СИСТЕМИ ПРИВОДІВ. ЕЛЕМЕНТИ І СИСТЕМИ ГІДРОПНЕВМОАВТОМАТИКИ

DOI https://doi.org/10.32782/1994-4691-2025-2-76-8
УДК 621.22:621.3

ПОРІВНЯЛЬНІЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНОГО ЛІНІЙНОГО ПРИВОДУ

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MODERN HEAVY-LOADED LINEAR ACTUATION TECHNOLOGIES

О. Є. Скворчевський, канд. техн. наук, доцент ORCID 0000-0002-4572-7305
Центр досліджень робототехніки, мехатроніки та інформатизації виробництва
e-mail: skvorchevsky.alexander@gmail.com

Анотація. Сучасне машинобудування вимагає удосконалення технологій лінійних приводів. Мета статті полягає у визначенні та систематизації основних напрямків розвитку сучасних технологій лінійних приводів у контексті концепції SMART-гідравліки та Індустрії 4.0+. Така систематизація необхідна для обґрунтування науково-технічних рішень при розробці нових систем лінійного позиціонування та управління рухом в найрізноманітніших галузях техніки. Для вирішення поставленої задачі був виконаний аналіз наукової та технічної літератури, патентів, каталогів виробників та веб-ресурсів були визначені основні напрямки розвитку сучасних технологій лінійних приводів, включаючи введення датчиків нового покоління, сучасних клапанів, рекуперації енергії, переходу від клапанного до насосного управління та інтеграції з компонентами Індустрії 4.0+. Також була проаналізована можливість заміни електрогідравлічних приводів на електромеханічні ролико-гвинтові приводи. В результаті виконаного дослідження вироблені рекомендації по вибору типу лінійного приводу, в залежності від вимог конкретної машини та галузі техніки.

Ключові слова: лінійний привод, електрогідравлічний привод, SMART-гідравліка, датчик положення, насосне керування, рекуперація енергії, Індустрія 4.0+, ролико-гвинтова передача, електромеханічний привод.

Постановка проблеми.

Всеохоплююча автоматизація різних галузей, із впровадженням концепції Індустрії 4.0+, вимагає пристроїв для точного позиціонування та управління рухом у найрізноманітніших галузях промисловості, серед яких будівельне обладнання, сільськогосподарські машини, підйомні механізми, аерокосмічна техніки, морське обладнання та індустріальна автоматика є основними.

Протягом останніх десятиліть відбулася інтенсивна конкуренція між електромеханічними та електрогідравлічними лінійними приводами, кожен з яких демонструє унікальні переваги та обмеження в різних контекстах застосування. Обидва ці напрямки впровадили багато інновацій в конструкції лінійних приводів. Електрогідравлічні приводні системи завдяки своїй високій питомій потужності та здатності демпфувати динамічні навантаження та вібрації залишаються домінуючою технологією у машинах, де необхідні великі потужності та експлуатація в складних умовах навколишнього середовища. Однак конструктивні рішення, закладені в серійні електрогідравлічні лінійні приводи, наразі залишаються на рівні 1980-х років XX століття. Прогрес досягнутий переважно у сфері інтеграції електрогідравлічних приводів з електронними компонентами.

Водночас електромеханічні приводи, завдяки ширшому впровадженню планетарних ролико-гвинтових та кулько-гвинтових передач, наздоганяють гідравлічні приводи по показникам питомої потужності. Проте їхня чутливість до динамічних навантажень та обмеження в застосуванні при великих ударних діях все ще залишаються критичними факторами вибору в багатьох застосуваннях. Також відкритими залишаються питання динамічних характеристик планетарних ролико-гвинтових та кулько-гвинтових передач порівняно із електрогідравлічними лінійними приводами.

Розвиток концепції SMART-гідравліки, поряд з принципами Індустрії 4.0+, відкриває нові можливості для трансформації технологій лінійних приводів. Інтеграція датчиків нового покоління, цифрових систем управління, рекуперації енергії та переходу від клапанного до насосного управління створює передумови для якісно нового рівня функціональності та енергоефективності.

Мета даної роботи полягає у визначенні та систематизації основних напрямків розвитку сучасних технологій лінійних приводів у контексті виникаючої концепції SMART-гідравліки та Індустрії 4.0+. Така систематизація необхідна для обґрунтування науково-технічних рішень при розробці нових систем лінійного позиціонування та управління рухом в найрізноманітніших галузях техніки.

Аналіз останніх досліджень.

Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених науковим основам розробки, виробництва та експлуатації електрогідравлічних приводів та електромеханічних приводів, ця тематика залишається актуальною через широке застосування лінійних приводів у найрізноманітніших галузях техніки. Звіт компанії McKinsey & Company [1] є одним із найновіших та найбільш комплексних узагальнень тенденцій розвитку гідравлічного обладнання. Звіт показує, що в багатьох промислових галузях, зокрема в сфері переробки та виготовлення продукції з високим енергоспоживанням, SMART-гідравлічні системи мають величезний потенціал застосування. Незважаючи на обмежене впровадження на даному етапі, SMART-гідравлічні системи вже допомагають зменшити витрати у виробничих процесах. Зростання цін на енергоносії буде ще більше стимулювати впровадження SMART-гідравлічних систем. Однією з найперспективніших технологічних розробок, яка розглядається в контексті SMART-гідравліки, є одночасна оптимізація енергетичних потоків та параметрів управління. Така оптимізація перебуває на ранній стадії розвитку, проте впровадження та масштабування дадуть результати у найближчому часі. По мірі того, як SMART-гідравліка розповсюджується все ширше, як серед кінцевих користувачів, так і серед виробників обладнання, ранні послідовники тренду мають можливість отримати суттєві конкурентні переваги. На основі практичних економічних обґрунтувань авторами звіту було продемонстровано, що технологічні стрибки в SMART-гідравліці можуть призвести до поліпшення енергоефективності та інших конкурентних переваг, а також до появи нових бізнес-моделей у сфері промислового та мобільного гідравлічного обладнання [1]. Дослідження та впровадження перспективних застосувань SMART-гідравліки не вимагають тривалої підготовки або великих первинних капітальних вкладень. Активне впровадження цих технологій вже забезпечує швидкі результати та сприяє прискореному отриманню вигід від повного потенціалу SMART-гідравліки. Враховуючи поточні тенденції в енергетичній політиці та швидке зростання цін на енергоносії, поліпшення енергоефективності може забезпечити все більш важливу конкурентну перевагу [1].

Лінійні електрогідравлічні приводи модульної конструкції будуть являти собою важливі компоненти SMART-гідравлічних систем. Протягом останніх років опубліковано значну кількість досліджень та розробок у різних напрямках їх удосконалення. Так в статті [2] завдяки проведеному комплексному аналізу та узагальненню науково-технічної літератури стало можливим визначити основні

напрямки розвитку автономних лінійних електрогідравлічних приводів у контексті розвитку концепції SMART-гідравліки. Ці напрямки такі:

- впровадження насосно-керованих приводів замість клапанно-керованих. Цей процес має супроводжуватися дослідженням впливу переходу до насосно-керованих систем на динамічні характеристики приводів та розробкою стратегій для пом'якшення будь-якого потенційного зниження динамічних характеристик;
- споживання потужності насосом безпосередньо від двигуна внутрішнього згоряння в мобільних машинх;
- створення комплексних стратегій енергоспоживання, що включають енергоефективні компоненти автономних лінійних електрогідравлічних приводів, системи рекуперації енергії та інтелектуальні алгоритми керування для оптимізації загальної енергоефективності приводів.
- покращення динамічних характеристик автономних лінійних електрогідравлічних приводів шляхом регулювання швидкості та сили гідроциліндра не шляхом збільшення тиску в порожнинах, а шляхом його зниження з певного максимального значення [3];
- використання компактного розташування на одному клапані, наприклад, функція блокування порожнин гідроциліндра за відсутності керуючого сигналу та регулювання тиску робочої рідини [3];
- використання компактних клапанів, які виконують кілька функцій, та/або гідравлічних приводів з насосним керуванням, зменшить масу та габарити автономних лінійних електрогідравлічних приводів, а отже підвищить їх питому потужність;
- використання SMART-рідин, таких як феромагнітні рідини;
- продовження досліджень біологічно розкладних гідравлічних рідин для зменшення впливу гідравлічних систем на навколишнє середовище.

Гідравлічні приводи, як з клапанним керуванням так насосним керуванням широко використовуються в машинобудівному обладнанні. але гідравлічні технології з керуванням клапанами мають очевидні недоліки, такі як нижчий коефіцієнт використання потужності через неминучі втрати на дроселювання та надлишок виробляємої насосом потужності. Гідравлічні приводи з насосним керуванням можуть підвищити енергоефективність всієї гідравлічної системи завдяки усуненню цих втрат енергії та подоланню недоліків технології з клапанним керуванням. Електрогідравлічний привод з насосним керуванням це система керування насосом з величезними перевагами питомої потужності, низького споживання енергії та компактної конструкції. Як наслідок, дослідження електрогідравлічних приводів з насосним керуванням поступово стали гарячою темою в галузі передачі та керування потужністю рідини. Робота [4] представляє розвиток електрогідравліки у трьох основних галузях, що включають аерокосмічну промисловість, машинобудування та робототехніку, від зародження до сьогодення, з метою з'ясування основних питань та труднощів у проєктуванні та застосуванні електрогідравлічних агрегатів, а також обговорення подальших тенденцій розвитку гідравлічних технологій передачі потужності. Викладений в документі [4] зміст не лише є цінним вичерпним джерелом інформації щодо електрогідравлічних систем для науковців, але й надає вагомий орієнтир для майбутніх досліджень щодо високої щільності потужності та енергоефективної гідравлічних приводів. В роботі [4] підкреслюється перспективність розробки та застосування саме електрогідравлічних приводів з насосним керуванням.

Перспективним напрямком досліджень електрогідравлічних приводів є розробка наукових основ впровадження новітніх алгоритмів керування, таких як машинне навчання, ШІ тощо. Так у статті [5] представлено скоординовану стратегію керування електрогідравлічною композитною гальмівною системою в електромобілях з вбудованим двигуном для покращення рекуперації енергії та безпеки гальмування.

Новий гідравлічний блок керування без редукційного клапана розроблено для спрощення структури та максимізації використання енергії. На основі ідеального розподілу гальмівного зусилля, стратегія розподілу зусиль координує гальмування двигуном та гідравлікою в різних режимах, гарантуючи, що крутний момент двигуна може компенсувати загальний гальмівний момент, коли відбувається блокування коліс. Запропоновано стратегію антиблокувальної системи гальмування (ABS), яка спирається виключно на регулювання крутного моменту двигуна, підтримуючи постійний гідравлічний крутний момент, одночасно швидко стабілізуючи ковзання в межах 13–17%, тим самим уникаючи взаємодії між гідравлічним та моторним гальмуванням. Спільна платформа Simulink-AMESim-CarSim оцінює стратегію за різних умов, а реальні випробування транспортних засобів у рекуперативному режимі підтверджують доцільність та плавне перемикання. Результати показують, що запропонований підхід досягає цільової інтенсивності гальмування, покращує рекуперацію енергії, зменшує коливання крутного моменту та дії клапанів, а також підтримує стабільність. Дослідження пропонує практичне рішення для інтеграції рекуперативного гальмування та ABS в електромобілі з вбудованим двигуном, з потенціалом для апаратної перевірки та розширених застосувань контролю стійкості [5]. Статті [6-8] також присвячені сучасним стратегіям керування електрогідравлічними системами. Сучасні методи керування електрогідравлічними приводами дозволяють їх інтеграцію з такими компонентами Індустрії 4.0+, як цифрові двійники, інтернет речей тощо [3, 9-11].

Як було вказано вище перехід від клапанного керування до насосного керування є одним з найперспективніших напрямків розвитку електрогідравлічних приводів. Робота [12] була однією із перших в цьому напрямку. В ній досліджуються можливості використання електричних сервоприводів для керування гідравлічними підйомними системами безпосередньо за допомогою гідравлічної машини з електросерводвигунним приводом та забезпечення рекуперації енергії в них. У цій роботі проводиться та аналізується моделювання та випробування електрогідравлічної системи підйому та опускання вилового навантажувача з двома зонами підйому. Визначено ефективність та коефіцієнти енергозбереження експериментальної системи приводу для зон вільного підйому та другої зони підйому модифікованого промислового навантажувача з різними швидкостями та корисним навантаженням. Максимально досягнуте значення енергозбереження в системі рекуперації потенційної енергії становило 50% для максимального випробуваного корисного навантаження 1000 кг та максимальної швидкості вил 0,5 м/с для другої зони підйому. Визначено ефективність та енергоспоживання експериментальної системи приводу та її компонентів. Результати [12] набули подальшого розвитку в дослідженнях викладених в статтях [13-15]. Отже перехід до насосного керування забезпечує модульність конструкції електрогідравлічного приводу, підвищення питомої потужності та енергоефективності електрогідравлічного приводу, порівняно із клапанним керуванням. Однак, питання динамічних характеристик електрогідравлічних лінійних приводів з насосним керуванням, порівняно з традиційними клапано-керованими приводами залишаються відкритими. В цьому контексті публікації в яких розглядаються гібридний клапано-насосний спосіб регулювання викликають особливу цікавість [16].

Основним конкурентом вищенаведених електрогідравлічних приводів є електромеханічні приводи лінійного руху. До переваг електромеханічних приводів відноситься відсутність можливих витоків масла та перетворення електричної енергії безпосередньо в механічну. Однак завдяки високій питомій потужності та можливості гасіння ударів та вібрацій, електрогідравлічні приводи зайняли стійку нішу в аерокосмічній галузі, будівельній техніці, сільськогосподарській техніці тощо. Ситуація змінилася з появою планетарних кулько-гвинтових та роликово-гвинтових лінійних сервоприводів, які їх виробники позиціонують як конкурентів електрогідравлічним лінійним сервоприводам [17-20]. У роботі [21] наведено рекомендації щодо вибору між

автономними електрогідравлічними та електромеханічними циліндрами.

Оскільки мова в статті іде про високонавантажений лінійний привод, то в рамках даної роботи, пневматичні та інші типи приводів не розглядаються.

Методологія дослідження.

У дослідженні застосовано комплексний аналітичний підхід, спрямований на систематизацію сучасних технологій високонавантажених лінійних приводів у контексті концепції SMART-гідравліки та Індустрії 4.0+.

Основою методології є поетапний порівняльний аналіз електрогідравлічних та електромеханічних лінійних приводів. Через обмежений розмір статті використовувались тільки підходи якісного аналізу для вищенаведених характеристик. Пневматичні та інші типи приводів не розглядаються через їх обмежену придатність для високонавантажених застосувань. Було виконано огляд наукових публікацій, звітів провідних консалтингових компаній, патентних описів, каталогів виробників та технічної документації, присвячених розвитку електрогідравлічних і електромеханічних лінійних приводів.

Формування початкового масиву джерел здійснювалось за ключовими словами, наведеними в анотації та ключових словах статті, з подальшим «сніжковим» розширенням переліку джерел через списки літератури в релевантних роботах та наукометричні бази даних.

Для узгодження висновків з різних джерел застосовано метод якісного контент-аналізу, що дозволив виділити типові тенденції та суперечності в інтерпретації переваг і недоліків розглянутих технологій. Виконано порівняльний аналіз визначених технологій високонавантажених лінійних приводів на основі уніфікованої системи критеріїв. До цієї системи включено: показники питомої потужності, рівень енергоефективності (у тому числі можливість рекуперації потенційної енергії), чутливість до динамічних навантажень і вібрацій, складність конструкції, вимоги до обслуговування, ризик витоків робочої рідини, а також потенціал інтеграції з цифровими системами керування та Інтернетом речей. Окремо порівнювались доступні дані щодо динамічних характеристик та обмежень роботи в умовах ударних навантажень, що є критичними для високонавантажених застосувань.

Такий підхід дозволяє узгоджено оцінити конкурентоспроможність електрогідравлічних і електромеханічних технологій у сегменті високонавантажених лінійних приводів та сформувати обґрунтовані рекомендації для подальших досліджень і практичних застосувань.

Результати дослідження.

В результаті проведеного вище аналізу було виявлено шість основних перспективних технологій високонавантаженого лінійного приводу. Коротко розглянемо їх усі.

Найбільш опрацьованою технологією є клапано-керований електрогідравлічний привод. Цей тип привода розглянутий в багатьох публікаціях, наприклад [2].

На рис. 1 представлений насосно-керований електрогідравлічний привод на базі електромотору зі змінною частотою обертання валу фірми Kyntronics (США) [22].

SMART електрогідравлічний привод від Kyntronics [22] має модульну конструкцію, яка поєднує в собі електромотор (2) зі змінною частотою обертання вала, насос (1) та гідравлічний циліндр (3), компенсуючу ємність для надлишку робочої рідини та канали для циркуляції робочої рідини (5) і (6) (рис. 1). Гідравлічна частина модульного приводу [22] повністю інкапсульована, що дозволяє зменшити проблеми забруднення робочою рідиною оточуючого середовища. Використання електроніки робить SMART електрогідравлічний привод [22] придатним для підключення до Інтернету речей та інших комунікаційних систем, а відсутність клапанів та інших зайвих механічних

компонентів підвищує його довговічність. Завдяки легкому масштабуванню, компактному розміру та модульності системи їй можна розміщувати в невеликих порожнинах машин. Крім того, використання принципу «живлення на вимогу» оптимізує енергоефективність.

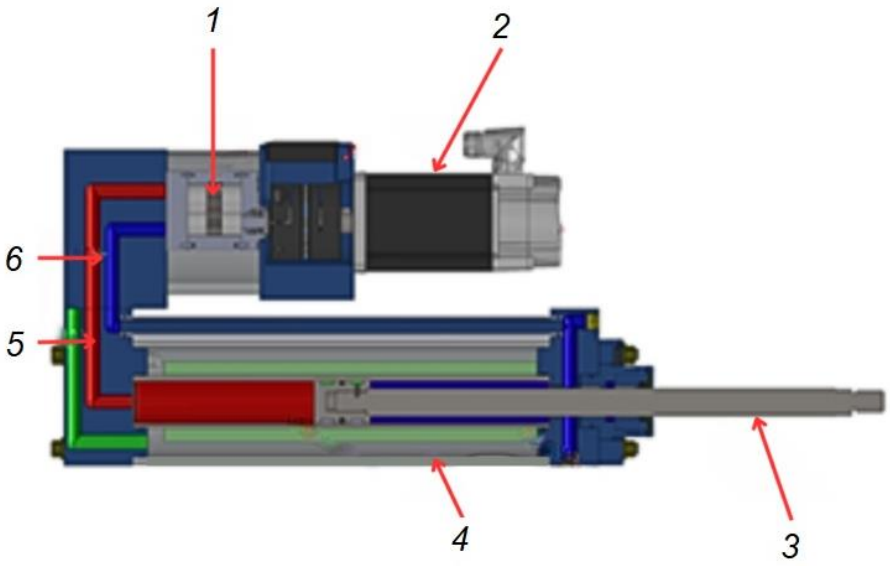


Рис. 1. Гібридний привод модульної конструкції фірми Kyntronics [22]:
1 – насос; 2 – електромотор з перемінною частотою обертання валу; 3 – гідроциліндр; 4 – компенсуюча ємність для надлишку робочої рідини; 5 та 6 – канали для циркуляції робочої рідини.

Принцип «живлення на вимогу» полягає в тому, що електромотор видає в систему лише стільки потужності скільки потрібно для виконання робочих переміщені із робочими навантаженнями. Також суттєвою перевагою SMART електрогідравлічних приводів від Kyntronics [22] є можливість використання як електромотору змінного струму із частотним регулюванням так і електромотору постійного струму з електронним регулюванням частоти обертання валу [22, 23]. Також SMART електрогідравлічних приводи від Kyntronics можуть буди оснащені датчиками по положенню поршня зі штоком та тиску в робочих порожнинах гідроциліндру [22, 23]. Незважаючи на перспективність технології регулювання швидкості переміщення поршня зі штоком гідравлічного циліндру шляхом регулювання частоти обертання валу електромотора та насоса, суттєвим недоліком є заявлена розробниками [22, 23] залежність швидкості руху поршня зі штоком гідроциліндра від навантаження на штоці. Це обмежує їх використання в мобільних машинах та багатьох інших застосунках.

Існує багато наукових публікацій, присвячених електрогідравлічним приводам із насосним керування, наприклад [14, 24, 25]. У них у всіх обґрунтовуються переваги електрогідравлічних приводів такого типу. Суттєвою перевагою таких приводів є можливість рекуперації потенційної механічної енергії у електричну [26].

Принцип насосного керування може бути реалізований не тільки шляхом керування частотою обертання валу електромотора, але і шляхом використання насоса зі змінним робочим об’ємом, наприклад як показано у статті [27]. Насосному способу керуванням електрогідравлічним приводом шляхом використання насоса зі змінним робочим об’ємом присвячено значно менше публікацій, ніж приводом с регульованим електромотором. Це може бути пов’язано із усе більшим використанням у різних галузях техніки електродвигунів із частотним регулюванням.

Не вдалось виявити публікації в яких би детально порівнювалися динамічні характеристики електрогідравлічних приводів із насосним та клапанним керуванням. Тим не менш, порівнюючи фізику процесу керування потоком робочої рідни шляхом

зміни положення золотника або клапанного елементу (клапанне керування) та якоря електричного мотора з рухомими частинами насоса, можна стверджувати, що насосне керування не може конкурувати з клапанним по якості динамічних характеристик. Це твердження обумовлено порівнянням інерційних характеристик рухомих частин для насосного та клапанного керування електрогідравлічними приводами лінійного руху. З огляду на вищесказане, перспективним вбачається комбінований клапано-насосний спосіб керування [16]. В електрогідравлічному приводі з комбінованим клапано-насосним керуванням (pump-valve compound drive system (PCDS)) для компенсації залежності швидкості від навантаження введені клапани та датчики зворотного зв'язку по тиску в порожнинах гідроциліндра (рис. 2) [16].

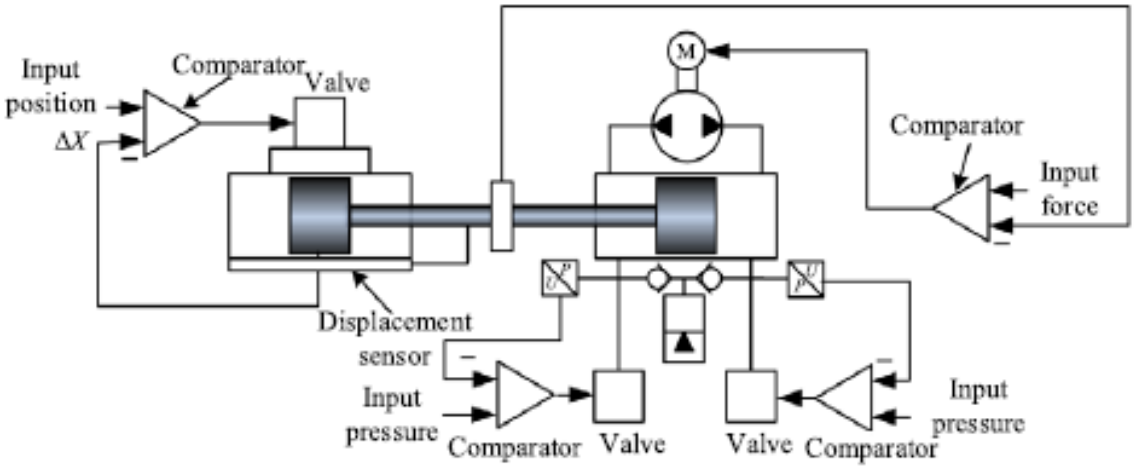
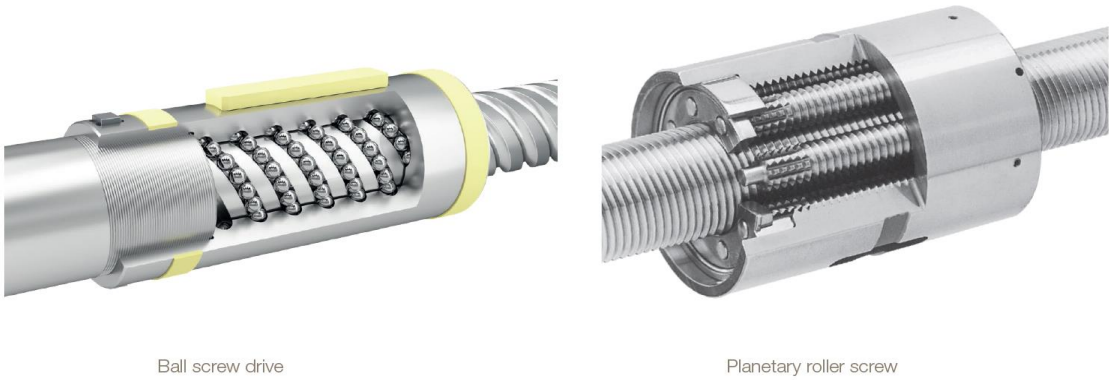


Рис. 2. Електрогідравлічний привод з клапано-насосним регулюванням з платформою для його тестування [16]

В тезах доповідей [20] оцінено можливості заміни електрогідравлічних приводів на електромеханічні лінійні приводи з планетарними роликово-гвинтовими передачами (рис. 3, б) [28]. Показано, що електромеханічні приводи на основі планетарних ролико-гвинтових передач становлять серйозну конкуренцію електрогідравлічним приводам по значенню питомої потужності. Технологія планетарних ролико-гвинтових передач добре відпрацьована, серед основних виробників електромеханічних приводів на їх основі потрібно назвати Parker Hanifin [28, 29], Tolomatic [30], Ewellix [31] та інші бренди.



а **б**

Рис. 3. Механічні перетворювачі обертального руху у лінійний рух: а – кульково-гвинтова передача; б – планетарна роликово-гвинтова передача [28]

Серед недоліків електромеханічних приводів на основі планетарних ролико-гвинтових передач потрібно назвати їх чутливість до вібрацій та ударних навантажень,

через прецизійність такої передачі та відсутності демпфуючих елементів. Питання динамічних характеристик електромеханічних приводів на основі планетарних ролико-гвинтових передач порівняно із електрогідравлічними приводами залишаються відкритими. В ході даного аналізу не вдалося виявити публікації з їх динамічними характеристиками.

Також зацікавленість викликають електромеханічні лінійні приводи на основі кульково-гвинтових передач. В огляді [28] проводиться порівняння електромеханічних лінійних приводів на основі кульково-гвинтових та планетарних ролико-гвинтових передач. Показано, що для заданого розміру зовнішнього циліндра планетарні ролико-гвинтові передачі потребують більшої гайки, що змушує використовувати тонший вал гвинта та зменшує практичну вантажопідйомність і термін служби, незважаючи на їх теоретичну перевагу в лінійному контакті. Parker демонструє, що 63-міліметровий кульковий гвинт у ETH125M20 досягає вищого динамічного навантаження та значно довшого терміну служби при 30 кН, ніж аналогічні планетарні роликово-гвинтові передачі, особливо ті, що мають вбудовані електричні серводвигуни.

Висновки.

В статті показано, що конкуренція між електрогідравлічними та електромеханічними приводами на сучасному етапі не призводить до однозначного витіснення однієї технології іншою, а формує поле для їх раціонального поєднання та цільового застосування залежно від вимог конкретних задач. Встановлено, що класичні клапано-керовані приводи, незважаючи на тривалий період експлуатації та певну стагнацію конструктивних рішень, залишаються еталонними з точки зору динамічних характеристик та здатності демпфувати ударні навантаження. Їх недоліками є втрати енергії на дроселювання та надлишкова потужність насосних агрегатів у порівнянні з більш сучасними рішеннями.

Перехід до насосно-керованих електрогідравлічних систем, у тому числі на основі електромоторів зі змінною частотою обертання валу та/або насосів змінного робочого об’єму, є одним з ключових трендів розвитку SMART-гідравліки. Такі системи забезпечують істотне підвищення енергоефективності за рахунок «живлення на вимогу», можливості рекуперації потенційної енергії та зменшення втрат на дроселювання, що особливо актуально в умовах зеленого переходу. Разом з тим, через більшу інерційність рухомих елементів насосно-керовані приводи можуть мати гірші динамічні характеристики у порівнянні з клапанно-керованимию.

Перспективним компромісним рішенням визнано комбіновані клапано-насосні системи керування (pump-valve compound drive systems, PCDS), у яких поєднуються енергоефективність насосного керування та динамічні переваги клапанних модулів.

Аналіз електромеханічних приводів на основі планетарних ролико-гвинтових передач показав, що вони наближаються до електрогідравлічних систем за рівнем питомої потужності та часто перевершують їх з точки зору компактності, відсутності витоків робочої рідини, простоти інтеграції з досягненнями Індустрії 4.0+. Каталоги провідних виробників підтверджують високу технологічну готовність таких приводів для застосування в широкому спектрі задач, включно з важконавантаженими сервосистемами. Однак їх чутливість до вібрацій та ударних навантажень, обмежують їх як повноцінну альтернативу електрогідравлічним приводам у найважчих режимах роботи. Електромеханічні приводи на основі кулько-гвинтових передач у ряді випадків демонструють кращі показники динамічних навантажень та довговічності порівняно з планетарними ролико-гвинтовими передачами при однакових габаритах.

З урахуванням проведеного аналізу виділено шість основних перспективних технологій високонавантажених лінійних приводів. До них належать: класичні клапано-керовані електрогідравлічні приводи; насосно-керовані електрогідравлічні приводи на основі регульованих електромоторів; насосно-керовані системи зі змінним робочим

об’ємом насоса; комбіновані клапано-насосні системи керування; електромеханічні приводи на основі планетарних ролико-гвинтових передач; електромеханічні приводи на основі кулько-гвинтових передач. Кожен з цих напрямків має власну нішу застосувань, що визначається поєднанням вимог до питомої потужності, енергоефективності, динамічних характеристик, надійності та вартості придбання та експлуатації.

Практична значущість отриманих результатів полягає у формуванні обґрунтованих рекомендацій щодо вибору технології лінійного приводу залежно від вимог конкретної машини та галузі техніки.

Разом з тим проведений аналіз виявив низку «білих плям» у науковій і технічній літературі, які визначають пріоритетні напрями подальших досліджень. Серед перспектив подальших досліджень потрібно назвати наступні. Виконання експериментальних та чисельних досліджень, в яких би безпосередньо порівнювалися динамічні характеристики різних типів високонавантажених лінійних приводів. По-друге, вимагає подальшого розвитку методологія інтеграції SMART-гідравлічних та електромеханічних приводів з компонентами Індустрії 4.0+ і майбутніх концепцій Індустрії 5.0, зокрема цифрових двійників, систем на основі штучного інтелекту, адаптивних стратегій керування, заснованих на машинному навчанні, та розподілених мережевих архітектур керування. Синергійне поєднання таких підходів дозволить не лише підвищити енергоефективність і надійність, а й створити нові бізнес-моделі експлуатації приводних систем (наприклад, «привод як сервіс»), орієнтовані на життєвий цикл обладнання. Узагальнюючи, результати даної роботи демонструють, що розвиток технологій високонавантажених лінійних приводів відбувається у напрямку переходу від окремих компонентів до інтегрованих, інтелектуальних, енергоефективних та мережево орієнтованих систем, здатних гнучко адаптуватися до змінних умов експлуатації. Подальший прогрес у цій галузі значною мірою залежатиме від поєднання інженерних досліджень у сфері мехатроніки з сучасними досягненнями в галузі цифрових технологій, штучного інтелекту та кіберфізичних систем.

Список використаних джерел.

1. McKinsey & Company. Smart fluid hydraulics: Preparing for the imminent revolution in the fluid systems industry. August 2, 2022. URL: https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/smart-fluid-hydraulics-preparing-for-the-imminent-revolution-in-the-fluid-systems-industry

2. Skvorchevsky A. Identification of the Directions of Self-contained Linear Electrohydraulic Actuators’ Development in the Context of Smart-Hydraulics Concept Emerging. ICoRSE-2024: *International Conference on Reliable Systems Engineering, Springer, Cham*, 2024. 328–338. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70670-7_28

3. Skvorchevsky, A. Electronic Load Sensing for Integrating Electro-Hydraulic Mechatronic Actuators with Industry 4.0 and 5.0 Components. ICoRSE-2023: *International Conference on Reliable Systems Engineering, Springer, Cham*, 2023. 440–455. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7_37

4. Zengguang L., Sun J., Yue D., Zuo X., Gao H., Feng K. A review on integral evolution of electro-hydraulic actuation in three momentous domains: aerospace, engineering machinery, and robotics. MEMAT 2023: *Fourth International Conference on Mechanical Engineering, Intelligent Manufacturing, and Automation Technology*, 2023. 13082. 141–159. https://doi.org/10.1117/12.3026210

5. Li H., Jin L, Li J., Xiao F., Wang Z., Zhang G. Braking Force Coordination Control for In-Wheel Motor Drive Electric Vehicles with Electro-Hydraulic Composite Braking System. *Vehicles*, 2025. 7 (4). 1–29. https://doi.org/10.3390/vehicles7040119

6. Rui J., Huang H., Li L., Zuo H., Gan L., Sam S., Liu Z. Artificial intelligence enabled energy-saving drive unit with speed and displacement variable pumps for electro-hydraulic systems. IEEE *Transactions on Automation Science and Engineering*? 2023. 2 (3). 3193–3204. https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3276766

7. Aziz K. A., Fekry M., El-Bardini M., El-Nagar A. M. Deep reinforcement learning-based

adaptive fuzzy control for electro-hydraulic servo system. *Neural Computing and Applications*, 2025. 1–18. https://doi.org/10.1007/s00521-024-10741-x

8. Grzegorz F. Artificial intelligence methods in hydraulic system design. *Energies*, 2023. 8. 3320. https://doi.org/10.3390/en16083320

9. Skvorchevsky, A. Comparative Analysis of Current Approaches to Digital Twins of Electro-Hydraulic Mechatronic Systems Creations. Proceedings of 2023 International Conference on Hydraulics and Pneumatics – HERVEX, 2023. 1–5. URL: https://fluidas.ro/hervex/proceedings2023/001-005.pdf

10. Berri, P. C., Dalla Vedova M. D. L. A Review of Simplified Servovalve Models for Digital Twins of Electrohydraulic Actuators. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. 1603 (1). 012016. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1603/1/012016

11. Скідан, В. В., Ніконов О. Я., Бутенко Л. П. Архітектура інтелектуального інформаційно-керуючого комплексу наземних мобільних роботизованих платформ. *Проблеми інтеграції освіти, науки та бізнесу в умовах глобалізації*. Київський національний університет технологій та дизайну, 2024. С. 162–163.

12. Minav, T. A., Lasse IE L., Juha J. P. Analysis of electro-hydraulic lifting system's energy efficiency with direct electric drive pump control. *Automation in construction*, 2013. 30. 144–150. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.009

13. Zheng C., Helian B., Zhou Y., Geimer M. An integrated trajectory planning and motion control strategy of a variable rotational speed pump-controlled electro-hydraulic actuator. IEEE/ASME *Transactions on Mechatronics*, 2022. 28 (1). 588–597. https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3209873

14. Zakharov, V., Minav T. Influence of hydraulics on electric drive operational characteristics in pump-controlled actuators. *Actuators*, 2021. 10 (12). 1–17. https://doi.org/10.3390/act10120321

15. Tong G., Wu B., Lin T., Chen H., Chen Q. Closed-circuit pump-controlled electro-hydraulic steering system for pure electric wheel loader. *Applied Sciences*, 2022. 12 (11). 5740. https://doi.org/10.3390/app12115740

16. Kaixian B., Wang Y., He X., Wang C., Yu B., Liu Y., Kong X. Force compensation control for electro-hydraulic servo system with pump-valve compound drive via QFT–DTOC. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2024. 37. 27. https://doi.org/10.1186/s10033-023-00988-1

17. Electric cylinders CEMC. EWELLIX. URL: https://medialibrary.ewellix.com/asset/16213

18. IMA Integrated Motor Rod-Style Actuator. Tolomatic. URL: https://www.tolomatic.com/products/product-details/ima-linear-servo-actuators/

19. Li, X., Liu, G., Fu, X., Ma, S. Review on motion and load-bearing characteristics of the planetary roller screw mechanism. *Machines*, 2022. 10(5). 317. https://doi.org/10.3390/machines10050317

20. Skvorchevsky, A. The Possibilities Evaluation of Replacing Electro-Hydraulic Actuators with Planetary Roller Screws Linear Actuators. The 5th International Scientific Conference Computer Technologies and Mechatronics. KhNADU. Kharkiv, 2023. P. 89-93. URL: https://dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/af23c124-ca2e-42a4-845f-2d96c0e5b237/content

21. Hagen, D., Padovani, D., & Choux, M. Guidelines to select between self-contained electro-hydraulic and electro-mechanical cylinders. 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2020. P. 547-554. https://doi.org/10.1109/ICIEA48937.2020.9248373

22. How Does A Hybrid Linear Actuator Work? Kyntronics. URL: https://kyntronics.com/how-does-a-hybrid-linear-actuator-work/

23. Motion-control actuator combines advantages of electronics and hydraulics. Packiging Digest. URL: https://www.packagingdigest.com/machinery-equipment/motion-control-actuator-combines-advantages-of-electronics-and-hydraulics

24. Minav, T. A., Lasse IE L., Juha J. P. Analysis of electro-hydraulic lifting system's energy efficiency with direct electric drive pump control. *Automation in construction*, 2013. 30. 144–150. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.009

25. Zakharov, Viacheslav, and Tatiana Minav. Analysis of Frequency adjustable control of Permanent Magnet Synchronous Motor for pump-controlled actuators. *International Journal of Fluid Power*, 2023. 125–140. https://doi.org/10.13052/ijfp1439-9776.2416

26. Minav, T., Immonen, L. L., Vtorov, J. P., Niemela M. Electric energy recovery system for a hydraulic forklift – theoretical and experimental evaluation. IET electric power applications, 2011. 5 (4). 377–385. https://doi.org/10.1049/iet-epa.2009.0302

27. Imam, A., Moosa R., Ehsan J., Nariman S. Design, implementation and evaluation of a pump-controlled circuit for single rod actuators. *Actuators*, 2017. 6 (1). 10–21. https://doi.org/10.3390/act6010010

28. Ball screw drive versus planetary roller actuators. Parker Hannifin. URL: https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Electromechanical-Europe/White-Paper/Parker_White_Paper_Electro_Cylinder_ETH125.pdf

29. Electric Actuators, Planetary Roller Screw – Series XFC. Parker Hannifin. URL: https://ph.parker.com/us/en/product-list/extreme-force-electromechanical-cylinder-series-xfc

30. Roller screw technology for electric actuators. Tolomatic. URL: https://www.tolomatic.com/blog/roller-screw-technology-for-electric-actuators/

31. Electric cylinders CEMC. EWELLIX. URL: https://medialibrary.ewellix.com/asset/16213

Стаття надійшла до редакції 12.11.2025
Стаття прийнята 17.11.2025
Статтю опубліковано 15.12.2025

CC BY

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MODERN HEAVY-LOADED LINEAR ACTUATION TECHNOLOGIES

A. Skvorchevsky
Research Centre of Robotics, Mechatronics and Production Informatization

Summary

The article analyses and systematises contemporary technologies of heavy-loaded linear actuators in the context of the emerging SMART hydraulics concept and the broader framework of Industry 4.0+. The work focuses on the need to modernise linear actuation solutions in modern mechanical engineering. The main objective is to identify key development trends in linear drive technologies and to substantiate engineering decisions for new positioning and motion control systems operating under high loads. To achieve this objective, the author conducts a structured review of scientific and technical literature, patents, manufacturers' catalogues, and web resources, which makes it possible to identify the principal directions of linear actuator evolution. Particular attention is given to the competition between electrohydraulic and electromechanical linear actuators that has unfolded over recent decades, with each technology demonstrating specific advantages and limitations depending on the operating conditions and performance requirements. Electrohydraulic drive systems remain dominant in heavy-duty applications due to their high power density, robustness to dynamic loads, and capacity to damp vibrations, although their typical design solutions have largely remained at the technological level of the 1980s and have primarily been upgraded through the integration of electronic control components. Transition from valve-controlled to pump-controlled architectures was highlighted. In parallel, electromechanical actuators, supported by the increasing use of planetary roller-screw and ball-screw mechanisms, have approached hydraulic systems in terms of specific power, but they remain sensitive to shock loads and exhibit unresolved issues regarding their dynamic behavior in comparison with electrohydraulic solutions. The analysis demonstrates that, despite the rapid progress of electromechanical technologies, electrohydraulic actuators still retain significant advantages in extremely demanding operating conditions, while electromechanical solutions are increasingly attractive where high positioning accuracy and compactness are prioritised. The proposed systematisation of technological trends in heavy-loaded linear actuation can be used by designers and researchers as a methodological basis when developing next-generation positioning and motion control systems that comply with SMART hydraulics principles and Industry 4.0+ concepts.

Keywords: linear actuator, electrohydraulic actuator, SMART hydraulics, position sensor, pump control, energy recovery, Industry 4.0+, roller screw transmission, electromechanical actuator