

УДК 621.65

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

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ

В Україні переважна більшість машин, що використовують гідравлічні системи керування для виконання виробничих задач, оснащена морально застарілим обладнанням. Енергетична характеристика таких гідравлічних систем не відповідає вимогам енергоощадності впродовж їх роботи, що не припустимо із дорожчанням енергоресурсів. Аналіз сучасних гідравлічних та електрогідравлічних систем керування з метою покращення енергетичної характеристики є актуальним напрямком досліджень.

У статті представлено аналітичний огляд сучасних підходів до підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем для різних машин. Проаналізовано інноваційні архітектури, включаючи гідравлічно-електричну архітектуру, децентралізовані електрогідравлічні приводи головного руху, компактні електрогідравлічні приводи та технічні рішення з пасивною фіксацією навантаження. Проаналізовано впроваджені технології цифрової гідравліки як перспективний напрямок розвитку енергоефективних електрогідравлічних систем. Зазначено основні тенденції та перспективні напрямки досліджень у різних галузях з використанням електрогідравлічних приводів. Встановлено, що комбінування електронних і гідравлічних компонентів разом із впровадженням передових алгоритмів керування та конструктивних рішень дозволяє значно підвищити енергоефективність машин, які працюють з морально застарілою гідравлічною системою керування, зберігаючи їх переваги щодо забезпечення високих силових характеристик.

В результаті окреслено основні напрямки розробки інноваційної архітектури машин з гідроприводом. Обґрунтовано впровадження технологій цифрової гідравліки, децентралізованих приводів, створення систем з пасивною фіксацією навантаження та оптимізації алгоритмів керування. Наведено перспективні напрямки подальших досліджень електрогідравлічних систем для підвищення показників їх енергоефективності.

Ключові слова: електрогідравлічні системи, енергоефективність, децентралізовані приводи, цифрова гідравліка, пасивна фіксація навантаження.

Вступ

Гідравлічні системи традиційно використовуються в галузях, де потрібні високі силові характеристики та надійність, зокрема в промисловості, будівництві та сільському господарстві. Проте класичні гідросистеми характеризуються відносно низькою енергоефективністю, що стає все більш критичним фактором в умовах сучасних вимог до енергозбереження та екологічності [1, 2, 3]. Втрати енергії в традиційних гідравлічних системах можуть сягати 50 – 70 % від загальної споживаної потужності, що призводить до надмірного споживання енергії, підвищеного тепловиділення та необхідності використання габаритних систем охолодження [4, 5].

Постановка проблеми

У контексті глобальних викликів щодо зменшення викидів парникових газів та економії енергоресурсів підвищення енергоефективності гідравлічних систем стає першочерговим завданням як для наукової спільноти, так і для промисловості. Інтеграція електронних компонентів та передових алгоритмів керування в гідравлічні системи дозволяє створювати гібридні електрогідравлічні рішення, що поєднують переваги обох технологій [6, 7, 8]. Цей підхід відкриває широкі можливості для розробки енергоефективних систем [9, 10], що зберігають силові характеристики гідравліки, але мають суттєво вищий коефіцієнт корисної дії.

Актуальність досліджень у цій галузі підтверджується зростаючою кількістю наукових публікацій, присвячених різним аспектам підвищення енергоефективності

Наукові праці ВНТУ, 2025, № 2

електрогідравлічних систем, включаючи розробку нових архітектур, впровадження децентралізованих приводів, використання технології цифрової гідравліки та створення інноваційних рішень для пасивної фіксації навантаження [11, 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем активно досліджується науковцями з різних країн. Серед ключових напрямків досліджень можна виділити кілька основних.

Дослідники з Університету Міннесоти запропонували інноваційну гібридну гідравлічно-електричну архітектуру (Hybrid Hydraulic-Electric Architecture, ННЕА) для мобільних машин [1]. Їх дослідження спрямоване на подолання обмежень традиційних гідравлічних систем щодо енергоефективності при збереженні високих силових характеристик. Запропонована архітектура поєднує гідравлічну потужність та електричну потужність таким чином, що основна частина потужності передається гідравлічно, а електричні приводи використовуються для модуляції цієї потужності. Дослідження продемонстрували потенціал зменшення споживання енергії на 50-80% порівняно з комерційними системами керування навантаженням.

Питання децентралізації гідравлічних систем як методу підвищення їх енергоефективності досліджено в роботі [2]. Автори провели детальне експериментальне порівняння енергоефективності між пропорційними та прямо керованими гідравлічними системами, демонструючи значний потенціал для економії енергії при використанні децентралізованих рішень з керуванням за потребою (power-on-demand).

Розглянемо новий концепт компактного та енергоефективного електрогідравлічного приводу [4]. Запропоноване рішення орієнтоване на оптимізацію енергоспоживання при збереженні компактних розмірів, що є важливим фактором для мобільних машин.

Автори роботи [6] зосереджуються на впровадженні технологій «цифрової» гідравліки як перспективному напрямку для створення енергоефективних систем з можливістю фіксації навантаження. Їх дослідження демонструє, що цифрові гідравлічні компоненти можуть значно зменшити втрати енергії порівняно з традиційними аналоговими рішеннями.

У праці [11] запропоновано автономний електрогідравлічний циліндр з можливістю фіксації пасивного навантаження (рис. 1), що дозволяє значно зменшити споживання енергії в режимі утримання положення. Система працює в чотирьох квадрантах, включає пасивні пристрої для утримання навантаження, може рекуперувати енергію, має герметичний резервуар і підходить для рівнів потужності щонайменше до 80 кВт. Це рішення має особливу цінність для машин, де тривале утримання навантаження є типовою операцією.

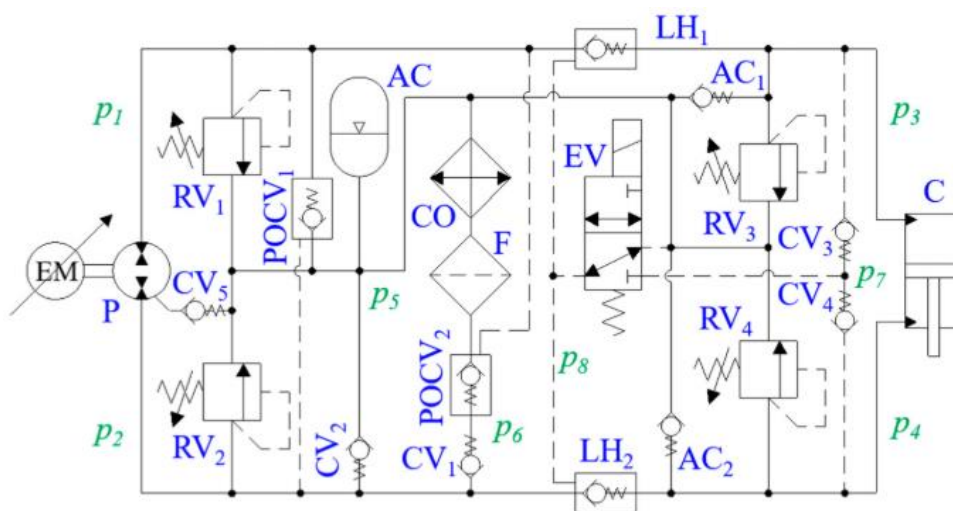


Рис. 1. Автономний циліндр

Автори праці [7] провели комплексний аналіз енергоефективних електрогідравлічних систем для стаціонарних і мобільних машин, розглянули різні підходи до підвищення енергоефективності та визначили їх переваги та обмеження для різних сценаріїв використання.

Авторами роботи [12] запропоновано нові підходи до проектування гідравлічних систем з використанням методів оптимізації для мінімізації енергетичних втрат. Авторами роботи [13] розроблено адаптивні алгоритми керування для електрогідравлічних систем, що дозволяють оптимізувати енергоспоживання в реальному часі залежно від робочих умов.

Незважаючи на значний прогрес у розробці енергоефективних електрогідравлічних систем, існує ряд невирішених проблем, що потребують подальших досліджень:

- відсутність систематизованого порівняльного аналізу різних підходів до підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем у різних умовах експлуатації;
- недостатньо досліджено питання інтеграції різних технологій (наприклад, поєднання децентралізованих приводів з цифровою гідравлікою) для досягнення максимальної енергоефективності;
- потребують більш глибокого вивчення методи оптимізації алгоритмів керування для адаптації до змінних робочих умов і забезпечення максимальної енергоефективності в різних режимах роботи;
- існує потреба в розробці універсальних методик оцінки енергоефективності електрогідравлічних систем, що дозволили б об'єктивно порівнювати різні рішення;
- недостатньо досліджено економічну ефективність впровадження інноваційних електрогідравлічних систем з урахуванням не лише прямої економії енергії, але й інших факторів, таких як зменшення вартості обслуговування, збільшення терміну експлуатації та підвищення надійності.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є комплексний аналіз сучасних підходів до підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем на основі аналізу актуальних наукових публікацій. Для досягнення цієї мети поставлено наступні завдання:

- систематизувати та класифікувати основні напрямки досліджень у галузі енергоефективних електрогідравлічних систем;
- виконати порівняльний аналіз електрогідравлічних систем різної архітектури з погляду на їх енергоефективності;
- дослідити роль цифрової гідравліки у підвищенні енергоефективності гідравлічних систем;
- проаналізувати технології фіксації пасивного навантаження як засобу зменшення енергоспоживання;
- визначити перспективні напрямки подальших досліджень у галузі енергоефективних електрогідравлічних систем.

Основні напрямки підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем

На основі аналізу наукових публікацій можна виділити кілька ключових напрямків підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем:

- розробка електрогідравлічних систем з інноваційними архітектурами;
- децентралізація гідравлічних приводів;
- впровадження технології цифрової гідравліки;
- розробка систем з пасивною фіксацією навантаження;
- оптимізація алгоритмів керування [14].

Одним з перспективних підходів щодо підвищення енергоефективності є розробка електрогідравлічних систем з нових архітектур. Прикладом такого підходу є ННЕА, запропонована дослідниками з Університету Міннесоти [1]. Ця архітектура дозволяє забезпечити швидкий та ефективний привід за рахунок оптимального поєднання гідравлічних

і електричних компонентів. В таблиці 1 представлено порівняння ключових параметрів традиційної гідравлічної системи та ННЕА.

Основна ідея ННЕА полягає у використанні множинних загальних рейкових систем тиску для передачі основної частини потужності та малих електричних машин для модуляції цієї потужності. Це дозволяє забезпечити більш ефективне перетворення енергії порівняно з традиційними системами. Автори демонструють, що запропонована архітектура здатна забезпечити зменшення енергоспоживання на 50-80% порівняно з комерційними системами керування навантаженням, а потужність електричних машин може бути зменшена на 85% порівняно з традиційним підходом.

Таблиця 1

Порівняння традиційної гідравлічної системи та ННЕА

Параметр	Традиційна гідравлічна система	ННЕА
Загальний коефіцієнт корисної дії	30 – 40 %	70 – 85 %
Точність позиціонування	0,5 – 1,0 мм	<0,1 мм
Тривалість перехідного процесу	0,5 – 0,8 с	<0,2 с
Можливість рекуперації енергії	Обмежена або відсутня	Висока
Енергоспоживання	100 %	20 – 50 %
Складність керування	Середня	Висока
Вартість	100 %	120 – 130 %

В роботі [4] запропоновано інноваційну концепцію проектування компактного електрогідравлічного актуатора (ЕНА). Автори представили рішення, яке поєднує переваги гідравлічних систем з можливостями електричного керування. Запропонована конструкція дозволяє створити компактний актуатор з покращеними енергетичними характеристиками, що є особливо важливим для мобільних машин, де вага та габарити мають критичне значення.

В праці [13] розроблено архітектуру з використанням електрогідравлічних актуаторів з регенерацією енергії. Їхня система здатна накопичувати енергію під час гальмування чи опускання вантажу та використовувати її при наступних циклах роботи, що суттєво підвищує загальну енергоефективність.

Традиційні гідравлічні системи часто мають централізовану архітектуру, де один насос забезпечує тиск для кількох виконавчих механізмів. Це призводить до значних втрат енергії під час дроселювання потоку для регулювання швидкості окремих механізмів. Альтернативним підходом є децентралізація гідравлічних приводів, коли кожен виконавчий механізм оснащується власним насосом з електричним приводом.

Дослідження потенціалу децентралізованих електрогідравлічних приводів для підвищення енергоефективності [2] продемонстрували, що системи прямого керування (DDH - Direct Driven Hydraulic) з повністю навантаженим циліндром мають ефективність 28%, тоді як пропорційні електрогідравлічні системи досягають лише 4% ефективності. Значно вища енергоефективність DDH систем пояснюється використанням принципу подачі потужності за потребою, що дозволяє уникнути втрат на дроселювання та забезпечити більш точне керування потужністю відповідно до потреб кожного механізму.

Дослідження [7] також підтверджує переваги децентралізації для стаціонарних і мобільних машин. Автори зазначають, що децентралізовані системи особливо ефективні для машин з періодичним режимом роботи, де традиційні системи мають значні втрати енергії в режимі очікування.

Цифрова гідравліка представляє собою сучасний підхід для гідравлічних систем, що полягає у використанні дискретних компонентів (насосів, клапанів) замість традиційних аналогових. Цей підхід має значний потенціал для підвищення енергоефективності гідравлічних систем.

Авторами роботи [6] проведено дослідження застосування цифрової гідравліки для створення енергоефективних систем фіксації навантаження. Вони продемонстрували, що використання цифрових клапанів дозволяє зменшити втрати енергії на 40 – 50 % порівняно з традиційними рішеннями. Особливо ефективною цифрова гідравліка виявляється в режимах з частими зупинками та утриманням положення.

В роботі [2] продемонстровано, що системи з прямим керуванням забезпечують суттєво вищу енергоефективність порівняно з традиційними пропорційними системами завдяки принципу подачі потужності за потребою, що може бути використано в комбінації з іншими підходами для максимізації енергоефективності.

Для багатьох гідравлічних систем значна частина енергії витрачається на утримання навантаження в заданому положенні. Традиційні системи потребують постійного підтримання тиску для забезпечення фіксації, що призводить до суттєвих втрат енергії. Альтернативним підходом є використання систем з пасивною фіксацією навантаження, які не потребують постійного енергоспоживання в режимі утримання.

Запропоновано автономний електрогідравлічний циліндр з можливістю пасивної фіксації навантаження [11]. Їхня система використовує спеціальний гідравлічний замок, що механічно блокує рух циліндра після досягнення заданого положення. Це дозволяє повністю виключити енергоспоживання в режимі утримання, що особливо важливо для машин з тривалими періодами фіксації положення.

Після дослідження різних технологій фіксації навантаження з використанням цифрової гідравліки [6], було запропоновано гібридну систему, що поєднує пасивні механічні блокувальні елементи з цифровими клапанами для точного позиціонування. Така комбінація дозволяє досягти високої точності позиціонування з мінімальним енергоспоживанням.

Значний потенціал для підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем має оптимізація алгоритмів керування. Сучасні підходи включають використання прогнозованих моделей, адаптивних алгоритмів та методів машинного навчання для оптимізації роботи системи в реальному часі.

Розробка адаптивних алгоритмів керування для електрогідравлічних систем [13], дозволяє оптимізувати енергоспоживання в залежності від робочих умов. Підхід базується на прогнозуванні навантаження та відповідному регулюванні параметрів системи для мінімізації енергетичних втрат.

Використання моделей прогнозованого керування для оптимізації енергоспоживання електрогідравлічних систем у мобільних машинах [12] продемонстрували, що такий підхід дозволяє досягти до 30 % додаткової економії енергії порівняно з традиційними алгоритмами керування.

Порівняльний аналіз підходів до підвищення енергоефективності

Для об'єктивного порівняння різних підходів до підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем [15] необхідно враховувати не лише потенційну економію енергії, але й інші фактори, такі як складність реалізації, вартість, надійність та придатність для різних машин [16, 17, 18].

В таблиці 2 представлено порівняльний аналіз розглянутих підходів за кількома ключовими параметрами. Причому, кожен підхід має свої переваги та обмеження. Наприклад, інноваційні архітектури, такі як ННЕА [1], або багатоприводна система [19], забезпечують найвищу потенційну економію енергії, але мають високу складність реалізації та вартість. Системи з пасивною фіксацією навантаження [11] надзвичайно ефективні в режимі утримання, але мають обмежений потенціал для підвищення ефективності в динамічних режимах [20, 21].

Децентралізовані приводи [2, 7] демонструють збалансовані характеристики за всіма параметрами і мають високу придатність для мобільних машин. Цифрова гідравліка [6, 12] пропонує значний потенціал для економії енергії, але має високу складність реалізації та вартість.

Оптимізація алгоритмів керування [7, 13] забезпечує найнижчу потенційну економію енергії серед розглянутих підходів, але має низьку вартість реалізації та може бути відносно легко інтегрована в наявні системи, що робить цей підхід привабливим для модернізації наявного обладнання.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз підходів до підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем

Підхід	Економія енергії	Складність реалізації	Вартість	Надійність	Мобільність
Інноваційні архітектури (ННЕА)	50 – 80 %	Висока	Висока	Середня	Середня
Децентралізовані приводи	40 – 60 %	Середня	Середня	Висока	Висока
Цифрова гідравліка	40 – 50 %	Висока	Висока	Середня	Висока
Пасивна фіксація навантаження	70 – 100 % (в режимі утримання)	Низька	Низька	Висока	Висока
Оптимізація алгоритмів керування	20 – 30 %	Середня	Низька	Висока	Висока

Інтеграція різних підходів для максимізації енергоефективності

Для досягнення максимальної енергоефективності електрогідравлічних систем доцільно розглядати комбінування різних підходів. Аналіз публікацій показує, що найбільший потенціал має інтеграція наступних технологій:

- поєднання децентралізованих приводів з пасивною фіксацією навантаження – дозволяє забезпечити високу ефективність як у динамічних режимах, так і в режимі утримання положення;
- інтеграція цифрової гідравліки з оптимізованими алгоритмами керування – забезпечує гнучкість керування та мінімізацію втрат енергії в різних режимах роботи;
- використання інноваційних архітектур (наприклад, ННЕА) з пасивною фіксацією навантаження – дозволяє максимізувати енергоефективність у всьому робочому діапазоні.

В роботі [7] продемонстровано, що комбінування децентралізованих приводів з оптимізованими алгоритмами керування дозволяє досягти до 70 % економії енергії порівняно з традиційними системами. Автори праці [6] показують, що інтеграція цифрової гідравліки з системами пасивної фіксації навантаження забезпечує близьку до 100 % ефективність у режимах з тривалим утриманням об'єкту в заданому положенні та до 50 % економії енергії в динамічних режимах.

Важливим аспектом інтеграції різних підходів є забезпечення оптимального балансу між енергоефективністю, складністю системи та її вартістю. Для кожної конкретної машини цей баланс може бути різним, що вимагає індивідуального підходу до проєктування електрогідравлічних систем.

Висновки

Проведений аналіз сучасних підходів до підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем дозволяє зробити висновки, що сучасні дослідження спрямовані

на суттєве підвищення їх енергоефективності при збереженні переваг гідравліки щодо забезпечення високих силових характеристик.

Основними напрямками досліджень є розробка інноваційних архітектур, децентралізація приводів, впровадження технології цифрової гідравліки, створення систем з пасивною фіксацією навантаження та оптимізація алгоритмів керування.

Гібридна гідравлічно-електрична архітектура (HNEA) демонструє високий потенціал для підвищення енергоефективності (50 - 80% економії енергії), але має високу складність реалізації та вартість. Децентралізовані електрогідравлічні приводи забезпечують баланс між підвищенням ефективності (40 - 60 %) та складністю реалізації, що робить їх привабливими для широкого спектру застосувань.

Цифрова гідравліка є перспективним напрямком розвитку енергоефективних систем, особливо в поєднанні з оптимізованими алгоритмами керування. Технології пасивної фіксації навантаження забезпечують максимальну ефективність у режимах з тривалим утриманням положення, що особливо важливо для багатьох промислових машин.

Інтеграція різних підходів дозволяє досягти максимальної енергоефективності електрогідравлічних систем у всьому діапазоні робочих режимів. Найбільший потенціал має комбінування децентралізованих приводів з пасивною фіксацією навантаження та оптимізованими алгоритмами керування.

Перспективними напрямками подальших досліджень у галузі енергоефективних електрогідравлічних систем є:

- розробка методів оптимізації електрогідравлічних систем з урахуванням комплексу параметрів, включаючи енергоефективність, вартість, надійність та екологічність;
- дослідження можливостей інтеграції технологій відновлюваної енергетики з електрогідравлічними системами для створення енергонезалежних рішень;
- розробка адаптивних систем керування на основі методів машинного навчання для оптимізації енергоспоживання електрогідравлічних систем в реальному часі з урахуванням змінних робочих умов;
- дослідження можливостей використання нових матеріалів та технологій виробництва для підвищення енергоефективності компонентів електрогідравлічних систем;
- розробка стандартизованих методик оцінки енергоефективності електрогідравлічних систем, що дозволять об'єктивно порівнювати різні рішення та стимулюватимуть впровадження найбільш ефективних технологій.

Реалізація зазначених напрямків досліджень сприятиме подальшому підвищенню енергоефективності електрогідравлічних систем, що має важливе значення для зменшення енергоспоживання та екологічного впливу промислового обладнання та мобільних машин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Li P. Hybrid Hydraulic-Electric Architecture (HNEA) for Mobile Machines: Final Report. *OSTI.GOV*. 2022. DOI: 10.2172/1878730. URL: <https://www.osti.gov/biblio/1878730>.
2. Zhang Sh., Minav T., Pietola M. Improving Efficiency of Micro Excavator With Decentralized Hydraulics. *Fluid Power Systems Technology*, V001T01A069. 2017. 8 p. DOI: 10.1115/FPMC2017-4341.
3. Березюк О. В. Огляд конструкцій машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 1. С. 3–8.
4. Altare G., Vacca A., Richter C. A Design Solution for Efficient and Compact Electro-hydraulic Actuators. *Procedia Engineering*. Vol. 106. 2015. P. 8–16. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.003. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815009285>.
5. Поліщук Л. К., Піонткевич О. В., Коваль О. О. Аналіз впливу параметрів системи керування на динамічні процеси гідропривода стрічкового конвеєра. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2016. № 2 (52). С. 37–47.
6. Digital hydraulic valves: Advancements in research / Sciatti F. et al. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, № 5. e27264. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27264. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402403295X>.
7. Rydberg K. Energy Efficient Hydraulics – System Solutions for Minimizing Losses. *The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power*. 2013. Vol. 3-5. P. 479-490. URL: https://www.researchgate.net/publication/293333078_Energy_Efficient_Hydraulics_-_System_Solutions_for_Minimizing_Losses.
8. Березюк О. В. Науково-технічні основи проектування приводів робочих органів машин для збирання та

первинної переробки твердих побутових відходів: автореф. дис. д-ра техн. наук. Хмельницький, 2021. 46 с.

9. Піонткевич О. В. Підвищення ефективності багаторежимного гідроприводу фронтального навантажувача : дис. ... кандидата техн. наук : 05.02.02 / Київ, 2019. 249 с.

10. Лозінський Д. О. Пропорційний електрогідрравлічний розподільник з незалежним керуванням потоків для мобільних машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08. Вінниця, 2010. 20 с.

11. A Self-Contained Electro-Hydraulic Cylinder with Passive Load-Holding Capability / L. Schmidt et al. *Energies*. 2019. Vol. 12, № 2. P. 292. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/2/292>.

12. Heybroek K., Sjöberg J. Model Predictive Control of a Digital Hydraulic Actuator System. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2018. P. 844–849.

13. Energy Saving in Electro-Hydraulic System Using Adaptive Neuro-Fuzzy Controller / Sinthipsomboon K. et al. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 278-280. P. 1451-1456. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.278-280.1451. URL: <https://www.scientific.net/AMM.278-280.1451>.

14. Оптимізація електрогідрравлічного розподільника з незалежним керуванням потоків / Д. О. Лозінський, та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*, 2023. №17 (1). С. 87–91. DOI: 10.31649/2413-4503-2023-17-1-87-91.

15. Kogler H., Scheidl R. Energy Efficient Linear Drive Axis Using a Hydraulic Switching Converter. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2016. Vol. 138, № 9. P. 091010. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=de&user=dFYRUKIAAAAJ&citation_for_view=dFYRUKIAAAAJ:roLk4NBRz8UC.

16. Дослідження системи керування пропорційним електрогідрравлічним розподільником / Д. О. Лозінський та ін.. *Наукові праці ВНТУ*. 2011 №2. URL: http://www.nbu.gov.ua/ejournals/vntu/2011_2/2011-2.files/uk/12dolped_ua.pdf.

17. Піонткевич О. В. Вплив параметрів системи керування гідроприводом мобільної робочої машини на динамічні характеристики. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. № 2 (4). С. 68–76.

18. Березюк О. В. Математичне моделювання динаміки гідроприводу робочих органів завантаження твердих побутових відходів у сміттєвози. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2009. № 4. С. 81–86.

19. Busquets E., Ivantysynova M. A Multi-Actuator Displacement-Controlled System with Pump Switching – A Study of the Architecture and Actuator-Level Control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2016. Vol. 138, № 10. P. 101002.

20. Поліщук Л. К. Динаміка вмонтованого гідроприводу конвеєрів мобільних машин : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2018. 240 с.

21. Application of hydraulic automation equipment for the efficiency enhancement of the operation elements of the mobile machinery / L. Polishchuk et al. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Srodowisk*. 2019. № 9 (2). P. 72–78. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.2553>.

Стаття надійшла до редакції 07.05.2025.

Стаття пройшла рецензування 28.06.2025.

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

Піонткевич Олег Володимирович – канд. техн. наук, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування.

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