

УДК 621.225:69.002.51

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.74

НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ГІБРИДНИХ ПРИВОДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬНО-ДОРОЖНІХ МАШИН

Хмара Л. А.¹, Холодов А. П.²

¹ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Досліджено можливості вдосконалення будівельно-дорожніх машин і проаналізовано публікації з метою розроблення теорії енергоефективної конструкції машин із використанням гібридних приводів робочих органів та рушіїв. Надано порівняльні таблиці розподілу та витрат енергії різних машин у процесі їх експлуатації. Для підвищення паливної, екологічної ефективності та надійності машин запропоновано класифікацію способів підвищення ефективності будівельно-дорожніх машин з урахуванням наявних та перспективних методів.

Ключові слова: енергоефективність, будівельно-дорожня машина, ККД, енергія, паливо, гібридний привод.

Вступ

За останні кілька десятиліть проблема забруднення навколишнього середовища та зміни клімату стала все більш актуальною. Одним із найпоширеніших джерел викидів вуглекислого газу є транспорт, зокрема дорожньо-будівельна техніка. Але, на щастя, з'явилися нові рішення, що допоможуть скоротити споживання палива та зменшити викиди газів. Одним із них є використання гібридних дорожньо-будівельних машин.

Гібридні дорожньо-будівельні машини – це техніка, що застосовує як паливний двигун, так і електричний. Це дає змогу скоротити використання палива та знизити викиди шкідливих газів. Крім того, гібридні машини є більш ефективними, оскільки електричний двигун допомагає забезпечити додаткову потужність під час роботи важких машин.

Одним із провідних виробників гібридних дорожньо-будівельних машин є компанія *Caterpillar*. Тут створено гібридний навантажувач, що використовує гідравлічну систему для зарядки батареї та електричний двигун, щоб забезпечити потужність. Цей навантажувач може скоротити споживання палива на 25 % порівняно з традиційними машинами.

Іншим провідним виробником є компанія *Komatsu*, де створено гібридний бульдозер. Ця машина використовує систему, яка автоматично переключається між дизельним та електричним двигуном, залежно від потреби в потужності.

Аналіз публікацій

Для прогнозування можливості зниження настановної потужності проектованої машини або впровадження енергозберігальної

системи потрібно проаналізувати умови її роботи та характер розподілу потужності в робочому циклі. Оскільки в енергоємних режимах механізми споживають значну кількість енергії, що виробляється силовою установкою, і тільки дрібна її частина витрачається на корисну роботу в технологічному процесі. Проблеми енергозбереження та енергоефективного керування технологічними процесами машин досліджено в роботах таких авторів, як В. Гене, Л. Хмара, А. Лаценов, В. Баловнев, Т. Алексєєва, Н. Домбровський, В. Савинкін, М. Klanfar, V. Kesojevic, D. Komljenovic та ін.

Мета та постановка завдання

Розроблення енергозберігального привода є важливою концепцією в науково-технічній галузі, яка допоможе збільшити продуктивність і ефективність роботи екскаваторів способом перетворення, накопичення та перерозподілу енергії між елементами машини відповідно до їх енергоємності під час виконання операцій.

Мета дослідження полягає в розробленні концепції створення енергоефективних будівельно-дорожніх машин із гібридними приводами робочих органів і рушіїв. Її виконання ґрунтуватиметься на наявних і перспективних методах підвищення паливної та екологічної ефективності, а також надійності машин.

Теоретичне обґрунтування

Дослідження енергоємності робочих процесів машин вказує на те, що на сьогодні гідрофіковані машини становлять понад 80 %

від загальної кількості парку будівельно-дорожніх машин. У процесі екскавації ґрунтового середовища робота гідроприводів становить 85 % протягом усього життєвого циклу. Важкі режими навантаження зумовлюють виконання основних функціональних операцій умовно від 50 % до 70 % часу. Зем-

лерийні машини мають велику кількість увімкнень силових гідродвигунів та елементів, що значно впливають на завантаження гідроприводу та його динаміку. Отже, енергоємні операції становлять від 50 % до 70 % робочого часу машини й потребують значної кількості увімкнень гідропривода (табл. 1).

Таблиця 1 – Доля роботи гідроприводів БДМ під навантаженням

Показник	Екскаватори	Бульдозери	Скрепери	Навантажувачі	Крани
Енергоємні операції	50–70 %	58–69 %	56–70 %	46–50 %	~ 50 %
Кількість увімкнень за зміну роботи	1250	1500	1200	900	1000

З одного боку, виробники обладнання надають інформацію про витрату палива для своїх моделей, але вона не є універсальною для всіх обладнань і не враховує відмінності в типі палива та ефективності двигуна. Для оцінювання споживання палива корисно мати додаткові джерела, які подають питому витрату палива залежно від навантаження, що може вважатися еквівалентом коефіцієнта навантаження. Але інформація про коефіцієнти навантаження доступна не для всіх типів обладнання. Тому для оцінювання витрат палива на обладнанні, де немає такої інформації, необхідно мати уявлення про фактори, які впливають на витрату палива, та їх діапазон для цієї групи обладнання. Для оцінювання витрат палива зазвичай використовують питому витрату палива відповідно до стану й типу двигуна, номінальну потужність двигуна та коефіцієнт навантаження, визначений для конкретного типу обладнання й умов експлуатації. З цією інформацією витрату можна розрахувати за допомогою спеціальної формули

$$Q_d = N \cdot k_{le} \cdot q_d, \quad (1)$$

де N – номінальна потужність двигуна (кВт);
 k_{le} – коефіцієнт навантаження двигуна;
 q_d – питома витрата палива, (кг/(кВт·год)).

Питання підвищення енергоефективності експлуатації машин є дуже важливим і актуальним. Це зумовлено необхідністю зменшення витрат на паливо й зниження негативного впливу на довкілля. Для досягнення цієї мети необхідно чітко класифікувати способи підвищення ефективності базових деталей ма-

шин, що містять двигун, трансмісію, гальмівну систему та інші компоненти.

Один із можливих способів підвищення енергоефективності машин – це використання більш ефективних інженерних рішень, зокрема покращення гідродинамічних характеристик елементів, оптимізація режимів роботи, зменшення маси та оптимізація розмірів деталей.

Інші способи підвищення енергоефективності машин передбачають застосування альтернативних джерел енергії, наприклад, електродвигунів або гібридних систем, а також використання рециркуляції енергії та інших енергозберігальних технологій.

Підвищення енергоефективності машин є важливим завданням для багатьох галузей, а саме: промисловості, транспорту, сільського господарства тощо. Для досягнення цієї мети необхідно використовувати різні підходи та стратегії, зокрема спеціальні програми й заходи стимулювання для виробників, щоб зменшити споживання палива та впровадити нові енергоефективні технології (рис. 1).

Запропонована класифікаційна схема описує підсистеми впливу в системі енергоефективної машини:

- об'єкт удосконалення / дослідження;
- вплив на стадіях життєвого циклу;
- види проведених заходів;
- результат дій (технічний результат).

Класифікаційна схема детально описує об'єкти впливу конструктивно-технологічних систем, що допомагають встановити роль і причинно-наслідкові зв'язки кожного заходу.

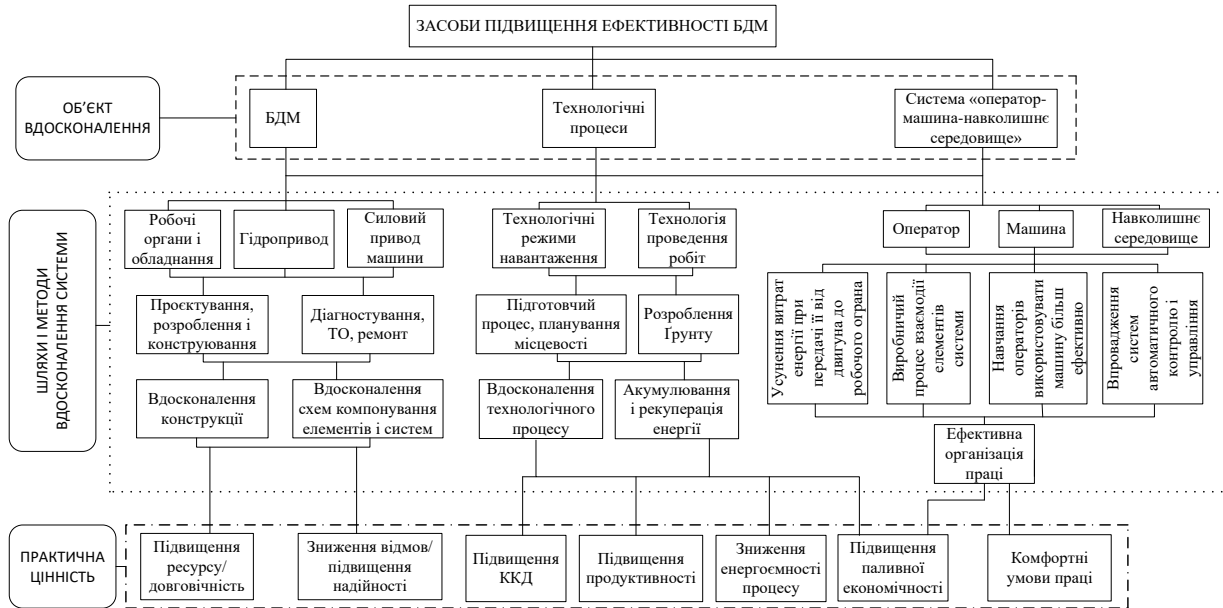


Рис. 1. Способи підвищення ефективності БДМ

Для досягнення енергоефективності процесів можна використовувати різноманітні методики, що основані на розглянутій схемі-алгоритмі та враховують попередні впливи й здобуті результати.

Використання різноманітних підходів для підвищення ефективності БДМ

У використанні автогрейдерів виникає кілька проблем, зокрема недостатнє ущільнення ґрунту та низька адаптивність ходової частини до ґрунтових умов. Одним зі способів покращення ефективності машини є вдосконалення її рушія, що передбачає використання балансирних підвісок із різними діаметрами пневмоколісних шин. Для досягнення цієї мети розроблено нову конструкцію автогрейдера, що містить самохідне шасі з рамою, балансир з мостами, пневмоколісні шини різного діаметра, кабіну, грейдерний та бульдозерний відвали. Балансир додатково оснащено балансирною рамою, у якій встановлена пара мостів, а пневмоколісні шини кожного з послідовно встановлених мостів відповідають певним умовам щодо діаметра. Для вивчення характеристик колеса проведено віртуальні експериментальні дослідження з використанням 3D-моделі, які базуються на шині Я-140А для важкого автогрейдера ДЗ-98.

Удосконалення гідроаккумуляуючих систем БДМ можливе завдяки встановленню керованих муфт між первинним двигуном гідронасосом, що дозволяють вимикати його на недовантажених режимах роботи (рис. 4).

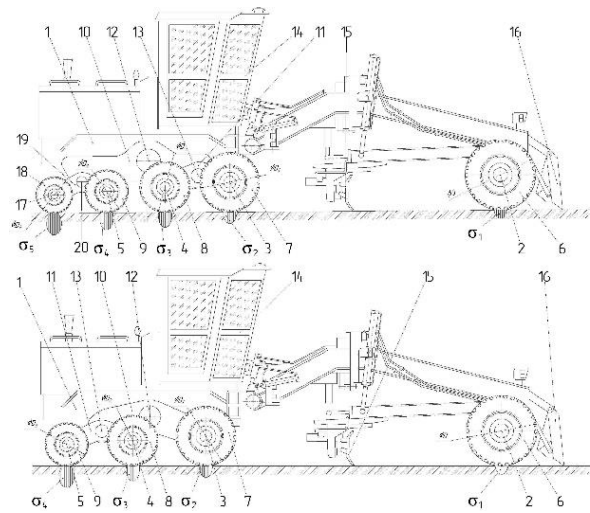


Рис. 2. Автогрейдери з удосконаленим рушієм

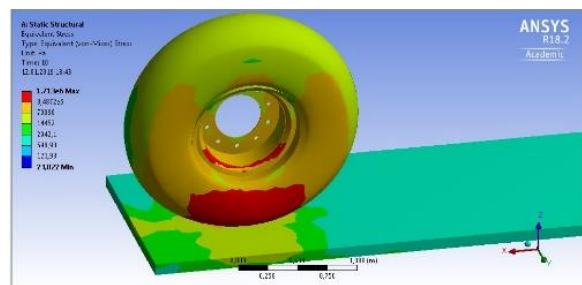


Рис. 3. Еквівалентні напруження в зоні контакту колеса

Застосування керованої муфти в гідроаккумуляуючій системі дасть змогу знизити витрати енергії первинного двигуна, а отже, і витрати палива на холостих режимах роботи й на навантажених режимах.

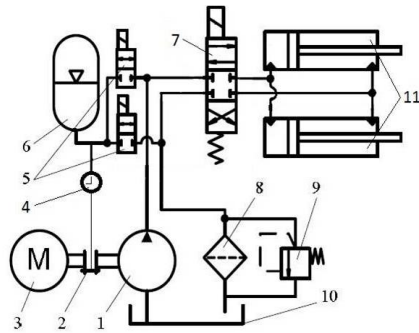


Рис. 4. Схема гідроакumuлюючої системи з керованою муфтою: 1 – гідронасос; 2 – керована муфта зчеплення; 3 – ДВЗ; 4 – датчик тиску; 5 – гідророзподільники управління процесом зарядження / розрядження ГПА; 6 – гідропневмоаккумулятор; 7 – гідророзподільник; 8 – фільтр; 9 – запобіжний клапан; 10 – бак; 11 – гідроциліндри управління робочим обладнанням

Пропонується система, що регулює температуру газової камери гідропневмоаккумулятора. Це дає змогу збільшувати тиск залишкової робочої рідини (рис. 5).

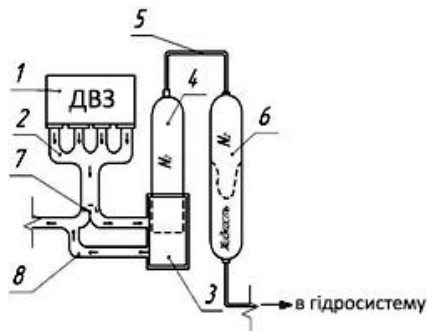


Рис. 5. Регулятор температури гідроакumuлюючої системи: 1 – ДВЗ; 2 – вихлопний колектор; 3 – теплообмінник; 4 – балон з азотом; 5 – трубопровід; 6 – гідропневмоаккумулятор; 7 – розподільна заслінка; 8 – реверсивний патрубок

Опишемо принцип роботи наведеної схеми. У момент, коли в гідропневмоаккумуляторі недостатньо тиску для виконання робочої операції, розподільна заслінка 7 перекриває потік вихлопних газів у вихлопну систему й спрямовує їх у теплообмінник 3, у який вбудований балон із газом азоту 4. Коли зростає температура в балоні 4, газ розширюється й подається через трубопровід 5 у газову порожнину ГПА 6. У такий спосіб тиск у робочій порожнині ГПА зростає, за умови досягнення номінального тиску в робочій

порожнині ГПА розподільна заслінка перекриває потік вихлопних газів, що йдуть до теплообмінника, і спрямовує їх до вихлопної труби.

Для обґрунтування доцільності впровадження тих чи інших вдосконалень, спрямованих на підвищення ефективності машини, доцільно застосовувати метод визначення ККД за техніко-економічними показниками (табл. 2).

Таблиця 2 – Комплекс ККД за техніко-економічними показниками

№ з\п	Найменування ККД	Формула ККД
1	ККД за корисною масою	$\eta_G = \frac{m_{гр}}{m_{заг}}$
2	ККД за корисним об'ємом	$\eta_q = \frac{q_k}{q_{маш}}$
3	ККД за витратою потужності	$\eta_N = \frac{N_{кор}}{N_{заг}}$
4	ККД за витратою палива	$\eta_f = \frac{Q_{кор}}{Q_{заг}}$
5	ККД за витраченим часом	$\eta_{T_u} = \frac{t_{кор}}{T_{ц}}$
6	ККД за витраченою роботою	$\eta_A = \frac{A_{кор}}{A_{заг}}$

Усі наведені вдосконалень сприяють досягненню номінальних значень потужності, використовуваної на виконання корисної роботи й подолання сил опорів, величина якої характеризує енергоємність процесу та його економічний складник. Для обґрунтування граничних значень витраченої енергії привода та двигуна неефективно використовувати тільки технічний критерій залежно від режимів навантаження й тривалості циклу робочого процесу. Оскільки ефективність роботи гідропривода БДМ залежить від безлічі факторів і зумовлює довговічність елементів привода, то гранично-допустиму мінімальну величину ефективності можна визначити, застосовуючи економічні критерії. Визначення економічних критеріїв є перспективним напрямом досліджень.

Висновки

1. Проведено аналітичні та експериментальні дослідження, що дали змогу встанови-

ти енергоємність робочих процесів різних типів будівельно-дорожніх машин.

2. Дослідження, проведені за методиками, описаними в посібниках *Komatsu* та *Caterpillar*, показали, що фактори навантаження та споживання палива найбільш точно відображають реальні умови експлуатації більшості БДМ.

3. Надано класифікацію способів підвищення ефективності будівельно-дорожніх машин.

4. Окреслено передумови розроблення концепції енергоефективних будівельно-дорожніх машин, зокрема гібридних приводів робочих органів та рушіїв з урахуванням сучасних і перспективних методів підвищення паливної ефективності, екологічної стійкості та надійності машин.

Література

- Klanfar M., Korman T., Kujundžić T. Fuel consumption and engine load factors of equipment in quarrying of crushed stone. *Tehnički vjesnik*. 2016. 23, 1. P. 163–169.
- Modelling and Simulation of Metal Construction Stress-Strain Behaviour When Designing Road-Building Machines / O. Rieznikov et al. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020). Selected Papers of 15th International Scientific-practical Conference* (2021 June 29 – July 01), Chernihiv, Ukraine, 2021. P. 92–100. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-58124-4_9
- Information system for controlling transport-technological unit with variable mass / Y. Kalinin et al. *ICTERI*. 2020. P. 303–312. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2732/20200303.pdf>
- Keckojevic V., Komljenovic D. Haul Truck Fuel Consumption and CO2 Emission under Various Engine Load Conditions. *Mining Engineering*. 2010. 62, 12. P. 44–48.
- Selecting a Rational Operation Mode of Mobile Power Unit Using Measuring and Control Complex / D. Klets et al. *ICTERI*. 2019. P. 141–151. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2387/20190141.pdf>
- Strojevi u građevinarstvu (Machines in Civil Engineering) / P. Đukan, B. Bosanac, Lj. Mrvoš, A. Paskojević. *Граđевинар, Zagreb*, 1991.
- Komatsu. Specification & Application Handbook. Edition 30, Komatsu Ltd, Tokyo, 2009.
- Caterpillar. Caterpillar Performance Handbook. Edition 40, Caterpillar Inc, Peoria, 2010.
- Chitkara K. K. Construction Project Management, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1998.
- Development of Emission Factors, Load Factors, Duty Cycles and Activity Estimates from Nonroad PEMS study / M. Sabisch et al. *CE-CERT PEMS Conference*. Riverside, 2013.

References

- Klanfar, M., Korman, T., Kujundžić, T. (2016) Fuel consumption and engine load factors of equipment in quarrying of crushed stone. *Tehnički vjesnik*, 23, 1, pp. 163–169.
- Rieznikov, O., Klets, D., Kholodov, A., Khmara, L., Kholodov, M., Didenko, N. (2021) Modelling and Simulation of Metal Construction Stress-Strain Behaviour When Designing Road-Building Machines. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020) Selected Papers of 15th International Scientific-practical Conference* (2021 June 29 – July 01). Chernihiv, Ukraine, pp. 92–100. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-58124-4_9
- Kalinin, Y., Shuliak, M., Klets, D., Kholodov, A. (2020) Information system for controlling transport-technological unit with variable mass. *ICTERI*, pp. 303–312. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2732/20200303.pdf>
- Keckojevic, V., Komljenovic, D. (2010) Haul Truck Fuel Consumption and CO2 Emission under Various Engine Load Conditions. *Mining Engineering*, 62, 12, pp. 44–48.
- Klets, D., Shuliak, M., Klets, D., Kalinin, Y., Kholodov, A. (2019) Selecting a Rational Operation Mode of Mobile Power Unit Using Measuring and Control Complex. *ICTERI*, pp. 141–151. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2387/20190141.pdf>
- Đukan, P., Bosanac, B., Mrvoš, Lj., Paskojević, A. (1991) *Strojevi u građevinarstvu (Machines in Civil Engineering)*. *Граđевинар, Zagreb*.
- Komatsu. Specification & Application Handbook. (2009) Edition 30, Komatsu Ltd, Tokyo.
- Caterpillar. Caterpillar Performance Handbook. (2010) Edition 40, Caterpillar Inc, Peoria.
- Chitkara, K. K. (1998) *Construction Project Management*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
- Sabisch, M., Kishan, S., DeFries, T. et al. (2013) Development of Emission Factors, Load Factors, Duty Cycles and Activity Estimates from Nonroad PEMS study. *CE-CERT PEMS Conference*. Riverside.

Хмара Леонід Андрійович, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», leonidkhmara@yahoo.com, тел. +380932670386.

Холодов Антон Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, antonkholodov23@gmail.com, тел. +380502063644.

Scientific basis of creating hybrid drives to increase the energy efficiency of road construction machines

Abstract. Problem. Possibilities for improving construction and road machines were explored, an analysis of existing publications was conducted to develop a theory for energy-efficient machine design using hybrid drives for working mechanisms and engines. Comparative tables were provided to show the energy distribution and consumption of different machines during operation. In order to improve fuel efficiency, environmental sustainability, and reliability of machines, a classification of methods for increasing the efficiency of construction and road machines was proposed, taking into account existing and prospective methods. **Goal.** The objective of the research is to develop a concept for creating energy-efficient construction and road machines with hybrid drives for working mechanisms and engines, which will be based on existing and prospective methods for increasing fuel efficiency, environmental sustainability, and machine reliability. **Methodology.** The issue of increasing the energy efficiency of machine operation is very important and relevant. This is due to the need to reduce fuel costs and minimize the negative impact on the environment. To achieve this goal, it is necessary to clearly classify the ways of improving the efficiency of basic machine components, including the engine, transmission, braking system, and other components. **Results.** The prerequisites for developing the concept of energy-efficient construction and road machines have been outlined, includ-

ing the development of hybrid drives for working tools and engines, taking into account modern and promising methods of increasing fuel efficiency, ecological sustainability, and machine reliability.

Practical value. All the improvements mentioned contribute to achieving the nominal power values used to perform useful work and overcome resistive forces, the magnitude of which characterizes the energy intensity of the process and its economic component. Using only a technical criterion is not effective for justifying the limiting values of drive and engine energy consumption, due to the instantaneous and insignificant change of the entire set of indicators depending on the load modes and duration of the working cycle process. Since the efficiency of the hydraulic drive depends on numerous factors and affects the durability of drive elements, the allowable minimum efficiency can be determined by applying economic criteria.

Key words: energy efficiency, construction and road machine, energy efficiency ratio (EER), energy, fuel, hybrid drive.

Khmara Leonid, Dr.Sc.(Tech.), Professor, Department of Construction and Road-Building Machinery, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, leonidkhmara@yahoo.com, tel. +380932670386.

Kholodov Anton, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, Kharkiv National Automobile and Highway University, antonkholodov23@gmail.com, tel. +380502063644.
