

СЕРГЄЄВ ВІТАЛІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0006-6208-1629>e-mail: vitalij0308@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ ВИРУБНОГО ПРЕСА ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ МАХОВИКА ТА ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

У статті розглянуто питання підвищення енергоефективності електрогідролічних приводів вирубних пресів, які широко застосовуються у технологічному обладнанні машинобудівних та переробних виробництв. Проведено аналіз особливостей роботи існуючих приводів та визначено основні фактори, що обмежують їх енергетичну ефективність, зокрема нерівномірність навантаження електродвигуна та наявність значних пікових потужностей у робочому циклі преса. Обґрунтовано доцільність використання маховика як елемента накопичення механічної енергії для вирівнювання навантаження електроприводу та зниження динамічних навантажень у системі. У роботі досліджено функціональну роль маховика у складі електрогідролічного приводу вирубного преса типу ПВГ-8-1-0/ПВГ-8-2-0. Виконано розрахунок енергії та моменту інерції маховика, а також проведено його конструктивний розрахунок з урахуванням умов роботи приводу. Окрему увагу приділено застосуванню частотного перетворювача для керування електроприводом, що забезпечує плавне регулювання швидкості обертання електродвигуна та підвищує енергоефективність роботи системи. Проведено аналіз взаємодії маховика з електроприводом при частотному регулюванні. Отримані результати можуть бути використані під час модернізації існуючих вирубних пресів та при проектуванні енергоефективних електрогідролічних приводів технологічного обладнання.

Ключові слова: електрогідролічний привід, вирубний прес, частотний перетворювач, маховик, момент інерції, енергоефективність, частотне регулювання, гідролічні системи.

VITALY SERGEEV

Khmelnytsky National University

ENHANCING THE ENERGY EFFICIENCY OF AN ELECTROHYDRAULIC DRIVE IN A DIE-CUTTING PRESS USING A FLYWHEEL AND A FREQUENCY CONVERTER

This paper investigates methods to enhance the energy efficiency and dynamic performance of electrohydraulic drives in die-cutting presses, which are widely utilized in mechanical engineering and processing industries for stamping and cutting operations. Conventional drive systems often exhibit uneven motor loading, substantial peak power demands, and significant energy losses during cyclic operation. To address these challenges, the study explores the integration of a flywheel as a mechanical energy storage element, which mitigates load fluctuations, reduces dynamic stresses, and provides partial energy recovery during high-demand phases. The functional role of the flywheel is analyzed for press types PVG-8-1-0 and PVG-8-2-0, including calculations of its moment of inertia, energy capacity, and structural parameters, taking into account permissible speed variations, operational constraints, and mechanical strength considerations. In parallel, the application of a frequency converter for motor control is investigated, enabling smooth acceleration, deceleration, and real-time speed adjustment to match varying load conditions, thereby reducing peak currents, minimizing energy losses in the hydraulic system, and improving overall system reliability. The interaction between the flywheel and frequency-controlled electric drive is shown to produce a synergistic effect, optimizing energy utilization while maintaining technological performance. A systematic methodology is proposed for the design and modernization of die-cutting press drives, encompassing load analysis, flywheel parameter selection, mechanical verification, and coordinated integration of motor, pump, and control system. The novelty of the approach lies in treating the drive as a fully integrated system, where mechanical energy storage, electric drive control, and hydraulic operation are harmonized for maximum energy efficiency. The practical implications are significant, offering opportunities to modernize existing equipment, enhance operational stability, reduce energy consumption, and extend the service life of critical drive components, while supporting sustainable industrial practices.

Keywords: electrohydraulic drive, die-cutting press, flywheel, frequency converter, energy efficiency, dynamic performance, load leveling, hydraulic system optimization, mechanical energy storage, frequency control.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.05.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026

Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Сергєєв Віталій

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні технологічні процеси у машинобудуванні та суміжних галузях промисловості передбачають широке використання вирубних пресів для виконання операцій штампування та вирубання деталей. Ефективність роботи такого обладнання значною мірою визначається характеристиками його приводу [2, 3]. Електрогідролічні приводи вирубних пресів характеризуються високою потужністю та можливістю реалізації значних зусиль, однак їх робота супроводжується нерівномірним навантаженням електродвигуна та значними піковими енергетичними витратами під час робочого циклу.

Одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності таких приводів є застосування накопичувачів механічної енергії, зокрема маховиків, що дозволяють вирівнювати навантаження електроприводу та зменшувати динамічні навантаження у системі [4]. Додаткові можливості для підвищення ефективності роботи електрогідролічних приводів забезпечує використання частотних перетворювачів, які дозволяють

реалізувати плавне регулювання швидкості обертання електродвигуна та оптимізувати режими його роботи [9]. У зв'язку з цим актуальним є дослідження роботи електрогідравлічного приводу вирубного преса з використанням маховика та частотного регулювання, а також обґрунтування параметрів основних елементів такої системи.

Метою роботи є підвищення енергоефективності та покращення динамічних характеристик електрогідравлічного приводу вирубного преса шляхом застосування маховика як накопичувача механічної енергії та використання частотного перетворювача для керування електродвигуном.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам підвищення ефективності електрогідравлічних приводів технологічного обладнання присвячено значну кількість наукових досліджень. Питання оптимізації параметрів гідравлічних систем, підвищення енергоефективності приводів та вдосконалення систем керування розглянуті у роботах вітчизняних і зарубіжних науковців, зокрема О. І. Гасюка, Ю. А. Кравецького, О. В. Чернова, О. Є. Скворчевського, Д. М. Якимчука, А. К. Кармаліти та інших дослідників.

У зазначених роботах досліджуються динамічні характеристики гідроприводів, математичні моделі електрогідравлічних систем, а також можливості підвищення ефективності пресового обладнання шляхом удосконалення його конструктивних елементів і систем керування. [1, 6]. Зокрема, у працях Д. М. Якимчука та А. К. Кармаліти розглянуто шляхи підвищення ефективності електрогідравлічного пресового обладнання легкої промисловості та запропоновано конструктивні вдосконалення, що дозволяють зменшити енергоспоживання і перевантаження пресів [5].

Дослідження О. І. Гасюка присвячені математичному моделюванню та аналізу динамічних характеристик гідроприводів різного призначення, що дозволяє підвищити точність і стабільність роботи таких систем [1]. Водночас у роботах Ю. А. Кравецького та О. В. Чернова розглянуто питання підвищення динамічної точності та дослідження перехідних процесів в електрогідравлічних приводах, що є важливим для підвищення ефективності роботи сучасного технологічного обладнання [7].

Разом з тим питання використання накопичувачів механічної енергії, зокрема маховиків, у поєднанні з частотним керуванням електроприводом для підвищення енергоефективності електрогідравлічних приводів вирубних пресів потребує подальшого дослідження. Недостатньо вивченими залишаються питання визначення раціональних параметрів маховика та оцінки його впливу на енергетичні та динамічні характеристики приводу.

Виклад основного матеріалу

Електрогідравлічний привід вирубного преса працює в циклічному режимі, для якого характерне різке чергування ділянок відносно малого навантаження і короткочасних періодів інтенсивного споживання потужності. Найбільші енергетичні витрати припадають на фазу безпосереднього виконання технологічної операції, коли необхідно забезпечити значне зусилля на робочому органі преса. У цей момент електродвигун і гідросистема працюють у найбільш напруженому режимі, що призводить до появи пікових струмів, підвищених механічних та теплових навантажень, а також до зростання втрат у гідравлічній частині приводу [2].

Для вирубних пресів типу ПВГ-8-1-0 / ПВГ-8-2-0 така нерівномірність навантаження є однією з головних причин зниження загальної енергоефективності. У традиційному виконанні електродвигун вибирається за максимальним навантаженням циклу, хоча істотну частину часу система працює з меншими вимогами до потужності. У результаті встановлена потужність використовується нерационально, а частина енергії втрачається у вигляді нагріву, дроселювання та непродуктивної роботи насоса. У зарубіжних дослідженнях для промислових гідравлічних осей та електрогідравлічних приводів показано, що перехід до архітектур із регулюванням швидкості електродвигуна дає змогу зменшити дросельні втрати та краще узгодити споживання енергії з реальним навантаженням системи [9]. Аналогічно, для гідравлічних пресів пропонуються схеми з накопиченням енергії, які дозволяють зменшити встановлену потужність та перерозподілити енергію всередині робочого циклу [8].

Одним із практично доцільних способів вирівнювання навантаження є застосування маховика як накопичувача механічної енергії. Його функція полягає в тому, що в періоди відносно малого навантаження він накопичує кінетичну енергію, а в періоди пікового навантаження частково віддає її в систему. Завдяки цьому електродвигун працює рівномірніше, а максимальні перевантаження зменшуються. Для електрогідравлічного приводу преса це особливо важливо, оскільки дає змогу знизити миттєву потребу в потужності без погіршення технологічних параметрів вирубання.

У загальному випадку запас енергії, який може бути відданий маховиком, визначається залежністю

$$\Delta E_m = J/2 (\omega_1^2 - \omega_2^2),$$

де J — момент інерції маховика; ω_1 і ω_2 — відповідно кутові швидкості на початок та в кінці інтервалу віддачі енергії. Ця формула показує, що для забезпечення потрібного енергетичного ефекту важливими є не лише геометричні параметри маховика, а й допустимий діапазон зміни швидкості його обертання. Якщо допустиме зниження швидкості невелике, то для накопичення тієї самої енергії необхідний більший момент інерції. Водночас надмірне збільшення моменту інерції ускладнює пуск, збільшує масу системи та навантаження на вал, підшипники і муфти. Тому завдання полягає не в тому, щоб зробити маховик "якомога більшим", а в тому, щоб обрати раціональний компроміс між запасом енергії, масогабаритними характеристиками та динамікою приводу.

Для попереднього інженерного розрахунку доцільно виходити з енергії, яку необхідно компенсувати під час найбільш навантаженої ділянки циклу [2]. Якщо позначити її через $\Delta E_{\text{потр}}$, то необхідний момент інерції маховика можна визначити з виразу

$$J = 2\Delta E_{\text{потр}} / (\omega_1^2 - \omega_2^2).$$

У випадку, коли маховик установлюється не безпосередньо на валу двигуна, а через проміжну передачу, під час розрахунку слід приводити момент інерції до вала двигуна з урахуванням передавального числа. [1]. Це важливо, оскільки реальний вплив маховика на електропривід визначається саме приведеним моментом інерції, а не лише його власними геометричними параметрами.

Конструктивно для таких систем доцільно застосовувати маховики обідного або дискового типу. Якщо основна маса зосереджена поблизу зовнішнього радіуса, то для спрощеного розрахунку можна використовувати залежність

$$J \approx mR^2,$$

де m — маса маховика, R — характерний радіус розміщення основної маси.

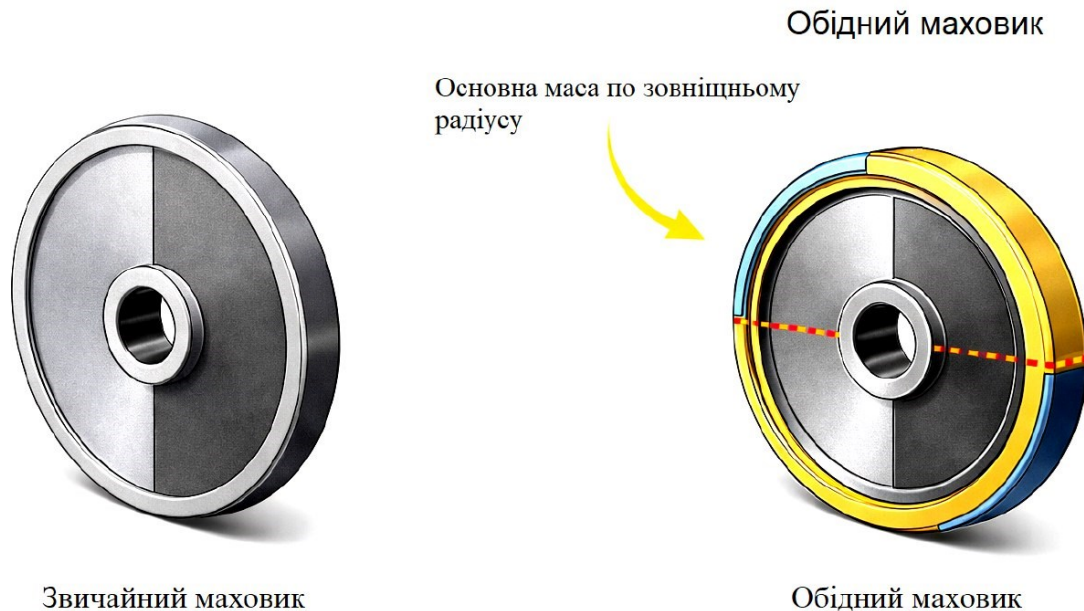


Рис.1. Технічне порівняння маховиків

Якщо ж маховик виконано у вигляді суцільного диска, то для оцінки моменту інерції використовується співвідношення

$$J = 1/2 mR^2.$$

Із цих залежностей видно, що з точки зору накопичення енергії вигідніше розміщувати масу ближче до периферії. Саме тому в енергетично навантажених приводах часто використовують конструкції, у яких більша частина матеріалу винесена до обода. Проте таке рішення вимагає ретельної перевірки міцності, оскільки зі збільшенням периферійної швидкості зростають колові напруження в матеріалі.

Для оцінки міцності маховика на стадії попереднього проектування можна використати умову, за якою максимальні робочі напруження не повинні перевищувати допустимі для вибраного матеріалу:

$$\sigma_{\text{max}} \leq [\sigma].$$

У спрощеному вигляді для тонкого обода колові напруження залежать від густини матеріалу, кутової швидкості та радіуса обертання. Це означає, що вибір діаметра маховика не може здійснюватися ізольовано від вибору частоти обертання. На практиці це приводить до потреби комплексного розрахунку: збільшення радіуса покращує енергетичні властивості, але одночасно підвищує вимоги до міцності, балансування та точності виготовлення.

Окремої уваги потребує питання динамічної сумісності маховика з електродвигуном і насосом. Якщо маховик приєднується до вала приводу жорстко, то на всіх перехідних режимах він безпосередньо впливає на розгін і гальмування системи. У такому випадку доцільно застосовувати частотний перетворювач, оскільки саме він дає змогу керувати динамікою пуску, обмежувати пускові струми та плавно змінювати швидкість обертання двигуна [7, 9]. Для електрогідравлічних приводів зі змінним навантаженням такий підхід уже добре показав себе в сучасних дослідженнях: регулювання швидкості двигуна дає змогу зменшити непродуктивні втрати, а в поєднанні з більш ефективною архітектурою гідроприводу забезпечує помітно кращий енергетичний режим роботи системи.

У межах цього дослідження частотний перетворювач доцільно розглядати не просто як пускорегулювальний пристрій, а як елемент системи енергетичної координації. Його використання дозволяє реалізувати кілька важливих режимів:

- по-перше, плавний розгін системи до робочої швидкості перед початком навантаженої ділянки циклу;

- по-друге, зниження швидкості обертання двигуна в паузах між робочими ходами, коли повна продуктивність насоса не потрібна;
- по-третє, підтримання такого закону зміни швидкості, за якого енергія маховика використовується не хаотично, а в заздалегідь визначений момент циклу;
- по-четверте, обмеження ударних навантажень на валопровід, муфти та насосну групу.

З практичної точки зору найбільш раціональним є такий алгоритм роботи системи. На холостій ділянці циклу електродвигун працює на зниженій частоті, забезпечуючи лише ту подачу гідронасоса, яка реально потрібна. Перед входом у зону різкого зростання навантаження частотний перетворювач збільшує швидкість обертання двигуна до заданого рівня, а маховик накопичує додаткову кінетичну енергію. Під час самої операції вирубання частина енергії надходить від двигуна, а частина — від маховика. Після завершення пікової фази система знову переходить у більш економний режим.

Такий підхід дає змогу не лише знизити пікову потужність, а й покращити умови роботи гідравлічної частини приводу. При традиційному нерегульованому приводі насос часто працює в режимах, коли фактична потреба в подачі не відповідає його продуктивності, що змушує систему скидати надлишкову енергію через регульовальні елементи. При частотному керуванні цей недолік істотно послаблюється: продуктивність насоса наближається до фактичної потреби, а отже зменшуються втрати на дроселювання, нагрів робочої рідини та потреба в додатковому охолодженні.

Слід також врахувати, що сам по собі маховик не вирішує всіх проблем приводу [8]. Якщо його встановити без узгодження з режимом двигуна, можна отримати лише частковий ефект: піки навантаження справді зменшаться, але загальна енергоефективність системи залишиться обмеженою через втрати в насосі та гідроапаратурі. Саме тому найбільш доцільним є не окреме застосування маховика або частотного перетворювача, а їх спільне використання як двох взаємопов'язаних елементів однієї системи.

На підставі виконаного аналізу можна сформулювати узагальнений порядок розрахунку модернізованого приводу вирубного преса:

- визначення діаграми навантаження та енергії, необхідної на найбільш навантаженій ділянці циклу;
- вибір допустимого інтервалу зміни кутової швидкості маховика;
- розрахунок потрібного моменту інерції;
- визначення конструктивного типу, матеріалу та геометричних параметрів маховика;
- перевірка міцності та динамічного балансування;
- вибір частотного перетворювача за потужністю, перевантажувальною здатністю та можливістю реалізації заданого закону керування;
- узгодження параметрів двигуна, насоса та маховика в межах спільної системи керування.

Висновки

Отже, наукова новизна запропонованого підходу полягає в тому, що підвищення енергоефективності електрогідравлічного приводу вирубного преса розглядається не як локальна оптимізація окремого вузла, а як узгодження трьох підсистем: електродвигуна з частотним регулюванням, гідравлічної частини приводу та механічного накопичувача енергії у вигляді маховика. Уточнено підхід до вибору моменту інерції маховика для циклічного пресового обладнання з урахуванням допустимого діапазону зміни кутової швидкості й ролі частотного перетворювача у формуванні енергетично доцільного режиму роботи.

Крім того, практичне значення роботи полягає в тому, що отримані положення можуть бути використані під час модернізації наявних вирубних пресів без повної заміни їх конструктивної схеми. Запропонований підхід дозволяє зменшити нерівномірність навантаження електродвигуна, знизити пікові струми, покращити тепловий режим гідросистеми та підвищити ресурс елементів приводу. Для підприємств це важливо не лише з точки зору енергозбереження, а й з точки зору стабільності технологічного процесу.

Література

1. Гасюк О. І. Математичне моделювання електрогідравлічних приводів технологічного обладнання // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – №33. – С. 58-63.
2. Засицький О.М., Клітний В.В. Розробка енергоефективної системи приводу гідравлічного вертикального преса // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доп. 31-ї Міжнародної наук.-практ. конф. MicroCAD 2023, Харків, 17–20 трав. 2023. – С. 168.
3. Лебедев В.С. Гідравлічний прес із зусиллям до 150 тонн і адаптивним регулюванням потужності. Київ: КПІ імені І. Сікорського, 2025.
4. Лозінський Д.О., Піонткевич О.В., Сиротін О.А. Інноваційні підходи до підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем // Проблеми енергетики. – 2017. – №5. – С. 22-28.
5. Кармаліта А.К., Якимчук Д.М. Експериментальне дослідження впливу механізму повороту ударника на ефективність роботи електрогідравлічного пресового обладнання // Вісник ХНУ. – 2013. – №3. – С. 22–29.

6. Поліщук Л., Харченко Ю., та ін. Дослідження динамічних процесів в системі керування гідропривода стрічкових конвеєрів із змінними вантажопотоками // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Т. 5, №9. – С. 45–53.
7. Kravetskyi Yu.A., Hubariyev O.P., Levchenko O.V. Specifics of Remote Electrohydraulic Drive Microprocessor Control During Switching from Primary to Backup Operating Mode // *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. – 2025. – DOI:10.64915/RADAP.2025.102.83-93.
8. Khedr O.H., et al. Optimizing power consumption and position control in an electro hydraulic system with cylinder bypass and NN MPC // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. – С. 51318.
9. Schmidt L., van Binsbergen Galán M. Electro Hydraulic Variable Speed Drive Network Technology—First Experimental Validation // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, №13. – С. 3192.

References

1. Hasiuk O.I. Matematychnе modeliuвання elektrohidravlichnykh pryvodiv tekhnolohichnoho obladnannia // *Visnyk NTU «KhPI»*. – 2015. – №33. – С. 58–63.
2. Zasytskyi O.M., Klitnoi V.V. Rozrobka enerhoefektyvnoi systemy pryvodu hidravlichnoho vertykalnohopresa // *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : tezy dop. 31-yi Mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf. MicroCAD 2023, Kharkiv, 17–20 trav. 2023*. – С. 168.
3. Lebediev V.S. Hidravlichnyi pres iz zusyilliam do 150 tonn i adaptivnym rehuliuванням potuzhnosti. –Kyiv: KPI imeni I. Sikorskoho, 2025.
4. Lozinskyi D.O., Piontkyevych O.V., Syrotin O.A. Innovatsiini pidkhody do pidvyshchennia enerhoefektyvnosti elektrohidravlichnykh system // *Problemy enerhetyky*. – 2017. – №5. – С. 22–28.
5. Karmalita A.K., Yakymchuk D.M. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu mekhanizmu povorotu udarnyaka na efektyvnist roboty elektrohidravlichnoho presovoho obladnannia // *Visnyk KhNU*. – 2013. – №3. – С. 22–29.
6. Polishchuk L., Kharchenko Yu., ta in. Doslidzhennia dynamichnykh protsesiv v systemi keruvannia hidropryvoda strichkovykh konveieriv iz zminnymy vantazhopotokamy // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Т. 5, №9. – С. 45–53.
7. Kravetskyi Yu.A., Hubariyev O.P., Levchenko O.V. Specifics of Remote Electrohydraulic Drive Microprocessor Control During Switching from Primary to Backup Operating Mode // *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. – 2025. – DOI:10.64915/RADAP.2025.102.83-93.
8. Khedr O.H., et al. Optimizing power consumption and position control in an electro hydraulic system with cylinder bypass and NN MPC // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. – С. 51318.
9. Schmidt L., van Binsbergen Galán M. Electro Hydraulic Variable Speed Drive Network Technology—First Experimental Validation // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, №13. – С. 3192.