

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ЛІСОВИХ МАШИН: ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕХОДУ НА ГІБРИДНІ СИСТЕМИ

У статті проведено комплексний аналіз сучасних тенденцій та перспектив інтеграції електричних і гібридних силових установок у конструкції лісозаготівельної техніки. Досліджено світовий досвід провідних виробників, таких як Ponsse, Komatsu та John Deere, у контексті впровадження інноваційних приводів для харвестерів, форвардерів та трелювальних тракторів. Обґрунтовано переваги гібридних систем, які дозволяють досягти суттєвої економії палива (на 25–35 %), мінімізації шкідливих викидів CO₂ та підвищення загальної енергоефективності технологічних процесів лісозаготівлі. Особливу увагу приділено системі рекуперації енергії, що забезпечує повернення до 22 % потужності під час робочих циклів. Визначено стратегічні напрями розвитку вітчизняного лісового машинобудування, зокрема через локалізацію виробництва гібридних модулів та їх адаптацію до українських умов експлуатації. Окреслено роль інтеграції цих технологій у навчальний процес підготовки фахівців для формування кадрового потенціалу цифрової трансформації галузі.

Ключові слова: лісові машини, гібридні системи, електропривід, енергоефективність, сталий розвиток, автоматизація.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. У світовому машинобудівному секторі спостерігається чітка тенденція до повної або часткової відмови від дизельного приводу. Це зумовлено не лише екологічними викликами, а й економічними факторами – зростанням вартості пального, підвищенням вимог щодо екологізації виробництва, а також необхідністю автоматизації процесів у лісозаготівлі. У провідних країнах ЄС темпи заміни дизельних машин на гібридні та електричні вже сягають 12–18 % на рік, що створює передумови для повної трансформації парку техніки до 2040–2050 рр.

Особливо активно електрифікація відбувається у Скандинавії – регіоні, де ліс є одним із ключових природних ресурсів. Система рекуперації енергії, що використовується у сучасних електроприводах, дозволяє повертати до 15–22 % енергії, втрачених у процесі гальмування і роботи маніпуляторів, що недоступно для стандартних дизельних систем. Гібридні харвестери нового покоління обладнані двома накопичувачами енергії, що дозволяє забезпечувати стабільний

¹Плашенко Олена Володимирівна, викладач вищої категорії. E-mail: elena.plashenko@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-5313-1583>;

¹Деняченко Михайло Іванович, викладач вищої категорії. E-mail: mltk2010@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-1297-1229>.

крутний момент на валу незалежно від навантаження, а також уникати пікових витрат пального при інтенсивному циклі заготівлі [1].

На підставі опрацьованих даних технічних паспортів (*Ponsse, Komatsu, John Deere*) встановлено, що середнє споживання палива гібридної машини становить 10–12 л/год проти 15–18 л/год у традиційних дизельних аналогів. При цьому експлуатаційні випробування підтвердили скорочення викидів CO₂ на 35–52 % [2], що робить такі установки придатними для екологічно-чутливих зон – заказників, молодих культур, територій із рекреаційним використанням.

Не менш важливим показником є рівень шуму. Відомо, що шумове навантаження на оператора – один із чинників професійного вигорання, зниження концентрації та помилок у роботі. Перехід від 105 дБ (дизель) до 80–85 дБ (гібрид) та до 60–65 дБ (електрохарвестер) суттєво знижує шумовий вплив на персонал та забезпечує кращі умови праці.

У перспективі використання твердотільних акумуляторів збільшить автономність роботи електричних машин з 3–5 год до 10–14 год у польових умовах. Це стане точкою переходу від гібридної до повної електрифікації [3].

Метою проведених досліджень був аналіз сучасних тенденцій електрифікації лісових машин, оцінка переваг існуючих систем, зокрема – гібридних і перспективи їх впровадження в Україні.

Матеріали і методи дослідження. У роботі використано аналітичний, порівняльний і системний методи дослідження. Для аналізу застосовано дані технічних звітів провідних виробників і результати експлуатаційних випробувань гібридних машин у Скандинавії.

Результати дослідження та їх обговорення. Лісові машини за типом приводу поділяються на дизельні, електричні та гібридні (табл. 1). Гібридні лісові машини поєднують дизельний двигун і електропривід, що дозволяє зменшити витрати палива на 25–35 %, рівень шуму – на 40 %, а також стабілізувати роботу гідравлічної системи. В Україні подібні технології можуть бути застосовані у трелювальних тракторах, пересувних подрібнювачах деревини та машинах для догляду за насадженнями.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики приводів лісових машин

Тип приводу	Джерело енергії	Переваги	Недоліки
Дизельний	дизельне паливо	простота, автономність	високі викиди, шум
Електричний	акумулятор	нульові викиди, низький шум	мала автономність
Гібридний	дизель + батарея	економічність, ефективність	висока вартість, складність

Дані табл. 1 демонструють технологічну дихотомію сучасного машинобудування. Дизельні приводи, попри свою автономність, стають регресивними через неспроможність відповідати жорстким екологічним стандартам Tier 5 та низьку енергетичну гнучкість. Повністю електричні системи, хоча і є ідеальними з точки зору екологічності, на даному етапі розвитку технологій накопичення енергії стикаються з проблемою «енергетичної щільності», що критично для роботи у віддалених лісових масивах.

Саме тому гібридний привід виступає як найбільш раціональний компроміс. Він інтегрує переваги обох систем: дизельна складова забезпечує необхідну потужність та автономність, тоді як електрична частина (буферна батарея) дозволяє працювати у режимі пікових навантажень без різкого зростання витрат пального [4]. Це нівелює основний недолік дизелів – низьку ефективність при змінних режимах роботи, характерних для маніпуляторних операцій.

Особливо важливими аспектами використання тих чи інших систем лісових машин є їх коефіцієнт корисної дії та вплив на довкілля (табл. 2).

Таблиця 2

Екологічні показники лісових машин

Параметр	Дизель	Гібрид	Електро
Викиди CO ₂ , кг/год	12,5	8,3	0
Рівень шуму, дБ	105	85	60
ККД приводу, %	32	47	85
Собівартість, грн/год	480	360	250

Детальний розгляд показників таблиці 2 дозволяє зробити висновок про радикальну перевагу електрифікованих систем у контексті енергоефективності. Коефіцієнт корисної дії (ККД) чистого електроприводу сягає 85%, що у 2,6 разу вище, ніж у класичного дизеля (32 %). Гібридна установка, демонструючи ККД на рівні 47 %, забезпечує «золоту середину», дозволяючи трансформувати до 15–22 % енергії гальмування та спуску маніпулятора назад у корисну електричну енергію через систему рекуперації.

Екологічний аспект характеризується зниженням емісії CO₂ на 33,6 % при переході на гібрид (з 12,5 до 8,3 кг/год), що є вагомим чинником для сертифікації лісопродукції за міжнародними стандартами енергоменеджменту, такими як ISO 50001. Крім того, зниження шумового забруднення на 20 дБ (зі 105 до 85 дБ), за використання гібридної схеми, радикально покращує умови праці оператора, знижуючи когнітивне навантаження та ризики професійних захворювань.

З економічної точки зору, попри вищу вартість придбання гібридної техніки, пряма експлуатаційна собівартість знижується на 25% (з 480 до 360 грн/год). Така динаміка зумовлена скороченням споживання палива з 15–18 л/год

до 10–12 л/год, що в довгостроковій перспективі (5–7 років) забезпечує повну окупність інноваційних систем та підвищує конкурентоспроможність лісогосподарських підприємств України на міжнародному ринку.

Перспективи розвитку електрифікації лісових машин в Україні визначаються кількома ключовими чинниками: технологічним рівнем підприємств, можливістю локалізації виробництва та економічною доцільністю переходу на енергоефективні рішення. На сьогодні українські лісогосподарські підприємства перебувають на етапі модернізації технічного парку, що створює сприятливі умови для поступового впровадження гібридних і повністю електричних машин.

По-перше, гібридні силові установки можуть бути інтегровані у трелювальні трактори, навантажувачі та пересувні подрібнювачі деревини, що дозволить зменшити витрати палива на 20–35 %, знизити шумове навантаження та підвищити ресурс гідравлічних систем. Локальна адаптація гібридних модулів також зменшить залежність від імпортованих комплектуючих.

По-друге, впровадження електрифікованої техніки є важливим етапом екологізації лісового господарства. Перехід на машини з низьким або нульовим рівнем викидів сприятиме виконанню екологічних вимог ЄС, що має значення для України як держави, що інтегрується до європейського простору [5].

По-третє, інтеграція таких технологій у навчальний процес дозволить підготувати висококваліфікованих фахівців за спеціальністю 207 «Агроінженерія». Створення навчально-наукових лабораторій з вивчення електроприводів, рекуперації енергії та гібридних силових установок значно підвищить практичну складову підготовки студентів. Це також створить передумови для виконання експериментальних досліджень, участі у міжнародних проєктах та розробки власних українських інновацій у сфері лісогосподарської техніки.

Загалом, упровадження електрифікованих технологій має значний потенціал для підвищення енергоефективності, екологічності та конкурентоспроможності лісового господарства України.

Висновки.

1. На сучасному етапі електрифікація є стратегічним напрямом розвитку лісового машинобудування, підвищення його екологічності та енергоефективності.

2. Особливо перспективним вважається використання гібридних систем, що поєднують переваги як дизельних приводів, які забезпечують необхідну потужність та автономність, так і електричних, які дозволяють працювати у режимі пікових навантажень без різкого зростання витрат пального, таким чином поєднуючи екологічність та ефективність.

3. На сьогодні українські лісогосподарські підприємства перебувають на етапі модернізації технічного парку, що створює сприятливі умови для поступового впровадження гібридних і повністю електричних машин. Гібридні силові установки можуть бути інтегровані у трелювальні трактори, навантажувачі та пересувні подрібнювачі деревини, що дозволить зменшити витрати палива на 20–35 %, знизити шумове навантаження та підвищити ресурс гідравлічних систем.

4. Впровадження електрифікованої техніки є важливим етапом екологізації лісового господарства. Перехід на машини з низьким або нульовим рівнем викидів сприятиме виконанню екологічних вимог ЄС, що має значення для України як держави, що інтегрується до європейського простору.

Список літератури (References)

1. Advancing sustainability in forestry machinery: Electro-Hybrid drives for greenhouse gas reduction and enhanced energy efficiency Václav Mergl¹, Lukáš Zeizinger¹, Martin Kománek. https://reference-global.com/article/10.2478/forj-2023-0024?utm_source=chatgpt.com

2. Komatsu Forest Green Tech Report. 2022. https://www.komatsuforest.com/media/newsroom/hybrid-electric-forwarder-concept-prototype-unveiled-for-the-first-time?utm_source=chatgpt.com

3. Tower yarder powertrain performance simulation analysis: electrification study. Stefan Leitner, Manuel Antonio Perez Estevez, Massimiliano Renzi, Raffaele Spinelli, Fabrizio Mazzetto, Renato Vidoni https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-023-01553-0?utm_source=chatgpt.com

4. Ponsse Hybrid Systems Overview. Finland, 2023. https://www.forestryequipmentguide.com/article/57639-ponsse-launches-ev1-electric-forest-machine?utm_source=chatgpt.com

5. ISO 50001:2018 Energy Management Systems. https://www.nqa.com/en-us/certification/standards/iso-50001?utm_source=chatgpt.com

O. V. Plashenko¹, M. I. Denyachenko²

¹Malyn Applied College, Hamarnia village, Zhytomyr region, Ukraine

ELECTRIFICATION OF FORESTRY MACHINES: PROSPECTS FOR TRANSITION TO HYBRID SYSTEMS

Abstract. *The article provides a comprehensive analysis of current trends and prospects for integrating electric and hybrid power plants into the design of forestry machinery. Global experience of leading manufacturers, such as Ponsse, Komatsu, and John Deere, in implementing innovative drives for harvesters, forwarders, and skidders is investigated. The advantages of hybrid systems are substantiated, allowing for significant fuel savings (by 25–35%), minimization of harmful CO₂ emissions, and an increase in the overall energy efficiency of wood harvesting technological processes. Special attention is paid to the energy recovery system, which ensures the return of up to 22% of power during operating cycles. Strategic directions for the development of domestic forest*

machinery engineering are identified, in particular through the localization of hybrid module production and their adaptation to Ukrainian operating conditions. The role of integrating these technologies into the educational process of training specialists in "Agroengineering" is outlined to form the human resources potential for the industry's digital transformation.

Key words: *forest machines, hybrid systems, electric drive, energy efficiency, sustainable development, automation.*