

*О. А. ЯРОШЕНКО, О. І. ГАСЮК*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОЧНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ГІДРАВЛІЧНИХ МАШИН

Майбутні гідравлічні системи значною мірою включатимуть AI та ML, підвищуючи точність керування та забезпечуючи прогнозоване обслуговування. Алгоритми, керовані штучним інтелектом, все частіше використовуватимуться для прогнозованого технічного обслуговування, покращуючи надійність і термін служби гідравлічних систем. Ця інтеграція призведе до розумнішої та ефективнішої роботи та подовжить термін служби обладнання. Інтеграція технології IoT має вирішальне значення для збору та аналізу даних у реальному часі, полегшуючи віддалений моніторинг і контроль, що призводить до підвищення ефективності роботи та управління техобслуговуванням. Використання хмарних платформ для аналізу та зберігання даних, ймовірно, збільшиться, забезпечуючи більш складну обробку даних і доступність. Вдосконалені датчики та прогнозне обслуговування значно сприяють безпеці, передбачаючи збої системи. Надійність також підвищується завдяки скороченню часу простою та розумнішим графікам технічного обслуговування. Зростаюча конвергенція вдосконаленої робототехніки з гідравлічними системами спрямовує ці системи до збільшення автономності. Розширені функції безпеки стануть пріоритетом завдяки розумнішим датчикам і алгоритмам керування. Зростаюча складність гідравлічних систем підкреслює потребу в спеціалізованому навчанні та освіті з проектування, обслуговування та експлуатації систем. Очікується, що майбутні гідравлічні машини будуть більш адаптованими та гнучкими, з модульними конструкціями, які задовольнятимуть конкретні потреби конкретної галузі. Значною проблемою є адаптивність моделей AI та ML в динамічних умовах реального світу. Для вирішення цієї проблеми розробляються методи безперервного навчання. Підводячи підсумок, можна сказати, що майбутні системи керування та автоматизації гідравлічних машин спрямоване на більш розумність, зв'язок, ефективність та адаптивність. Ці тенденції будуть підкріплюватися постійним технологічним прогресом, зокрема у сфері штучного інтелекту, машинного навчання, інтернету речей.

**Ключові слова:** гідравлічні машини, системи керування, автоматизація, прогнозне обслуговування, штучний інтелект, машинне навчання.

*O. YAROSHENKO, O. HASIUK*

## STUDY OF THE CURRENT STATE OF DEVELOPMENT OF CONTROL AND AUTOMATION SYSTEMS OF HYDRAULIC MACHINES

Future hydraulic systems will heavily incorporate AI and ML, enhancing control precision and enabling predictive maintenance. AI-driven algorithms will increasingly be used for predictive maintenance, improving the reliability and lifespan of hydraulic systems. This integration will lead to smarter, more efficient operation, and extended equipment lifespans. The integration of IoT technology is crucial for real-time data collection and analysis, facilitating remote monitoring and control that leads to improved operational efficiency and maintenance management. The use of cloud platforms for data analysis and storage is likely to increase, enabling more sophisticated data processing and accessibility. Advanced sensors and predictive maintenance contribute significantly to safety by anticipating system failures. Reliability is also enhanced through reduced downtime and smarter maintenance schedules. The growing convergence of advanced robotics with hydraulic systems is steering these systems towards increased autonomy. Enhanced safety features will be a priority, driven by smarter sensors and control algorithms. The growing complexity of hydraulic systems underscores the need for specialized training and education in system design, maintenance, and operation. Future hydraulic machines are expected to be more customizable and flexible, with modular designs that cater to specific industry needs. A significant challenge is the adaptability of AI and ML models in dynamic, real-world conditions. Continuous learning methods are being developed to address this. In summary, the future of hydraulic machine control systems and automation looks towards greater intelligence, connectivity, efficiency, and adaptability. These trends will be underpinned by ongoing technological advancements, particularly in AI, ML, IoT, and sustainable practices.

**Keywords:** hydraulic machines, control systems, automation, predictive maintenance, artificial intelligence, machine learning.

**Вступ.** Ефективна та надійна робота гідравлічних машин, які відіграють вирішальну роль у різних галузях промисловості, значною мірою залежить від їхніх систем керування та автоматизації. Інтеграція передових систем управління та технологій автоматизації стає все більш важливою для підвищення продуктивності, безпеки та енергоефективності цих машин.

Гідравлічні машини відомі своєю здатністю прикладати великі зусилля та керувати великими навантаженнями, що робить їх незамінними в таких галузях, як будівництво, виробництво та гірничодобувна промисловість [1]. Системи керування та автоматизації є ключовими для забезпечення роботи цих машин із точністю та ефективністю, необхідними в таких складних умовах. Завдяки точному контролю над потоком і тиском гідравлічної рідини ці системи дозволяють машинам виконувати складні завдання з високою точністю, зменшуючи відходи та підвищуючи загальну продуктивність.

У середовищах, де використовуються гідравлічні машини, безпека має першорядне значення. Автоматизовані системи керування значною мірою сприяють безпеці операцій, забезпечуючи точний контроль за рухом машини, знижуючи ризик нещасних випадків, спричинених людською помилкою або механічною несправністю. Крім того, ці системи можуть включати механізми безпеки, такі як аварійне відключення та попередження про прогнозоване технічне обслуговування, що ще більше підвищує безпеку експлуатації.

Автоматизація в гідравлічних машинах призвела до розвитку можливостей прогнозованого технічного обслуговування. Завдяки безперервному моніторингу стану різних компонентів ці системи можуть передбачити можливі збої ще до їх виникнення. Цей передбачуваний підхід до технічного обслуговування скорочує непередбачені простої, подовжує термін служби обладнання та заощаджує витрати, пов'язані з ремонтом і втратою продуктивності.

Інтеграція сучасних технологій, таких як штучний інтелект (англ. AI) та IoT, із системами управління гідравлічними машинами є значним кроком вперед. Алгоритми штучного інтелекту можуть оптимізувати продуктивність, адаптуватися до мінливих умов і навіть вчитися на минулих операціях, щоб покращити продуктивність у майбутньому. Підключення до Інтернету речей дозволяє здійснювати дистанційний моніторинг і контроль, дозволяючи операторам керувати машинами на відстані, збирати дані для аналізу та швидко приймати обґрунтовані рішення.

Системи керування та автоматизації також відіграють важливу роль у тому, щоб зробити гідравлічні машини більш екологічними. Завдяки оптимізації операцій ці системи можуть зменшити споживання енергії та мінімізувати вплив промислової діяльності на навколишнє середовище. Ефективне керування гідравлічними машинами веде до менших витрат ресурсів і менших викидів, узгоджуючи промислові процеси зі зростаючими цілями екологічної стійкості.

Підсумовуючи, системи керування та автоматизації є не просто вдосконаленнями, а важливими компонентами сучасних гідравлічних машин. Вони забезпечують точність, ефективність, безпеку та стабільність операцій, узгоджуючи їх із технологічними досягненнями та вимогами різних галузей. Оскільки технологія продовжує розвиватися, роль цих систем у гідравлічних машинах стане ще більш важливою, стимулюючи інновації та ефективність промислових операцій у всьому світі.

*Мета роботи.* Основною метою цієї статті є ретельний аналіз останніх розробок у системах керування та автоматизації в області гідравлічних машин. Це передбачає детальний аналіз останніх технологічних досягнень, їх впровадження та результатів впливу на ефективність, безпеку та операційну ефективність. Стаття має на меті надати всебічний огляд поточних тенденцій, визначити ключові інновації та оцінити їх значення в контексті розвитку галузевих стандартів і вимог.

Обсяг цього аналізу широкий, але цілеспрямований, охоплюючи кілька ключових областей у сфері гідравлічних систем керування та автоматизації машин:

- Інтеграція штучного інтелекту. Дослідження того, як штучний інтелект інтегрується в системи керування, покращуючи такі можливості, як прийняття рішень, прогнозна аналітика та операційна ефективність.

- Віддалений моніторинг. Вивчення технологій і методологій, що використовуються для віддаленого моніторингу продуктивності та працездатності гідравлічних машин, сприяння збору даних у режимі реального часу та забезпечення проактивного керування.

- Прогнозне технічне обслуговування. Вивчення того, як прогностичне технічне обслуговування змінює стратегії обслуговування гідравлічних систем, використовуючи інформацію на основі даних для

передбачення потенційних проблем і пом'якшення простою, тим самим оптимізуючи управління життєвим циклом і експлуатаційну надійність.

**Основна частина.** Інтеграція штучного інтелекту в системи керування гідравлічними машинами кардинально змінила правила, підвищивши їх ефективність, точність і адаптивність. Системи керування на основі AI використовують різні алгоритми машинного навчання для оптимізації продуктивності. Наприклад, прогностичні алгоритми аналізують історичні дані та дані в реальному часі, щоб передбачити потреби в технічному обслуговуванні, таким чином скорочуючи час простою та подовжуючи термін служби обладнання. Алгоритми навчання з підкріпленням дозволяють системам навчатися та вдосконалюватися на основі власного досвіду в режимі реального часу, адаптуючись до мінливих умов для оптимальної роботи [2]. Ці програми штучного інтелекту не тільки підвищують ефективність, але й сприяють безпечнішій і надійнішій роботі гідравлічних машин.

Сучасний приклад інтеграції AI в системи керування гідравлічними машинами можна знайти в розробці інтелектуальних гідравлічних екскаваторів. Такі компанії, як Caterpillar і Komatsu, представили екскаватори, оснащені AI та алгоритмами машинного навчання. Ці системи збирають дані від датчиків на екскаваторі для аналізу робочих моделей. Алгоритми машинного навчання обробляють ці дані, щоб оптимізувати продуктивність екскаватора, наприклад покращити економію палива та точність під час копання. Крім того, ці системи штучного інтелекту можуть прогнозувати потреби в технічному обслуговуванні, відстежуючи справність різних компонентів, тим самим зменшуючи час простою та витрати на технічне обслуговування [3, 4].

Компанія Caterpillar Inc. значно покращила продуктивність своїх гідравлічних екскаваторів завдяки інтеграції вдосконалених гідравлічних систем. Новий гідравлічний екскаватор Cat 336, наприклад, має електрогідравлічну систему позитивного потоку та більший циліндр стріли, що покращує зусилля копання та поворотний момент. Ця система пропонує покращену керованість та ефективність, оскільки команди клапанів і витрата насоса контролюються на основі команд джойстика, які можна регулювати відповідно до умов роботи. Двигун екскаватора має три режими, включаючи інтелектуальний режим, призначений для адаптації потужності двигуна та гідравлічної системи до умов копання, тим самим знижуючи споживання палива. Цей розумний режим контролює численні параметри машини, такі як коефіцієнт навантаження та команди важеля, щоб постійно регулювати потужність двигуна для мінімального споживання палива та максимальної продуктивності [5].

Віддалений моніторинг у гідравлічних машинах передбачає використання передових технологій, таких як IoT (Інтернет речей), датчики та хмарні обчислення. Ці системи постійно збирають дані від обладнання, такі як температура, тиск і рівні рідини, і

передають їх у віддалене місце для аналізу. Це дає змогу в режимі реального часу відстежувати продуктивність і стан машини. Переваги включають прогнозне технічне обслуговування, де потенційні проблеми виявляються до їх ескалації, покращений час безвідмовної роботи та покращене прийняття рішень за допомогою аналізу даних [6]. Крім того, дистанційний моніторинг дозволяє ефективно розподіляти ресурси, зменшувати витрати на відрядження техніків і загалом підвищувати ефективність роботи.

Одним із яскравих прикладів віддаленого моніторингу в дії є система iCountPD компанії Parker Hannifin. Ці системи використовуються для моніторингу забруднення частинками в гідравлічних рідинах. Таке забруднення може бути шкідливим для обладнання, призводячи до зносу та виходу з ладу. Системи iCountPD забезпечують моніторинг гідравлічної рідини в режимі реального часу, що дозволяє негайно вжити заходів у разі виявлення забруднень. Цей перехід від періодичного до безперервного моніторингу допомагає уникнути катастрофічних збоїв і дає змогу проводити профілактичне обслуговування, скорочуючи час простою та витрати на технічне обслуговування. Інтеграція бездротових систем і підключення до Інтернету речей означає віддалений доступ до даних з будь-якого місця, що значно зменшує потребу в обслуговуючому персоналі на місці та підвищує ефективність роботи [7].

Ще одним інноваційним додатком є система LifeSense від Eaton. LifeSense – це інтелектуальна система моніторингу стану гідравлічних шлангів, яка може виявити, коли шланг наближається до кінця свого життєвого циклу. Він працює шляхом постійного моніторингу стану шланга за допомогою датчиків і прогнозування потенційних несправностей. Ця можливість передбачуваного технічного обслуговування має вирішальне значення для уникнення раптових поломок шлангів, які можуть бути дорогими з точки зору простою та ремонту. LifeSense пропонує як дротовий, так і бездротовий моніторинг, причому бездротова система використовує технологію IoT для оновлень і сповіщень у реальному часі. Такі системи значно підвищують ефективність і безпеку роботи [7].

Parker Hannifin також розробив платформу IoT під назвою «Голос машини» ("The Voice of the Machine"). Ця платформа стандартизує технологію IoT у продуктах Parker, повністю інтегруючи її в бізнес-модель клієнта. Він використовує датчики, встановлені в продуктах Parker, для створення критичних даних про продуктивність, які потім передаються на шлюз IoT і аналізуються за допомогою хмарної аналітики. Ця система пропонує прогнозне технічне обслуговування та покращує якість обслуговування шляхом заміни деталей до того, як вони вийдуть з ладу. Це приклад того, як IoT можна інтегрувати в гідравлічні системи для розумніших і ефективніших операцій [8].

Ці приклади ілюструють, як технології

дистанційного моніторингу та Інтернету речей використовуються в гідравлічній галузі для підвищення надійності та ефективності системи. Інтеграція таких технологій є значним кроком вперед у цифровій трансформації гідравлічних систем, що веде до розумніших, більш пов'язаних і ефективніших гідравлічних машин.

Прогнозне технічне обслуговування [9, 10] – це концепція, яка реалізована для ефективного керування планами техобслуговування активів шляхом прогнозування їх несправностей за допомогою методів, керованих даними. У цих сценаріях дані збираються протягом певного періоду часу для моніторингу стану обладнання. Мета полягає в тому, щоб знайти певні кореляції та закономірності, які можуть допомогти передбачити та зрештою запобігти невдачам. Обладнання у обробній промисловості часто використовується без підходу до планового технічного обслуговування. Така практика часто призводить до неочікуваних простоїв через певні несподівані збої. Під час планового технічного обслуговування стан виробничого обладнання перевіряється через фіксований проміжок часу, і якщо виникає будь-яка несправність, компонент замінюється, щоб уникнути несподіваних зупинок обладнання. З іншого боку, це призводить до збільшення часу, протягом якого машина не працює, і витрат на проведення технічного обслуговування. Поява розумних систем призвела до збільшення уваги до стратегій прогнозного обслуговування, які можуть зменшити вартість простою та підвищити доступність (коефіцієнт використання) виробничого обладнання. PdM також має потенціал для створення нових екологічних практик у виробництві шляхом повного використання терміну корисного використання компонентів

Реальні приклади прогнозного обслуговування гідравлічних систем демонструють ефективність цього підходу в різних галузях промисловості.

Наприклад, рішення Bosch Rexroth ODiN ілюструє впровадження прогнозного технічного обслуговування в гідравлічних системах. У цій службі використовується спеціальний сенсорний пакет, модернізований у клієнтські машини, у поєднанні з блоком збору даних і шлюзом Інтернету речей для підключення до хмари. Алгоритми машинного навчання (ML) використовуються для побудови моделей та виявлення аномалій, а спеціалісти-люди надають рекомендації щодо діагностики та обслуговування. Цей підхід не тільки передбачає потенційні збої, але й пропонує комплексні послуги з технічного обслуговування, включаючи управління запасними частинами та обслуговування на місцях [11].

Однак методи ML не позбавлені обмежень, оскільки ці моделі зазвичай навчаються на фіксованому розподілі, який відображає лише поточний стан проблеми. Через внутрішні чи зовнішні чинники стан проблеми може змінюватися, а продуктивність знижується через відсутність узагальнення та адаптації. На відміну від цього

стаціонарного навчального набору, реальні програми постійно змінюють своє середовище, створюючи потребу постійно адаптувати модель до змінних сценаріїв. Щоб допомогти в цьому, методи постійного навчання пропонують способи постійного адаптування моделей прогнозування та включення нових знань після розгортання. Незважаючи на переваги цих методів, все ще існують проблеми з їх застосуванням до реальних проблем. Для подолання такої проблеми у роботі [12] вже пропонується новий спосіб створення контрольних показників, які сприяють застосуванню методів безперервного навчання в більш реалістичних середовищах, наводячи конкретні приклади прогностичного обслуговування.

Загалом, прогнозне технічне обслуговування гідравлічних систем зосереджено на моніторингу та аналізі даних від різних датчиків, встановлених в обладнанні. Ці датчики відстежують такі параметри, як тиск, температура та швидкість потоку. Потім дані обробляються за допомогою алгоритмів машинного навчання для виявлення шаблонів, що вказують на потенційні проблеми, що дозволяє планувати технічне обслуговування до того, як виникнуть збої, тим самим зменшуючи час простою та витрати на обслуговування.

Ці приклади підкреслюють зростаючу тенденцію в промисловому обслуговуванні, де традиційні реактивні підходи замінюються більш проактивними стратегіями, керованими даними. Цей зсув обумовлений зростаючою складністю сенсорних технологій і можливостями алгоритмів машинного навчання обробляти й інтерпретувати величезні обсяги даних для кращого прийняття рішень під час управління обслуговуванням.

Галузеві експерти запропонували різні погляди на майбутнє систем керування гідравлічними машинами, зосереджуючись на інтеграції новітніх технологій і нових навичок, необхідних у цій галузі.

Технологічний прогрес. Існує консенсус [13] щодо того, що технологічний прогрес, зокрема AI, ML, IoT та кібербезпека, відіграватиме вирішальну роль в еволюції систем керування гідравлічними машинами. Очікується, що ці технології створять розумніші, ефективніші та трансформаційні системи керування. Штучний інтелект та машинне навчання, наприклад, забезпечать швидше та точніше приймати рішення та аналізувати дані в реальному часі, що призведе до проактивних рішень у системному управлінні. Цей прогрес має розпочати еру автоматизації, взаємопов'язаного інтелекту та підвищеної надійності та безпеки системи [14].

Інновації та гібридні рішення: такі експерти, як Пол Карлсон, генеральний директор Tolomatic, підкреслюють [15] важливість інновацій, особливо в контексті гібридних рішень, які поєднують сильні сторони електрифікації та гідравліки. Період пандемії прискорив цю тенденцію, спонукаючи інженерів і дизайнерів досліджувати нові шляхи розробки машин, які ефективно поєднують різні технології. Цей підхід відображає відхід від традиційних методів, коли

компанії могли зосередитися на одному типі технології.

Потреби в освіті та навчанні: зростає визнання того, що в галузі гідравліки скорочується кількість фахівців із глибокими знаннями в галузі гідравліки, частково через відсутність спеціальних навчальних програм і курсів у цій галузі. Майбутня життєздатність гідравлічних систем залежить від розробки нової кваліфікації «спеціаліста з гідравлічної мехатроніки», яка поєднує в собі досвід як у машинобудуванні, так і в технологіях керування. Цей міждисциплінарний підхід буде необхідним для розробки та оптимізації майбутніх гідравлічних систем і компонентів [16].

Майбутня життєздатність і застосування: Оцінюючи майбутню життєздатність гідравлічних систем, важливо враховувати конкретні застосування та унікальні сильні та слабкі сторони різних типів приводів. Наприклад, у певних сферах застосування, де потрібна велика сила, гідравлічні приводи можуть мати перевагу над електромеханічними системами. Очікується, що прогрес у матеріалах, покриттях, геометрії та таких технологіях, як 3D-друк на металі, ще більше розширить можливості гідравлічних систем. Крім того, все більше уваги приділяється екологічним міркуванням і необхідності адаптації гідравліки до нових правил і екологічних стандартів [16].

Ці перспективи підкреслюють майбутнє, де системи керування гідравлічними машинами будуть більшою мірою інтегровані з передовими технологіями [17], краще реагуватимуть на мінливі потреби ринку та більше залежатимуть від робочої сили, яка володіє сумішшю традиційних інженерних навичок і передового технологічного досвіду. Еволюція цих систем, ймовірно, продовжуватиметься потребою в більшій ефективності, адаптивності та екологічній стійкості.

Ландшафт систем управління та автоматизації гідравлічних машин швидко розвивається завдяки непинному технологічному прогресу. Неможливо переоцінити важливість постійних інновацій у цій галузі, оскільки вони є ключовими для задоволення зростаючих вимог до ефективності, безпеки, стійкості та адаптивності в різних промислових секторах.

У міру розвитку промисловості вимоги до гідравлічних систем стають складнішими та різноманітнішими. Постійні інновації гарантують, що ці системи можуть задовольнити потреби таких галузей, як будівництво, виробництво та гірничодобувна промисловість, які постійно змінюються. Це включає в себе розробку систем, які є не тільки потужними та точними, але також енергоефективними та екологічно чистими.

Інтеграція AI, ML, IoT та інших нових технологій трансформує можливості гідравлічних машин. Ці технології створюють розумніші системи керування, покращують прогнозоване технічне обслуговування та покращують ефективність роботи. Однак їх повний потенціал можна реалізувати лише завдяки постійним дослідженням і розробкам.

Оскільки гідравлічні системи відіграють важливу роль у багатьох сферах застосування, їх безпека та надійність мають першорядне значення. Постійні інновації допомагають у розробці вдосконалених механізмів моніторингу та контролю, які можуть передбачати збої та запобігати аваріям, забезпечуючи таким чином безпеку як операторів, так і машин.

Одним із важливих викликів у цій галузі є забезпечення адаптивності моделей штучного інтелекту та машинного навчання в нестационарних середовищах. Постійні інновації є важливими для розробки алгоритмів і моделей, які можуть навчатися та адаптуватися в режимі реального часу, гарантуючи, що гідравлічні системи залишаються ефективними та дієвими в різних робочих контекстах.

Інновації в гідравлічних системах також сприяють економічній стійкості шляхом зниження експлуатаційних витрат і підвищення продуктивності. Подібним чином екологічно чисті практики та матеріали в гідравлічних системах узгоджуються з глобальними зусиллями щодо сталого розвитку.

Зі зростанням складності гідравлічних систем зростає потреба в спеціальних навичках і знаннях. Безперервні інновації вимагають постійної освіти та навчання, щоб гарантувати, що робоча сила може ефективно проектувати, експлуатувати та підтримувати ці передові системи.

**Висновок.** Постійні інновації в системах управління та автоматизації гідравлічних машин – це не просто прагнення до технологічного прогресу; це необхідність для задоволення вимог сучасної промисловості. Загальний прогноз розвитку систем керування та автоматизації гідравлічних машин є позитивним, системи управління гідравлічними машинами стають більш інтелектуальними, пов'язаними та ефективнішими. Проте постійні дослідження та розробки є важливими для подолання існуючих проблем і повного використання потенціалу нових технологій. Підсумовуючи, слід зазначити, що прогрес у системах керування та автоматизації гідравлічних машин революціонує їх ефективність, безпеку та загальну продуктивність, причому AI, ML та IoT відіграють ключову роль у цій трансформації.

#### Список літератури

1. Андренко П. М., Лебедєв А. Ю., Дмитрієнко О. В., Свинаренко М. С. Надійність, технічне діагностування та експлуатація гідро- і пневмоприводів. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. 518 с.
2. Xu B., Shen J., Liu S., Su Q., Zhang J. Research and Development of Electro-hydraulic Control Valves Oriented to Industry 4.0: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 33. Article number 29. doi: 10.1186/s10033-020-00446-2
3. Sandzimir R. J., Asada H. H. A data-driven approach to prediction and optimal bucket-filling control for autonomous excavators. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020. Vol. 5, no. 2. P. 2682–2689.
4. Mascaro R., Wermelinger M., Hutter M., Chli M. Towards automating construction tasks: Large-scale object mapping, segmentation, and manipulation. *Journal of Field Robotics*. 2021. Vol. 38, issue 5. P. 684–699. doi: 10.1002/rob.22007
5. *Hydraulics System Improves Performance for New Caterpillar Excavator*. URL: <https://www.powermotiontech.com/hydraulics/article/21247443/hydraulics-system-improves-performance-for-new-caterpillar-excavator> (дата звернення: 10.12.2023).
6. Ji Y., Song H., Xue Z., Li Z., Tong M., Li H. A Review of the

- Efficiency Improvement of Hydraulic Turbines in Energy Recovery. *Processes*. 2023. Vol. 11, no. 6. P. 1815. doi: 10.3390/pr11061815
7. *Remote monitoring of hydraulic fluid particles reduces costs and downtime*. URL: <https://www.fluidpowerworld.com/remote-monitoring-of-hydraulic-fluid-particles-reduces-costs-and-downtime> (дата звернення: 10.12.2023).
8. *IoT Empowers Control in Fluid Applications*. URL: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21836162/iot-empowers-control-in-fluid-applications> (дата звернення: 10.12.2023).
9. Kane A. P., Kore A. S., Khandale A. N., Nigade S. S., Joshi P. P. Predictive Maintenance using Machine Learning. *ArXiv preprint arXiv: 2205.09402*. 2022. doi: 10.48550/arXiv.2205.09402
10. Rivera D. L., Scholz M. R., Fritscher M., Krauss M., Schilling K. Towards a predictive maintenance system of a hydraulic pump. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, issue 11. P. 447–452.
11. *Predictive Maintenance for Hydraulic Systems*. URL: [https://www.aiotplaybook.org/index.php?title=Predictive\\_Maintenance\\_for\\_Hydraulic\\_Systems](https://www.aiotplaybook.org/index.php?title=Predictive_Maintenance_for_Hydraulic_Systems) (дата звернення: 10.12.2023).
12. Hurtado J., Salvati D., Semola R., Bosio M., Lomonaco V., Continual learning for predictive maintenance: Overview and challenges. *Intelligent Systems with Applications*. 2023. Vol. 19. P. 200251. doi: 10.1016/j.iswa.2023.200251
13. Mahato A. C., Ghoshal S. K. Energy-saving strategies on power hydraulic system: An overview. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2021. Vol. 235, issue 2. P. 147–169. doi: 10.1177/0959651820931627
14. *The future of control systems: trends and predictions*. URL: <https://www.control-design.com/control/control-software/article/33007472/the-future-of-control-systems-trends-and-predictions> (дата звернення: 10.12.2023).
15. *2022 Fluid Power Forecast: Plugged Into the Future*. URL: <https://www.powermotiontech.com/community/article/21215227/2022-fluid-power-forecast-plugged-into-the-future> (дата звернення: 10.12.2023).
16. *Hydraulics of the Future*. URL: <https://www.powermotiontech.com/sensors-software/controls-instrumentation/article/21887953/hydraulics-of-the-future> (дата звернення: 10.12.2023).
17. Fernandes J. M. M., Tanaka M. C., Bessa W. M. Sliding mode control with a neural network compensation scheme for electro-hydraulic systems. *ArXiv eess arXiv: 2205.13343*. 2022. doi: 10.48550/arXiv.2205.13343

#### References (transliterated)

1. Andrenko P. M., Lebedyev A. Yu., Dmytriienko O. V., Svyarenko M. S. *Nadiynist', tekhnichne diahnostuvannya ta ekspluatatsiya hidro- i pnevmopryvodiv* [Reliability, technical diagnostics and operation of hydraulic and pneumatic drives]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018. 518 p.
2. Xu B., Shen J., Liu S., Su Q., Zhang J. Research and Development of Electro-hydraulic Control Valves Oriented to Industry 4.0: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2020, vol. 33, article number 29. doi: 10.1186/s10033-020-00446-2
3. Sandzimir R. J., Asada H. H. A data-driven approach to prediction and optimal bucket-filling control for autonomous excavators. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020, vol. 5, no. 2, pp. 2682–2689.
4. Mascaro R., Wermelinger M., Hutter M., Chli M. Towards automating construction tasks: Large-scale object mapping, segmentation, and manipulation. *Journal of Field Robotics*. 2021, vol. 38, issue 5, pp. 684–699. doi: 10.1002/rob.22007
5. *Hydraulics System Improves Performance for New Caterpillar Excavator*. Available at: <https://www.powermotiontech.com/hydraulics/article/21247443/hydraulics-system-improves-performance-for-new-caterpillar-excavator> (accessed 10.12.2023).
6. Ji Y., Song H., Xue Z., Li Z., Tong M., Li H. A Review of the Efficiency Improvement of Hydraulic Turbines in Energy Recovery. *Processes*. 2023, vol. 11, no. 6, p. 1815. doi: 10.3390/pr11061815
7. *Remote monitoring of hydraulic fluid particles reduces costs and downtime*. Available at: <https://www.fluidpowerworld.com/remote-monitoring-of-hydraulic-fluid-particles-reduces-costs-and-downtime> (accessed 10.12.2023).
8. *IoT Empowers Control in Fluid Applications*. Available at: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/218361>

- 62/iot-empowers-control-in-fluid-applications (accessed 10.12.2023).
9. Kane A. P., Kore A. S., Khandale A. N., Nigade S. S., Joshi P. P. Predictive Maintenance using Machine Learning. *ArXiv preprint arXiv:2205.09402*. 2022. doi: 10.48550/arXiv.2205.09402
  10. Rivera D. L., Scholz M. R., Fritscher M., Krauss M., Schilling K. Towards a predictive maintenance system of a hydraulic pump. *IFAC-PapersOnLine*. 2018, vol. 51, issue 11, pp. 447–452.
  11. *Predictive Maintenance for Hydraulic Systems*. Available at: [https://www.aiotplaybook.org/index.php?title=Predictive\\_Maintenance\\_for\\_Hydraulic\\_Systems](https://www.aiotplaybook.org/index.php?title=Predictive_Maintenance_for_Hydraulic_Systems) (accessed 10.12.2023).
  12. Hurtado J., Salvati D., Semola R., Bosio M., Lomonaco V., Continual learning for predictive maintenance: Overview and challenges. *Intelligent Systems with Applications*. 2023. Vol. 19. P. 200251. doi: 10.1016/j.iswa.2023.200251
  13. Mahato A. C., Ghoshal S. K. Energy-saving strategies on power hydraulic system: An overview. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2021, vol. 235, issue 2, pp. 147–169. doi: 10.1177/0959651820931627
  14. *The future of control systems: trends and predictions*. Available at: <https://www.control-design.com/control/control-software/article/33007472/the-future-of-control-systems-trends-and-predictions> (accessed 10.12.2023).
  15. *2022 Fluid Power Forecast: Plugged Into the Future*. Available at: <https://www.powermotiontech.com/community/article/21215227/2022-fluid-power-forecast-plugged-into-the-future> (accessed 10.12.2023).
  16. *Hydraulics of the Future*. Available at: <https://www.powermotiontech.com/sensors-software/controls-instrumentation/article/21887953/hydraulics-of-the-future> (accessed 10.12.2023).
  17. Fernandes J. M. M., Tanaka M. C., Bessa W. M. Sliding mode control with a neural network compensation scheme for electro-hydraulic systems. *ArXiv eess arXiv: 2205.13343*. 2022. doi: 10.48550/arXiv.2205.13343

Надійшла (received) 12.12.2023

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Ярошенко Олексій Андрійович (Yaroshenko Oleksii)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9202-1834>; e-mail: [oleksii.yaroshenko@mit.khpi.edu.ua](mailto:oleksii.yaroshenko@mit.khpi.edu.ua)

**Гасюк Олександр Іванович (Hasiuk Oleksandr)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6347-8501>; e-mail: [galectom@gmail.com](mailto:galectom@gmail.com)