врахування специфіки пасивного навантаження під час налагодження регуляторів системи.

У дослідженнях, присвячених вивченню динамічних характеристик електрогідравлічних систем та розробці методів їх експериментального визначення [6] запропоновано методики оцінки якості перехідних процесів та критерії оптимізації параметрів систем управління.

Теоретичні аспекти моделювання та управління гідравлічними приводами в умовах пасивного навантаження розглянуто в роботі [7]. Їх математичні моделі враховують нелінійності, властиві гідравлічним системам, та дозволяють прогнозувати поведінку системи в різних режимах роботи. Проте верифікація цих моделей потребує проведення детальних експериментальних досліджень.

Сучасні тенденції розвитку систем збору даних та аналого-цифрових перетворювачів для дослідження гідравлічних систем активно досліджуються в останніх роботах зарубіжних науковців.

У роботі [8] детально проаналізовано вимоги до високошвидкісних систем збору даних для тестування гідравлічних систем. Автори встановили, що для адекватного відтворення швидкоплинних процесів у гідравліці необхідна частота дискретизації не менше 10 кГц під

час дослідження ударних явищ та кавітації. Дослідження показало, що використання 24-бітних АЦП з частотою дискретизації до 1 МГц дозволяє виявляти високочастотні коливання тиску амплітудою до 0,1 % від номінального значення, що критично важливо для діагностики стану гідравлічних компонентів. Автори також обґрунтували необхідність застосування антиаліазингових фільтрів з частотою зрізу на рівні 40 % від частоти дискретизації для запобігання спотворенню сигналу.

В наступній роботі [9] проведено комплексне порівняння різних типів аналого-цифрових перетворювачів для застосування в промислових системах автоматизації, включаючи гідравлічні приводи. Їх дослідження показало, що сигма-дельта АЦП забезпечують найкращу точність (до 0,01 %) під час вимірювання повільно змінних сигналів, таких як тиск в гідросистемах, однак мають обмежену швидкодію (до 100 Гц). Натомість, конвеєрні АЦП, хоча і мають нижчу роздільну здатність (12 – 16 біт), забезпечують високу швидкість перетворення (до 10 МГц), що робить їх придатними для дослідження перехідних процесів у швидкодіючих електрогідравлічних системах. Автори рекомендують використання гібридних систем з комбінацією різних типів АЦП залежно від характеру досліджуваних процесів.

В роботі [10] автори зосередились на розробці передових методик вимірювання в системах гідроприводу, особливо в контексті Industry 4.0. Вони запропонували концепцію "розумних" систем збору даних, які використовують машинне навчання для автоматичної оптимізації параметрів дискретизації залежно від характеру процесу. Їх експериментальні дослідження показали, що застосування адаптивної частоти дискретизації дозволяє зменшити об'єм даних на 60 – 70 % без втрати інформативності. Крім того, автори розробили методики цифрової обробки сигналів для виділення корисної інформації з зашумлених даних, що особливо актуально під час дослідження гідравлічних систем в умовах промислових заводів.

Узагальнюючи результати цих досліджень, можна констатувати, що сучасні високошвидкісні АЦП з високою роздільною здатністю дозволяють отримувати детальну інформацію про динамічні процеси в електрогідравлічних системах, включаючи швидкоплинні перехідні явища, високочастотні коливання та нелінійні ефекти, які раніше були недоступні для експериментального дослідження.

Незважаючи на значну кількість теоретичних та експериментальних досліджень, недостатньо вивченими залишаються питання комплексного впливу характеру пасивного навантаження на динамічні процеси в електрогідравлічних системах, методи оптимізації параметрів систем управління для забезпечення стабільної роботи за змінних навантажень, енергетичні аспекти роботи електрогідравлічних систем з пасивним навантаженням та методики експериментального визначення граничних режимів роботи.

Мета і завдання статті

Метою цієї роботи є огляд експериментального стану для комплексного дослідження статичних і динамічних характеристик електрогідравлічних систем під час роботи з різними типами пасивного навантаження, а також перевірка адекватності математичних моделей таких систем [7].

Завдання дослідження включають розробку структурної схеми експериментального стану з можливістю імітації різних типів пасивного навантаження, створення системи високоточного вимірювання параметрів електрогідравлічної системи, розробку програмного забезпечення для автоматизації експериментів та обробки даних. Крім того, необхідно провести експериментальні дослідження характеристик системи при різних типах навантаження, виконати верифікацію математичних моделей на основі експериментальних даних та розробити рекомендації щодо оптимізації параметрів електрогідравлічних систем.

Розробка експериментального стенду

На Рис. 1 представлена принципова схема розробленого експериментального стенду для дослідження характеристик електрогідравлічних систем з пасивним навантаженням.

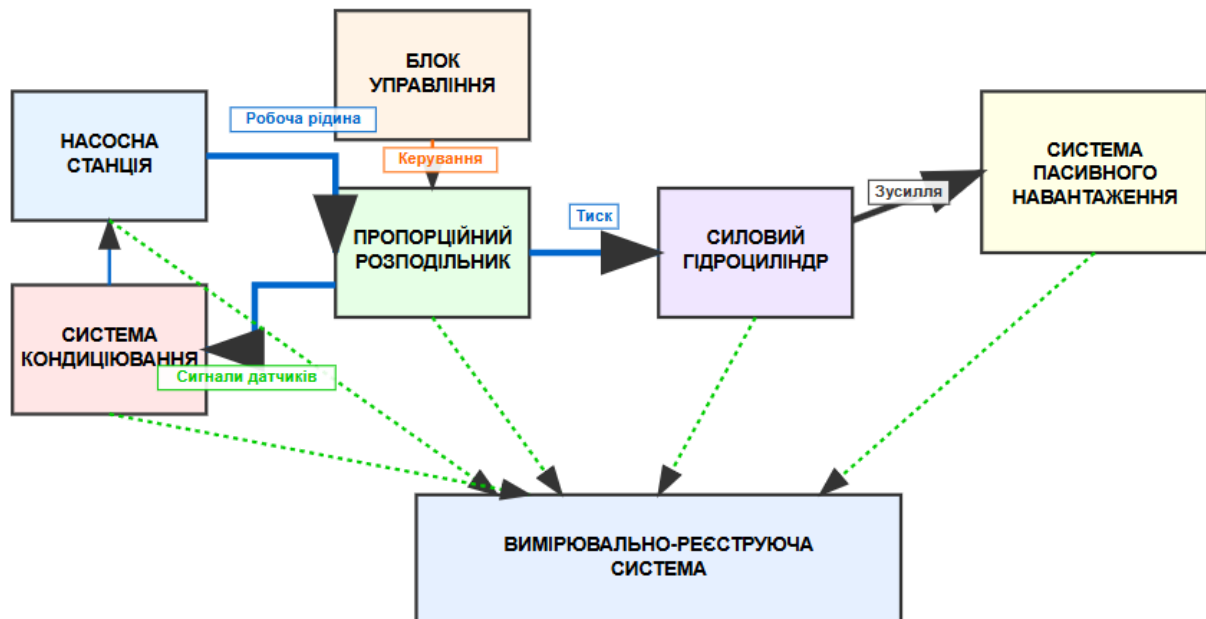


Рис. 1. Принципова схема експериментального стенду

Основними вузлами стенду є:

- електрогідравлічна система управління з пропорційним розподільником;
- система імітації пасивного навантаження;
- силовий гідроциліндр з датчиками положення;
- насосна станція з регулюванням тиску;
- система кондиціювання робочої рідини;
- вимірювально-реєструюча апаратура.

Електрогідравлічна система управління включає пропорційний електрогідравлічний розподільник Р з електронним блоком управління БУ. Розподільник забезпечує плавне регулювання витрати робочої рідини пропорційно вхідному електричному сигналу в діапазоні від 0 до 10 В.

Система імітації пасивного навантаження реалізована за допомогою важільної системи з набором змінних вантажів $B_1, B_2, \dots, B_n$. Важіль Важ кріпиться до штока силового гідроциліндра Ц через шарнірне з'єднання, що дозволяє змінювати плече прикладення навантаження та його величину.

Для імітації різних типів пасивного навантаження передбачено:

- постійне гравітаційне навантаження (вантажі);
- пружне навантаження (пружинний блок ПБ);
- в'язке навантаження (регульований дросель Др).

Силовий гідроциліндр Ц двосторонньої дії має ефективну площу поршня $F_p = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, ефективну площу штокової порожнини $F_{ш} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ та хід штока 500 мм. Циліндр обладнаний індуктивними датчиками положення Д1 та швидкості Д2.

Насосна станція включає регульований аксіально-поршневий насос Н з робочим об'ємом $q = 45 \text{ см}^3/\text{об}$, електродвигун потужністю 15 кВт, гідроаккумулятор Га об'ємом 5 л та предохранний клапан КП, налаштований на тиск 16 МПа.

Система кондиціювання робочої рідини містить бак Б об'ємом 200 л, фільтр Ф тонкого

очищення, теплообмінник ТО з примусовим повітряним охолодженням та датчик температури Дт.

Аналого-цифрові перетворювачі для систем збору даних

Одним з найважливіших компонентів експериментального стенду є система збору даних, яка базується на високоточних аналого-цифрових перетворювачах (АЦП). Для забезпечення достовірності експериментальних досліджень в таблиці 1 було проведено аналіз різних типів АЦП та їх програмного забезпечення.

Таблиця 1

Аналіз різних типів АЦП та їх програмного забезпечення

Тип АЦП	Переваги	Недоліки
National Instruments CompactDAQ	висока точність (до 24 біт); частота дискретизації до 2 МГц на канал; широкий вибір модулів вводу/виводу; інтеграція з LabVIEW; гальванічна розв'язка між каналами.	висока вартість; складність налаштування для початківців; прив'язка до програмного забезпечення NI.
Advantech USB-4718	доступна ціна; простота підключення через USB; частота дискретизації до 200 кГц; підтримка різних операційних систем; програмні бібліотеки для різних мов програмування.	обмежена кількість каналів; нижча точність порівняно з професійними системами; відсутність гальванічної розв'язки.
Measurement Computing USB-1608G	швидкість до 250 кС/с; вбудоване калібрування; компактний форм-фактор; програмне забезпечення DAQami.	обмежений діапазон вхідних напруг; залежність від USB-живлення.

Для цього експериментального стенду було обрано систему National Instruments CompactDAQ через її високу точність та можливості синхронного збору даних з множини каналів. Система включає:

- шасі cDAQ-9178 з 8 слотами;
- модулі NI-9205 для аналогових входів (32 канали, 16 біт, 250 кС/с);
- модулі NI-9263 для аналогових виходів (4 канали, 16 біт);
- модулі NI-9401 для цифрових входів/виходів.

Програмне забезпечення розроблено в середовищі LabVIEW, що забезпечує:

- реальний час відображення параметрів;
- автоматичне збереження даних;
- обробку сигналів та фільтрацію;
- синхронізацію з системою управління.

Вимірювально-реєструюча апаратура включає:

- тензометричні датчики тиску Д3, Д4, Д5 (діапазон 0 – 25 МПа, точність $\pm 0,25\%$);
- індуктивні датчики переміщення Д1 (діапазон 0 – 500 мм, точність $\pm 0,1$ мм);
- датчик швидкості Д2 (діапазон 0 – 200 мм/с);
- силоміри С1, С2 для вимірювання зусиль в важільній системі;
- багатоканальний аналого-цифровий перетворювач АЦП;
- персональний комп'ютер з програмним забезпеченням для збору та обробки даних.

Принцип роботи стенду полягає в наступному. Електронний блок управління БУ формує керуючий сигнал для пропорційного розподільника Р відповідно до заданої програми експерименту. Розподільник регулює подачу робочої рідини до робочих порожнин

гідроциліндра Ц, забезпечуючи переміщення штока з заданою швидкістю та зусиллям.

Пасивне навантаження створюється важільною системою з вантажами, що створює постійне або змінне за законом зусилля, яке протидіє руху штока циліндра. Характер навантаження може змінюватися від чисто інерційного до комбінованого.

В процесі експерименту здійснюється синхронна реєстрація всіх параметрів системи з частотою дискретизації до 1000 Гц, що дозволяє детально аналізувати як статичні, так і динамічні процеси.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє:

- задавати різні типи керуючих сигналів (ступінчасті, синусоїдальні, лінійно наростаючі);
- в реальному часі відображати всі вимірювані параметри;
- зберігати експериментальні дані для подальшої обробки;
- проводити математичну обробку результатів та їх порівняння з теоретичними розрахунками.

У таблиці 2 показана типова осцилограма, отримана з системи збору даних CompactDAQ під час дослідження перехідних процесів в електрогідравлічній системі з пасивним навантаженням. Експеримент проводився за наступних параметрів: маса пасивного навантаження $m = 200$ кг, тиск живлення $P_{ж} = 10$ МПа, частота дискретизації 1000 Гц.

Таблиця 2

Типова осцилограма, отримана з системи збору даних CompactDAQ під час дослідження перехідних процесів в електрогідравлічній системі з пасивним навантаженням

Час, с	Тиск П1, МПа	Тиск П2, МПа	Положення, мм	Швидкість, мм/с
0,000	0,00	0,00	0,0	0,0
0,001	0,15	0,02	0,1	2,5
0,002	0,32	0,05	0,3	5,8
0,005	0,85	0,12	1,2	15,2
0,010	1,65	0,25	3,5	32,8
0,020	3,25	0,48	8,9	58,5
0,050	7,85	1,15	28,5	82,3
0,100	9,95	1,85	65,8	85,1
0,200	10,00	1,92	132,5	84,8
0,500	10,00	1,92	285,0	85,0
0,800	10,00	1,92	425,2	85,0

З отриманих даних видно, що система має час перехідного процесу $t_p \approx 0,8$ с при досягненні усталеної швидкості $v = 85$ мм/с. Максимальний тиск в робочій порожнині досягає 10 МПа, що відповідає налаштуванню системи живлення.

Для перевірки адекватності математичної моделі проведено серію експериментів за різних значень пасивного навантаження та тиску живлення. Порівняння експериментальних і теоретичних результатів показало розбіжність не більше 8 % для статичних характеристик та 15 % для динамічних процесів.

Висновки

1. Запропоновано експериментальний стенд для дослідження характеристик електрогідравлічних систем під час роботи з пасивним навантаженням, який дозволяє імітувати різні типи навантаження та досліджувати поведінку системи в широкому діапазоні параметрів.

2. Проведено аналіз сучасних аналого-цифрових перетворювачів для систем збору даних. Обрано систему National Instruments CompactDAQ, яка забезпечує високу точність вимірювання параметрів (тиск $\pm 0,25$ %, переміщення $\pm 0,1$ мм) та синхронну реєстрацію всіх характеристик процесу з частотою до 1000 Гц.

3. Розроблено програмне забезпечення в середовищі LabVIEW для автоматизації

експериментів, реального часу відображення параметрів та обробки експериментальних даних.

4. Проведені експерименти підтвердили адекватність розробленої математичної моделі електрогідравлічної системи з пасивним навантаженням з точністю до 15 % для динамічних процесів.

5. Запропонований стенд може бути використаний для оптимізації параметрів електрогідравлічних систем, налагодження систем управління та навчального процесу під час підготовки фахівців з гідропневмоавтоматики.

Перспективи подальших досліджень включають розширення функціональних можливостей стенду для дослідження систем з активним навантаженням та розробку методик експериментального визначення оптимальних параметрів налагодження систем управління.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Буренніков Ю. А., Немировський І. А., Козлов Л. Г. Гідравліка, гідро та пневмоприводи : навчальний посібник. Вінниця, ВНТУ, 2013. 273 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Burenikov_2013_273.pdf.
2. Козлов Л. Г. Наукові основи розробки систем гідроприводів маніпуляторів з адаптивними регуляторами на основі нейромереж для мобільних робочих машин : дисертація. Київ, 2015. 421 с. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=NaUDeTkAAAAJ&citation_for_view=NaUDeTkAAAAJ:bFIZQPDJZMC.
3. Лозінський Д. О., Піонткевич О. В., Сиротін О. А. Інноваційні підходи до підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем : вісник ВНТУ, 2025. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/49406>.
4. Піонткевич О. В. Підвищення ефективності багаторежимного гідроприводу фронтального навантажувача : дисертація. Київ, НТТУ «КПІ», 2019. 249 с.
5. Гідравліка, гідро та пневмоприводи, гідропневмоавтоматика : лабораторний практикум / Ю. А. Буренніков та ін. Вінниця, ВНТУ, 2016. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/10203>.
6. An experimental study of the dual-loop control of electro-hydraulic load simulator (EHLs) / C. Wang et al. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2013. Vol. 26, №6. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936113002021>.
7. A Self-Contained Electro-Hydraulic Cylinder with Passive Load-Holding Capability / D. Padovani et al. 2019. Vol. 12, № 2. P. 292. DOI:10.3390/en12020292. URL: https://www.researchgate.net/publication/330484029_A_Self-Contained_Electro-Hydraulic_Cylinder_with_Passive_Load-Holding_Capability.
8. Karpenko M., Sepehri N. Electrohydraulic force control design of a hardware-in-the-loop load emulator using a nonlinear QFT technique. *Control Engineering Practice*. 2012. Vol. 20, №6. P. 598–609. URL: https://www.academia.edu/69207841/Electrohydraulic_force_control_design_of_a_hardware_in_the_loop_load_emulator_using_a_nonlinear_QFT_technique.
9. Design of a Low-Cost Measurement Module for the Acquisition of Analogue Voltage Signals / S. Glowinski et al. *Electronics*. 2023. Vol. 12, № 3. P. 610. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/3/610>.
10. Belcher R. A. ADC standard IEC 60748-4-3: precision measurement of alternative ENOB without a sine wave. *Research gate*. 2015. P. 6–10. DOI: 10.1109/TIM.2015.2450296. URL: https://www.researchgate.net/publication/280554573_ADC_standard_IEC_60748-4-3_precision_measurement_of_alternative_ENOB_without_a_sine_wave.
11. Zhao W. A Novel Control Design for Realizing Passive Load-Holding Function on a Two-Motor-Two-Pump Motor-Controlled Hydraulic Cylinder. *Research gate*. 2023. Vol. 44, № 3. P. 125–139. DOI:10.4173/mic.2023.3.3. URL: https://www.researchgate.net/publication/374309705_A_Novel_Control_Design_for_Realizing_Passive_Load-Holding_Function_on_a_Two-Motor-Two-Pump_Motor-Controlled_Hydraulic_Cylinder.
12. Dell'Amico A. Design and Implementation of a Hardware-in-the-Loop Air Load Simulation System for Testing Aerospace Actuators. *MDPI*. 2024. Vol. 13, № 7. P. 238. DOI: 10.3390/act13070238. URL: <https://www.mdpi.com/2076-0825/13/7/238>.
13. Omar M., El-kassaby M. M., Abdelghaffar W. A universal suspension test rig for electrohydraulic active and passive automotive suspension system. *Alexandria Engineering Journal*. 2017. Vol. 56, № 4. P. 359–370. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016817300273>.

Стаття надійшла до редакції 26.06.2025.

Стаття пройшла рецензування 16.10.2025.

Лозінський Дмитро Олександрович – канд. техн. наук, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування, e-mail: lozinskiy_dmitriy@vntu.edu.ua.

Сиротін Олексій Андрійович – аспірант кафедри технологій та автоматизації машинобудування.
Вінницький національний технічний університет.