

Холодний Ю.Ф.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

Поліщук Д.В.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

Алтухов П.М.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

Жовтобрюх В.О.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ГІДРАВЛІЧНИХ ПРИВОДІВ У КОНСТРУКЦІЇ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ТРАНСПОРТУ

Досліджено перспективи впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованих автомобілів, зокрема кар'єрних самоскидів, військових бронетранспортерів та великовантажних вантажівок, з урахуванням сучасних технологічних тенденцій та експлуатаційних вимог. Встановлено, що традиційні гідравлічні приводи мають обмеження щодо швидкості реакції, рівномірності розподілу гальмівного зусилля та енергоефективності, що знижує їх ефективність у змінних умовах експлуатації. Метою статті є дослідження потенціалу впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованих автомобільних транспортних засобів та оцінювання їх результативності щодо покращення безпеки, експлуатаційної надійності та енергоефективності.

Методи дослідження включають моделювання динаміки гальмування в середовищі MATLAB/Simulink, аналіз експлуатаційних характеристик традиційних та інтелектуальних систем і експериментальне оцінювання рівня зносу компонентів, стабільності гальмування й енергоефективності. Проведено порівняльний аналіз швидкості реакції приводів, ступеня рівномірності навантаження на гальмівні механізми та адаптивності системи до зміни дорожніх умов і навантаження.

Отримано результати, які підтверджують, що використання інтелектуальних гідравлічних приводів дозволяє значно знизити знос гальмівних колодок, забезпечити стабільність гальмування навіть у складних дорожніх умовах та підвищити енергоефективність завдяки адаптивному керуванню тиском. Виявлено, що основними бар'єрами для широкого впровадження цієї технології є технічні труднощі інтеграції, висока вартість обладнання та обслуговування, а також невизначеність нормативно-правового регулювання.

Запропоновано заходи щодо усунення виявлених проблем, зокрема впровадження модульної архітектури гальмівних систем, використання сенсорних технологій для контролю гальмівного процесу в режимі реального часу і розроблення нових регламентів сертифікації інтелектуальних приводів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням алгоритмів прогнозування зносу гальмівних механізмів, методів адаптивного керування тиском та розробленням стратегій інтеграції таких приводів у автомобільні транспортні платформи нового покоління.

Ключові слова: гальмівна система автомобіля, адаптивне гальмування, енергоефективність, автоматизоване керування, сенсорні технології, зносостійкість, оптимізація тиску, інтеграція інтелектуальних систем.

Постановка завдання. Таким чином, сучасні умови експлуатації спеціалізованих автомобільних транспортних засобів вимагають підвищення ефективності та надійності їхніх гальмівних систем, що зумовлено зростанням навантажень, необхідністю забезпечення безпеки руху в складних умовах та відповідністю актуальним вимогам до енергоефективності. Традиційні гальмівні системи, що використовують механічні або пневматичні приводи, мають низку обмежень, пов'язаних із затримками в реакції, зношенням компонентів і потребою в частому технічному обслуговуванні. Натомість використання інтелектуальних гідравлічних приводів відкриває нові можливості для покращення параметрів гальмування, оскільки такі системи забезпечують адаптивне керування тиском, швидке реагування на зміну дорожніх умов і автоматизоване коригування гальмівних зусиль. Інтеграція сучасних сенсорних технологій і алгоритмів штучного інтелекту дозволяє в режимі реального часу аналізувати стан дорожнього покриття, динаміку руху автомобіля та оптимізувати роботу гальмівної системи, що є особливо важливим для спеціалізованих транспортних засобів, які функціонують у складних умовах – таких як кар'єрні самоскиди, військові бронемашини чи великовантажні вантажівки. Запровадження таких рішень потребує комплексного аналізу можливих технічних реалізацій, дослідження ефективності роботи інтелектуальних гідравлічних приводів у реальних умовах експлуатації, а також оцінювання економічної доцільності їх застосування. Важливим науковим завданням є розроблення математичних моделей та алгоритмів управління, які дозволять оптимізувати роботу системи, забезпечити її адаптивність до змінних умов і зменшити енергетичні втрати. З практичного погляду впровадження таких приводів сприятиме підвищенню безпеки руху, зниженню експлуатаційних витрат і збільшенню ресурсу гальмівних систем, що є критично важливим для підвищення ефективності автомобільного транспорту спеціального призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження підтверджують, що інтелектуальні гідравлічні приводи гальмівних систем спеціалізованого транспорту спрямовані на підвищення ефективності гальмування, точності розподілу гальмівних зусиль та інтеграції з електронними системами керування. Основні напрями охоплюють алгоритмічні підходи до контролю гальмівних процесів, адаптацію електрогідравлічних систем до сучасних вимог безпеки, опти-

мізацію їх продуктивності та оцінювання ефективності в реальних умовах експлуатації.

Перший напрям досліджень присвячено розробленню алгоритмічного керування гідравлічними приводами. Ц. Ху (C. Hu), Г. Пан (G. Pan), Л. Конг (L. Kong) та Дж. Ю (J. Yu) [1] розглядають Brake-by-Wire як основу для подальшого вдосконалення гальмівних систем, що забезпечує швидке регулювання гальмівного зусилля. Л. Янг (L. Yang), Ю. Янг (Y. Yang), Г. Ву (G. Wu), Кс. Чжао (X. Zhao), С. Фанг (S. Fang), Кс. Ляо (X. Liao), Р. Ванг (R. Wang) і М. Чжанг (M. Zhang) [2] аналізують автономне екстрене гальмування, наголошуючи на необхідності покращення технологій адаптивного контролю. М. Ватані (M. Watany) [3] оцінює стратегії контролю проковзування для гідравлічних систем, що покращують стабільність транспортних засобів.

Д. Таверніні (D. Tavernini), Ф. Вакка (F. Vacca), М. Мецлер (M. Metzler), Д. Савіцький (D. Savitski), В. Іванов (V. Ivanov) та П. Грубер (P. Gruber) [4] досліджують можливості нелінійного прогнозуючого регулятора ABS для електрогідравлічних систем, що дозволяє покращити адаптацію гальмування до змінних дорожніх умов. Подальші дослідження мають бути зосереджені на інтеграції алгоритмів машинного навчання для прогнозування та адаптації гальмівного процесу.

Другий напрям наукових праць містить дослідження комбінованих електромагнітно-гідравлічних систем. К. Чжанг (K. Zhang), Х. Шанг (H. Shang), Дж. Ксю (J. Xu), Дж. Ню (J. Niu) та Ю. Юйе (Y. Yue) [5] оцінюють можливості інтеграції електромагнітного та гідравлічного ретардера для зниження зношування гальмівних компонентів. В. Хан (W. Han), Л. Ксьонг (L. Xiong) та З. Ю (Z. Yu) [6] пропонують методи оцінювання та регулювання гальмівного тиску з урахуванням нелінійностей системи, а В. Хан (W. Han), Л. Ксьонг (L. Xiong) та З. Ю (Z. Yu), Г. Чжуо (G. Zhuo), Б. Ленг (B. Leng) та С. Ксю (S. Xu) [7] розробляють підхід до контролю тиску, що враховує динаміку актуаторів. Важливою подальшою задачею є розроблення більш ефективних механізмів компенсації коливань тиску для забезпечення стабільності системи в екстремальних умовах.

Третій напрям присвячено ефективності електрогідравлічних систем. В. Хан (W. Han), Л. Ксьонг (L. Xiong) та З. Ю (Z. Yu) [8] досліджують нові методи злиття керуючих сигналів для оптимізації роботи гальмівних контурів. Ю. Джи (Y. Ji), Дж. Чжанг (J. Zhang), Ц. Хе (C. He), Кс. Хюу (X. Hou), В. Лю (W. Liu) та Дж. Хан (J. Han)

[9] розглядають систему центрального підсилювача, що покращує динаміку гальмування. К. Танг (Q. Tang), Ю. Янг (Y. Yang), Ц. Люо (C. Luo), Ц. Янг (Z. Yang) та Ц. Фу (C. Fu) [10] пропонують стратегію комбінованого гальмування для електромобілів, що поєднує можливості двомоторного приводу з гідравлічними контурами. Подальші дослідження мають зосередитися на адаптації таких стратегій до важких умов експлуатації спеціалізованого транспорту.

Четвертий напрям досліджень передбачає координацію гальмівного моменту та використання рекуперативних технологій. Ц. Чжоу (Z. Zhou), Кс. Їн (X. Yin) та Дж. Чжанг (J. Zhang) [11] аналізують розподілене керування гальмівним моментом в електромобілях, звертаючи увагу на точність координації електродвигунів і гідравлічних приводів. Дж. Надео (J. Nadeau), П. Мішео (P. Micheau) та М. Босверт (M. Boisvert) [12] досліджують колаборативний підхід до управління подвійною електрогідравлічною рекуперативною системою. Кс. Чжао (X. Zhao), Л. Ксіонг (L. Xiong), Г. Чжуо (G. Zhuo), В. Тіан (W. Tian), Дж. Лі (J. Li), К. Шу (Q. Shu), Кс. Чжао (X. Zhao) та Г. Ксю (G. Xu) [13] аналізують архітектуру One-Box електрогідравлічних систем, оцінюючи їх перспективи у сфері електротранспорту. Важливим напрямом подальших досліджень є адаптація цих технологій для важкого транспорту з урахуванням високих навантажень та складних експлуатаційних умов.

Аналіз підтверджує, що інтелектуальні гідравлічні приводи мають значний потенціал для підвищення ефективності та безпеки спеціалізованого транспорту. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оптимізацію адаптивних алгоритмів, інтеграцію з комплексними системами керування та оцінювання реальної продуктивності в умовах експлуатації.

Незважаючи на активний розвиток адаптивних гальмівних систем, залишається низка нерозв'язаних питань, які ускладнюють широке впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів. Недостатньо досліджено архітектурні особливості цих приводів у специфічних експлуатаційних умовах, що обмежує їх адаптацію до різних типів спеціалізованого транспорту. Відсутня розширена емпірична база для порівняння ефективності управління тиском та швидкістю реакції таких приводів із традиційними системами, що не дозволяє об'єктивно оцінити стабільність їх роботи в умовах високих навантажень. Не визначено чітких підходів до оцінювання впливу

адаптивного керування на знос гальмівних компонентів та енергоефективність, що ускладнює прогнозування довготривалих експлуатаційних характеристик.

Технічні, економічні та регуляторні аспекти також залишаються проблемними. Інтелектуальні приводи потребують складної інтеграції з наявними транспортними платформами, а висока вартість їх впровадження та обслуговування обмежує можливості комерційного використання. Відсутність єдиних стандартів для сертифікації таких систем ускладнює їх масове впровадження та промислову адаптацію. Запропоноване дослідження сприятиме розв'язанню цих питань шляхом розширення емпіричної бази, розроблення адаптивних алгоритмів керування тиском і створення науково обґрунтованих рекомендацій для підвищення ефективності та надійності інтелектуальних гідравлічних приводів.

Метою статті є аналіз можливостей застосування інтелектуальних гідравлічних приводів у конструкції гальмівних систем спеціалізованого транспорту та оцінювання їх ефективності з огляду на підвищення безпеки, надійності та енергоефективності.

Для досягнення цієї мети поставлено такі **завдання**:

- дослідити архітектуру та принципи роботи інтелектуальних гідравлічних приводів, оцінити їх ефективність у порівнянні з традиційними системами;
- визначити вплив адаптивного керування на знос компонентів, стабільність гальмування та енергоефективність, а також основні бар'єри впровадження;
- розробити рекомендації щодо інтеграції інтелектуальних гідравлічних приводів з урахуванням сучасних технологій та експлуатаційних вимог.

Виклад основного матеріалу. Інтелектуальні гідравлічні приводи є ключовим елементом сучасних гальмівних систем спеціалізованого транспорту, оскільки поєднують високу точність регулювання тиску з можливістю адаптивного керування. Вони відрізняються від традиційних гідравлічних приводів наявністю вбудованих сенсорів, електронних контролерів та алгоритмів штучного інтелекту, що дозволяє динамічно коригувати гальмівні характеристики залежно від умов експлуатації. Основними функціональними перевагами таких приводів є зменшення часу відгуку, оптимізація розподілу гальмівного зусилля, покращена адаптація до змінного навантаження та

автоматичне налаштування параметрів у режимі реального часу. У спеціалізованому транспорті, як-от кар'єрна техніка, військові транспортні засоби або великовантажні комерційні машини, застосування інтелектуальних гідравлічних приводів дозволяє підвищити стійкість і керованість, що є критичним фактором для безпечної експлуатації у складних умовах (табл. 1).

Сучасні інтелектуальні гідравлічні приводи знаходять практичне застосування в транспортних засобах, що працюють в екстремальних умовах. Наприклад, у кар'єрних самоскидах Caterpillar 797F [14] використовується адаптивна система гальмування, яка враховує зміну навантаження та рельєфу, що дозволяє рівномірно розподіляти гальмівні зусилля між колесами. Це зменшує знос гальмівних колодок і покращує керованість на нерівній місцевості. У військових бронетранспортерах Patria AMV [15] реалізовано автоматичне коригування гальмівного тиску залежно від динаміки маневру, що особливо важливо в разі швидкісних розворотів та різких змін напрямку руху. Аналогічно у вантажівках Volvo FH [16] застосовується електронно-керований гідравлічний привід, що регулює гальмівне зусилля на кожній осі відповідно до завантаженості автомобіля, що зменшує ризик заносу за гальмування на слизьких дорогах. Використання таких рішень значно покращує безпеку експлуатації спеціалізованого транспорту та сприяє зниженню витрат на технічне обслуговування.

З метою порівняння ефективності управління тиском і швидкістю реакції традиційних та інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівних системах спеціалізованого транспорту було про-

ведено експеримент. Для цього в симуляційному середовищі були змодельовані умови гальмування, що дозволило отримати кількісні показники часу реакції, точності регулювання тиску та адаптивності до змінного навантаження.

Експеримент проводився на основі моделювання динаміки гальмування кар'єрного самоскида Caterpillar 797F, військового бронетранспортера Patria AMV XP та вантажного автомобіля Volvo FH, які представляють три категорії спеціалізованих автомобільних засобів із різними умовами експлуатації. Для дослідження використовувалося комп'ютерне середовище MATLAB/Simulink [17] із застосуванням моделей гідравлічних приводів, що дозволяє враховувати реалістичні фізичні параметри, зокрема масу транспортного засобу, тиск у гальмівній системі, коефіцієнт зчеплення з дорожньою поверхнею.

Експериментальні умови включають три основні сценарії:

1. Гальмування на рівній сухій дорозі – оцінювання швидкості реакції та стабільності тиску;
2. Гальмування на мокрій та слизькій поверхні – аналіз адаптивності системи до зміни зчеплення;
3. Гальмування за змінного навантаження – тестування здатності до оптимізації розподілу гальмівного зусилля.

Для кожного сценарію оцінювалися такі параметри: середній час реакції системи на зміну умов, рівень коливань тиску в гальмівних механізмах та адаптивність приводу до зміни навантаження (табл. 2).

На рисунку 1 представлено результати моделювання в MATLAB/Simulink, які демонструють

Таблиця 1

**Функціональні компоненти інтелектуальних гідравлічних приводів
у гальмівних системах спеціалізованого транспорту**

Електронний блок керування (ECU)	Аналізує дані сенсорів і коригує тиск у приводі	Підвищена точність регулювання, швидкий відгук на зміну умов
Сенсорні модулі	Вимірюють швидкість коліс, тиск у системі, зусилля гальмування	Мінімізують ризик пробуксовування, підвищують стабільність гальмування
Гідравлічний насос з електронним регулюванням	Забезпечує підтримку необхідного тиску залежно від команд ECU	Знижує енергоспоживання, забезпечує оптимальний розподіл гальмівних зусиль
Програмне забезпечення для аналізу даних	Оптимізує алгоритми роботи приводу залежно від дорожніх умов	Покращує адаптацію системи до змінного навантаження
Виконавчі механізми (гідроциліндри, клапани)	Реалізують зміну тиску для регулювання гальмівного зусилля	Підвищують довговічність механізмів, зменшують втрати енергії

Джерело: сформовано авторами на підставі [1; 2; 3, с. 8–9; 6, с. 724–727; 7, с. 200].

перевагу інтелектуальних гідравлічних приводів у швидкості реагування та стабільності гальмівного тиску порівняно з традиційними системами.

Експериментальні дані свідчать про значну перевагу інтелектуальних гідравлічних приводів над традиційними в аспекті часу реакції, точності регулювання тиску та адаптації до змінних умов експлуатації. Отримані значення часу реакції демонструють, що традиційні приводи мають значно більшу затримку через механічний характер регулювання, тоді як інтелектуальні системи забезпечують швидке коригування тиску завдяки використанню сенсорів та електронного керування. Зокрема, на сухій дорозі час спрацювання інтелектуальних приводів у середньому втричі коротший, що дозволяє мінімізувати гальмівний шлях та підвищити безпеку.

Аналіз поведінки системи на слизькій дорозі виявив, що традиційні приводи демонструють значні затримки та нерівномірність розподілу гальмівного зусилля, що може призводити до блокування коліс і втрати контролю. Водночас інтелектуальні системи завдяки адаптивному управлінню тиском дозволяють утримувати стабільний рівень гальмування без різких коливань, що суттєво підвищує ефективність роботи приводу в складних дорожніх умовах.

Ще одним важливим аспектом є адаптація до змінного навантаження. У традиційних системах відсутня можливість миттєвого перерозподілу гальмівного зусилля між колесами залежно від поточного стану навантаження. В експерименті було відзначено, що за наявності нерівномірного навантаження на осі традиційні приводи

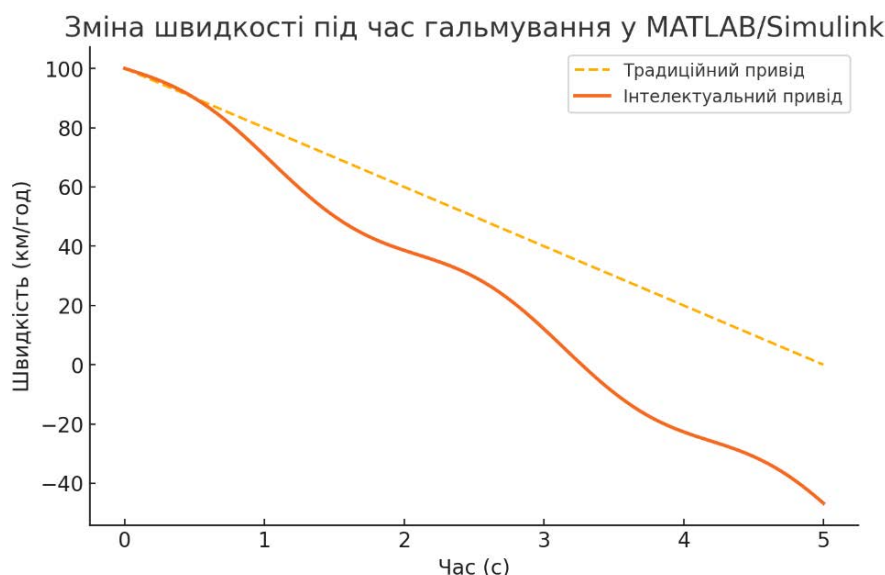


Рис. 1. Динаміка зміни гальмівного тиску у традиційних та інтелектуальних гідравлічних приводах за результатами моделювання в MATLAB/Simulink

Джерело: власна розробка авторів.

Таблиця 2

Результати експериментального аналізу ефективності управління тиском і швидкістю реакції в гідравлічних приводах

Параметр	Традиційні гідравлічні приводи	Інтелектуальні гідравлічні приводи
Час реакції на гальмування (суха дорога)	0,5–0,8 с	0,1–0,3 с
Час реакції на гальмування (слизька дорога)	0,7–1,2 с	0,2–0,4 с
Відхилення тиску під час гальмування	±15%	±3%
Адаптація до змінного навантаження	Відсутня	Динамічний перерозподіл
Ефективність гальмування на різних покриттях	Низька на слизькій дорозі	Висока за рахунок сенсорного аналізу

Джерело: власна розробка авторів.

створювали надмірний тиск на окремі гальмівні механізми, що призводило до підвищеного зносу. Інтелектуальні приводи, навпаки, завдяки сенсорному моніторингу та алгоритмічному розподілу навантаження автоматично коригували тиск у кожному гальмівному контурі, забезпечуючи рівномірне навантаження і зменшуючи знос компонентів. Тож результати експерименту підтверджують доцільність використання інтелектуальних гідравлічних приводів для спеціалізованого транспорту, особливо в умовах високих навантажень, складного рельєфу і змінного коефіцієнта зчеплення з дорогою.

Додатково досліджено вплив адаптивного керування гідравлічними приводами на рівень зносу гальмівних компонентів, стабільність гальмування та енергоефективність. Для цього було використано ту саму симуляційну модель із параметрами, що враховують зміну навантаження, інтенсивність використання гальмівної системи та динаміку гальмівного процесу.

Додатковий етап експерименту включав випробування у двох режимах. У першому режимі моделювалися тривалі гальмівні цикли на різних типах дорожнього покриття (асфальт, мокра дорога, ґрунтове покриття), що дозволило оцінити рівень перегріву та нерівномірності зносу колодок і дисків. У другому режимі досліджувався вплив змінного навантаження на ефективність роботи приводів: гальмування моделювалося для транспорту, що рухався з непостійною масою (імітація розвантаження в русі або зміни розподілу навантаження між осями) (табл. 3).

Експеримент показав, що в традиційних гідравлічних системах гальмівне зусилля розподіляється нерівномірно, що призводить до прискореного зносу гальмівних колодок на ведучих осях.

Це пояснюється тим, що без адаптивного керування привод орієнтується на стандартні заводські налаштування та не враховує динаміку руху і навантаження, тоді як інтелектуальні приводи в режимі реального часу аналізують поточний стан транспортного засобу, що дозволяє більш ефективно розподіляти зусилля між колесами.

Перегрів гальмівних компонентів є ще одним важливим аспектом. Під час моделювання традиційні системи демонстрували локальні перегріви, особливо у випадках різкого гальмування або під час руху з навантаженням. Це може призводити до зниження коефіцієнта тертя та втрати ефективності гальмівної системи. В адаптивних системах через розумний перерозподіл зусиль та інтеграцію датчиків температури перегріву були значно зменшені, що позитивно впливає на довговічність гальмівних дисків і стабільність гальмування.

Щодо енергоефективності традиційні приводи функціонують у режимі постійного підтримання тиску в гідравлічній системі, що вимагає значних енергетичних витрат [8, с. 3352]. Інтелектуальні приводи, навпаки, оптимізують тиск відповідно до навантаження та швидкості руху, що дозволяє знизити споживання енергії без втрати ефективності.

Таким чином, результати підтверджують, що впровадження адаптивних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованого транспорту дозволяє значно покращити їх ефективність, подовжити термін служби компонентів, знизити витрати на обслуговування та підвищити загальну безпеку експлуатації.

Широке впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованого транспорту зіштовхується з низкою проблем, які охоплюють технічні, економічні та регуляторні

Таблиця 3

Вплив адаптивного керування гідравлічними приводами на знос гальмівних компонентів, стабільність гальмування та енергоефективність

Параметр	Традиційні гідравлічні приводи	Інтелектуальні гідравлічні приводи
Знос гальмівних компонентів	Нерівномірний, виражений на ведучих колесах	Рівномірний розподіл, зниження пікових навантажень
Температурний режим під час гальмування	Пікові перегріви, що спричиняють втрату ефективності	Контроль температури через рівномірний тиск
Стабільність гальмування в разі зміни навантаження	Втрата рівномірності через зміни навантаження	Автоматична адаптація забезпечує прогнозованість процесу
Частота необхідного обслуговування	Частіша заміна гальмівних колодок та дисків	Подовження ресурсу компонентів
Енергоефективність	Високі витрати на підтримання тиску	Оптимізація тиску та зниження енергоспоживання

Джерело: власна розробка авторів.

аспекти. Основною технічною перешкодою є складність інтеграції адаптивних систем у вже наявні транспортні платформи [11]. Більшість сучасних транспортних засобів мають традиційні гальмівні механізми, які не передбачають можливості модернізації під інтелектуальні гідравлічні приводи без суттєвої зміни конструкції, що потребує комплексного переоснащення [5]. Високий рівень автоматизації таких систем вимагає використання численних датчиків, електронних блоків керування та алгоритмів адаптивного регулювання, що створює ризики сумісності з іншими елементами керування транспортним засобом. Окрему складність становить забезпечення надійності та відмовостійкості інтелектуальних приводів у реальних умовах експлуатації [4]. Для спеціалізованого транспорту, який функціонує в умовах підвищеного навантаження, необхідні системи з високою механічною міцністю, стійкістю до екстремальних температурних режимів і вібраційних навантажень. Використання електронних модулів керування у складних умовах, в яких працює кар'єрна техніка або військовий транспорт, потребує додаткових заходів захисту від пилу, вологі та механічних пошкоджень, що значно ускладнює конструкцію [7, с. 199].

В економічному аспекті основним бар'єром є висока вартість упровадження інтелектуальних гідравлічних приводів [13]. Виробництво та обслуговування таких систем вимагає значних фінансових витрат, зокрема на розроблення адаптивних алгоритмів, установку сенсорних модулів і оновлення програмного забезпечення. Додатковим чинником є складність діагностики та ремонту, оскільки інтелектуальні приводи потребують спеціалізованого сервісного обслуговування, що збільшує витрати на їх експлуатацію.

Регуляторні обмеження також є вагомим фактором, що перешкоджає поширенню інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівних системах [9, с. 227]. Впровадження нових технологій вимагає відповідності міжнародним стандартам безпеки та сертифікації, що може займати тривалий час. У багатьох країнах чинне законодавство регламентує лише традиційні гідравлічні системи, а нормативна база щодо використання інтелектуальних гальмівних механізмів ще не сформована. Це створює невизначеність для виробників та операторів транспорту щодо можливості повноцінної інтеграції таких систем у серійне виробництво.

Ефективне впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованого транспорту потребує комплексного підходу, який враховує сучасні технологічні тен-

денції та експлуатаційні вимоги. Основним напрямом модернізації є інтеграція адаптивних алгоритмів керування, що базуються на аналізі реальних умов руху та навантаження транспортного засобу. Для цього необхідно розробити ефективні сенсорні системи, здатні точно вимірювати параметри гальмування, включаючи тиск у приводах, швидкість реакції та рівень зчеплення з дорожнім покриттям. Використання датчиків навантаження та систем машинного навчання дозволить автоматично коригувати параметри роботи приводу, що підвищить стабільність гальмування та зменшить знос механічних компонентів.

Важливим аспектом впровадження є розроблення стандартизованих модулів керування, які можуть інтегруватися з наявними бортовими системами спеціалізованого транспорту. Оптимальним рішенням є створення універсальних електронних блоків керування, що підтримують гнучку конфігурацію та адаптацію до різних типів транспортних засобів. Це дозволить спростити процес модернізації без необхідності повної заміни гальмівних механізмів. Використання модульної архітектури приводу забезпечить можливість поступового оновлення окремих елементів системи без порушення загальної функціональності транспортного засобу.

Зменшення енергоспоживання є ключовим завданням у процесі впровадження інтелектуальних гідравлічних приводів. Застосування енергоефективних насосів із регульованою продуктивністю дозволить мінімізувати витрати енергії, забезпечуючи при цьому високу швидкість реакції системи. Розподілені системи керування з функцією прогнозування навантаження дадуть змогу зменшити пікові навантаження на гідравлічні контури, що підвищить ресурс експлуатації компонентів і сприятиме зниженню витрат на обслуговування.

Для забезпечення надійності роботи інтелектуальних приводів у важких умовах експлуатації необхідно використовувати спеціалізовані матеріали з підвищеною зносостійкістю, стійкістю до високих температур і вібрацій. Гідравлічні рідини з покращеними характеристиками термостабільності дозволять запобігти втраті ефективності за тривалої експлуатації в екстремальних умовах. Використання резервних контурів живлення та дублюючих сенсорних систем забезпечить безперебійну роботу гальмівних приводів навіть у випадку відмови окремих елементів.

З урахуванням регуляторних обмежень важливим завданням є розроблення нормативних

стандартів, що визначають вимоги до сертифікації та випробувань інтелектуальних гальмівних систем. Для прискорення процесу впровадження необхідно розроблення галузевих рекомендацій, що містять адаптаційні механізми для поступової інтеграції адаптивних приводів у серійне виробництво. Важливою частиною цього процесу є тестування систем у реальних умовах експлуатації та створення бази даних щодо їх ефективності, що дозволить оцінити переваги технології перед широкомасштабним впровадженням.

Таким чином, ефективне застосування інтелектуальних гідравлічних приводів потребує інтеграції сучасних сенсорних систем, адаптивних алгоритмів керування, модульної архітектури та енергоефективних рішень. Створення нормативної бази та проведення широкомасштабних випробувань дозволить забезпечити економічно доцільну і безпечну інтеграцію технології в спеціалізований транспорт, що сприятиме підвищенню ефективності та безпеки його експлуатації.

Висновки. Дослідження підтвердило доцільність упровадження інтелектуальних гідравлічних приводів у гальмівні системи спеціалізованого транспорту як ефективного засобу підвищення стабільності, надійності та енергоефективності. Встановлено, що такі приводи забезпечують швидке реагування на зміну дорожніх умов, рівномірний розподіл гальмівного зусилля та зменшення зносу компонентів завдяки використанню адаптивного керування тиском. Отримані експериментальні результати свідчать про значне покращення характеристик гальмування в порівнянні з традиційними системами, зокрема в умовах змінного навантаження та низького коефіцієнта зчеплення з дорогою.

Серед основних проблем, що стримують широке впровадження інтелектуальних гідрав-

лічних приводів, виявлено технічні, економічні та регуляторні аспекти. До технічних перешкод належать складність інтеграції системи в наявні транспортні платформи, необхідність забезпечення високої надійності в умовах інтенсивної експлуатації та адаптація алгоритмів керування до різних категорій транспорту. Економічні чинники включають високу вартість запровадження, потребу в спеціалізованому сервісному обслуговуванні та тривалий термін окупності технології. З регуляторної точки зору основним викликом є відсутність уніфікованих стандартів для сертифікації та тестування таких систем, що ускладнює їх масове використання в серійному виробництві.

Рекомендовано розроблення та впровадження адаптивних алгоритмів керування, що базуються на аналізі реальних умов руху і навантаження, інтеграція високоточних сенсорних систем для контролю параметрів гальмування, а також застосування модульної архітектури приводів, що спростить процес модернізації сучасного транспорту. З метою підвищення надійності та зменшення витрат на обслуговування запропоновано використання зносостійких матеріалів, термостабільних гідравлічних рідин та резервних контурів живлення.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні ефективних методів сертифікації інтелектуальних гідравлічних приводів, дослідженні їх інтеграції в електрифіковані та автономні транспортні системи, а також у створенні адаптивних моделей оптимізації гальмівного процесу з використанням штучного інтелекту. Подальші експериментальні випробування в реальних умовах експлуатації дозволять розширити розуміння впливу таких приводів на безпеку та економічну ефективність роботи спеціалізованого транспорту.

Список літератури:

1. Hu C., Pan G., Kong L., Yu J. Research of Brake by Wire System. *Journal of Physics Conference Series*. 2023. Vol. 2479, № 1. Article 012051. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2479/1/012051>. (date of access: 14.08.2025).
2. Yang L., Yang Y., Wu G., Zhao X., Fang S., Liao X., Wang R., Zhang M. A systematic review of autonomous emergency braking system: impact factor, technology, and performance evaluation. *Journal of Advanced Transportation*. 2022. Vol. 2022, № 1. Article 1188089. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/1188089>. (date of access: 14.08.2025).
3. Watany M. Performance of a road vehicle with hydraulic brake systems using slip control strategy. *American Journal of Vehicle Design*. 2014. Vol. 2, № 1. P. 7–18. DOI: <https://pubs.sciepub.com/ajvd/2/1/2/#Cor>. (date of access: 14.08.2025).
4. Tavernini D., Vacca F., Metzler M., Savitski D., Ivanov V., Gruber P. An Explicit Nonlinear Model Predictive ABS Controller for Electro-Hydraulic Braking Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 67, № 5. P. 3990–4001. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2916387>. (date of access: 14.08.2025).

5. Zhang K., Shang H., Xu J., Niu J., Yue Y. Testing and performance analysis of an integrated electromagnetic and hydraulic retarder for heavy-duty vehicles. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 126. Article 106906. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106906>. (date of access: 14.08.2025).
6. Han W., Xiong L., Yu Z. Braking pressure control in electro-hydraulic brake system based on pressure estimation with nonlinearities and uncertainties. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 131. P. 703–727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.009>. (date of access: 14.08.2025).
7. Han W., Xiong L., Yu Z., Zhuo G., Leng B., Xu S. Integrated Pressure Estimation and Control for Electro-hydraulic Brake Systems of Electric Vehicles Considering Actuator Characteristics and Vehicle Longitudinal Dynamics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2023. Vol. 28, № 1. P. 197–209. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3119414>. (date of access: 14.08.2025).
8. Han W., Xiong L., Yu Z. A novel pressure control strategy of an electro-hydraulic brake system via fusion of control signals. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019. Vol. 233, № 13. P. 3342–3357. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407018821016>. (date of access: 14.08.2025).
9. Ji Y., Zhang J., He C., Hou X., Liu W., Han J. Wheel Braking Pressure Control Based on Central Booster Electrohydraulic Brake-by-Wire System. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2023. Vol. 9, № 1. P. 222–235. DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3204187>. (date of access: 14.08.2025).
10. Tang Q., Yang Y., Luo C., Yang Z., Fu C. A novel electro-hydraulic compound braking system coordinated control strategy for a four-wheel-drive pure electric vehicle driven by dual motors. *Energy*. 2022. Vol. 241. Article 122750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122750>. (date of access: 14.08.2025).
11. Zhou Z., Yin X., Zhang J. Coordinated Control Strategy of Electro-Hydraulic Composite Braking Torque for the Distributed Electric Vehicles. *Machines*. 2022. Vol. 10, № 12. Article 1235. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10121235>. (date of access: 14.08.2025).
12. Nadeau J., Micheau P., Boisvert M. Collaborative control of a dual electro-hydraulic regenerative brake system for a rear-wheel-drive electric vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2019. Vol. 233, № 4. P. 1035–1046. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407018754678>. (date of access: 14.08.2025).
13. Zhao X., Xiong L., Zhuo G., Tian W., Li J., Shu Q., Xu G. A Review of One-Box Electro-Hydraulic Braking System: Architecture, Control, and Application. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, № 3. Article 1049. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16031049>. (date of access: 14.08.2025).
14. Caterpillar 797F Mining Truck. Caterpillar: website. 2025. URL: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18093014.html (date of access: 14.08.2025).
15. Patria AMV XP – Number 1 in the battlefield. Patria: website. 2025. URL: <https://www.patriagroup.com/products-and-services/protected-mobility-and-defence-systems/vehicles/patria-amv-xp-number-1-in-the-battlefield> (date of access: 14.08.2025).
16. Volvo FH Series Trucks. Volvo Trucks: website. 2025. URL: <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/volvo-fh.html> (date of access: 14.08.2025).
17. Simulink: Simulation and Model-Based Design. MathWorks: website. 2025. URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. (date of access: 14.08.2025).

Kholodnyi Y.F., Polishchuk D.V., Altuhov P.M., Zhovtobryukh V.O. PROSPECTS FOR THE USE OF INTELLIGENT HYDRAULIC ACTUATORS IN THE DESIGN OF BRAKE SYSTEMS FOR SPECIALISED VEHICLES

The study explores the prospects for implementing intelligent hydraulic actuators in the brake systems of specialized automotive vehicles, including mining dump trucks, military armored vehicles, and heavy-duty trucks, taking into account current technological trends and operational requirements. It has been established that traditional hydraulic actuators have limitations in terms of response time, uniform distribution of braking force, and energy efficiency, which reduces their effectiveness under variable operating conditions. The aim of the article is to investigate the potential of integrating intelligent hydraulic actuators into the brake systems of specialized automotive transport and to assess their effectiveness in enhancing safety, operational reliability, and energy efficiency.

The research methods include modeling braking dynamics in the MATLAB/Simulink environment, analyzing the performance characteristics of both traditional and intelligent systems, and experimentally evaluating component wear, braking stability, and energy consumption. A comparative analysis of actuator response speed, load distribution uniformity, and system adaptability to changing road and load conditions was conducted.

The results confirm that the use of intelligent hydraulic actuators significantly reduces brake pad wear, ensures stable braking even under complex road conditions, and increases energy efficiency through adaptive

pressure control. It was found that the main barriers to widespread implementation of this technology include integration complexity, high equipment and maintenance costs, and regulatory uncertainty.

Measures to address the identified issues include implementing modular brake system architectures, using sensor technologies for real-time braking process monitoring, and developing updated certification regulations for intelligent actuators. Future research will focus on improving wear prediction algorithms for braking components, enhancing adaptive pressure control methods, and developing integration strategies for intelligent actuators into next-generation automotive platforms.

Key words: *automotive brake system, adaptive braking, energy efficiency, automated control, sensor technologies, wear resistance, pressure optimization, integration of intelligent systems.*

Дата надходження статті: 15.09.2025

Дата прийняття статті: 01.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025