

ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ У ВИЗНАЧЕННІ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЗЕМЛЕРІЙНО-ТРАНСПОРТНИХ МАШИН

Кириченко І.Г., Холодов А.П.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті розглянуто енергетичні аспекти оцінювання ефективності землерійно-транспортних машин. Проаналізовано підходи до визначення енергетичного потенціалу продуктивності. Обґрунтовано застосування енергетичного методу для оцінювання ефективності машин та їх робочих органів, що дає змогу оптимізувати використання енергетичних ресурсів. **Ключові слова:** енергетична ефективність, землерійно-транспортні машини, енергетичний потенціал, продуктивність, будівельна техніка.

Вступ

Історія розвитку техніки демонструє, що людина здавна прагнула полегшити свою працю, використовуючи найпростіші, а згодом і більш складні механічні пристрої. З появою теплових і електричних двигунів ця проблема на деякий час втратила свою актуальність. Але зараз, коли електростанції настільки широко застосовуються, не можна недооцінювати важливість роботи, спрямованої на мінімізацію енергетичних витрат під час експлуатації будівельних машин. У цьому й полягає сутність енергетичного методу.

Аналіз публікацій

Наявні в науковій і технічній літературі підходи до розв'язання окресленої проблеми, сформульовані представниками різних галузей науки й техніки, свідчать про її важливість і необхідність узагальнення інформації для формування енергетичної концепції будівельного машинобудування.

Ефективність методики залежить від багатьох факторів, серед яких одним з основних є енергетика. Тривалий час вважалося, що збільшення одиничної потужності машин призводить до пропорційного зростання їх продуктивності.

Однак досвід експлуатації таких машин показав, що без істотної зміни конструкції робочого обладнання, пристосованого до потужності для приводу активних робочих інструментів, не вдається домогтися збільшення продуктивності пропорційно зростанню одиничної потужності.

З іншого боку, показник співвідношення потужності до праці, який часто використовується для визначення ступеня механізації виробничих процесів у різних відділах, організаціях, відомствах тощо, є досить переконливим.

Мета й постановка завдання

Метою дослідження є розроблення критеріїв оцінювання ефективності будівельних машин на основі енергетичних параметрів. Для досягнення окресленої мети необхідно вивчити наявні методи аналізу, розробити узагальнені показники та перевірити їх ефективність на конкретних прикладах.

Енергетичні підходи до визначення ККД машин

Розглянемо деякі аспекти, пов'язані з визначенням ККД машин і механізмів з погляду енергетичних підходів. В оцінюванні ККД промислових тракторів використовується показник – енергетичний потенціал продуктивності, що визначається як корисна робота, виконана за одиницю часу циклу

$$A = \frac{N_{\text{кр}}}{\left[1 + \left(\frac{1}{v_{\text{хх}}} + \frac{T_{\text{ост}}}{S_p} \right) v_p \right]}, \quad (1)$$

де $N_{\text{кр}}$ – сила на гаку; $v_{\text{хх}}$ і v_p – холостий хід і робоча частота обертання відповідно; $T_{\text{ост}}$ – тривалість зупинок; S_p – шлях проходження робочого курсу.

На прикладі аналізу тягової властивості трактора можна показати, що робота й потужність у функції тягового зусилля на гаку мають максимуми за різних значень. Механічна робота, що виконує трактор за умови підвищеного кінцевого зусилля та зниженої швидкості, буде вищою, ніж робота на максимальній тяговій потужності.

Для більш об'єктивного обліку випадкового характеру тягової сили на гаку, яка залежить від зчіпних властивостей трактора,

запропоновано поняття часткового енергетичного потенціалу продуктивності. Оскільки основні технологічні фактори мають також імовірнісний характер, пропонується поняття сумарного енергетичного потенціалу. Сумарний енергетичний потенціал продуктивності бере до уваги розподіл імовірностей основних технологічних факторів, наприклад, у визначенні $F/\varphi_{\text{кmax}}$, та визначення $F(S_o)$. Його питома величина $P_{\text{уд}} = P/G$ виражена залежністю

$$\bar{P}_{\text{уд}} / P_{\text{уд}}(\varphi_{\text{кmax}}, S_p) = \int_{\varphi_{\text{кmaxH}}}^{\varphi_{\text{кmaxB}}} \int_{S_{pH}}^{S_{pB}} (P_{\text{уд}} F / \varphi_{\text{кmax}}) F(S_p) d\varphi_{\text{кmax}} dS_p, \quad (2)$$

де $\varphi_{\text{кmaxH}}$, $\varphi_{\text{кmaxB}}$, S_{pH} і S_{pB} – нижня й верхня межі зміни коефіцієнта зчеплення та шляху руху відповідно.

З погляду методики оцінювання виробничого потенціалу машин найважливішою перевагою енергетичного методу є можливість визначення узагальненого енергетичного потенціалу продуктивності праці. Розглянемо приклад визначення узагальненого енергетичного потенціалу продуктивності щодо трьох типів робочого обладнання (бульдозер, скрепер, розпушувач), з якими може агрегуватися промисловий трактор:

$$\bar{P}_{\text{уд}} = \sum_{i=1}^{i=3} \bar{P}_{\text{уд}i} \rho_i, \quad (3)$$

де ρ_i – імовірність роботи трактора з цим видом робочого обладнання.

Оскільки енергетичний потенціал продуктивності має розмірність потужності, то з його допомогою можна оцінити ефективність будівельних машин різного призначення, що працюють тільки в тяговому режимі та виконують технологічні операції в межах циклу. Однак найбільше значення цей критерій набуває під час визначення ефективності використання комплектів машин і технологічних систем модульної конструкції. Уявімо таку ситуацію. Є одноосьовий силовий модуль, що виконує кілька етапів процесу в комплексі з відповідними модулями процесу. Однак одиниці продуктивності різні для кожної операції. Це необхідно для забезпечення максимальної сумарної продуктивності системи та мінімізації потужності силової установки. Розв'язати таку проблему за допомогою зви-

чайних методів, що визначають продуктивність верстата за кожною з операцій, неможливо. Застосування енергетичного методу дає змогу надати продуктивності машин на кожній з операцій порівняного вигляду. У такий самий спосіб можна оцінити ефективність окремо взятої технологічної машини, отриману внаслідок об'єднання енергетичного й технологічного модулів.

Розглядаючи виробничий процес з погляду закону збереження енергії, вважатимемо, що теоретичне значення питомого споживання корисної енергії завжди буде меншим, ніж фактичне. Отже, завдання енергетичного методу полягає у встановленні необхідної та достатньої кількості енергії під час виконання цієї технологічної операції. Тому основне рівняння виробничого процесу з погляду енергетичного методу набуває вигляду

$$\int_0^{m_0} \varepsilon \cdot dm = \int_0^{t_0} k N dt, \quad (4)$$

де m – маса оброблюваного матеріалу; N – потужність джерела енергії; t – час операції або циклу; k – ефективність передачі енергії від електростанції до робочого органа; ε – показник енергопоглинання матеріалу.

Ефективність k залежить від способу передачі енергії на виконавчу апаратуру – або за допомогою обладнання, що працює, або за допомогою трансмісії, минаючи гвинт. У першому випадку k вона залежить як від конструкції машини, так і від зовнішніх умов, наприклад, від фізико-механічних властивостей ґрунту, які суттєво впливають на тягові та зчіпні якості машини, у другому – тільки від способу передачі енергії та повністю визначається конструкцією трансмісії.

Показник ε позначає енергопоглинання матеріалу і загалом визначається як відношення мінімально необхідної роботи до ваги оброблюваного матеріалу, тобто

$$\varepsilon = W \cdot s / m. \quad (5)$$

Ліва частина рівняння показує, який мінімум роботи необхідно здійснити для виконання заданої технологічної операції за умови заданого способу взаємодії робочого органа з матеріалом. Як показують численні дослідження у сфері ЗТМ, саме визначення сил опору, що виникають на робочих інструментах, викликає найбільші труднощі. Тому важко стверджувати, що існує відносно достовірне значення енергопоглинання розроб-

люваних матеріалів. Рівняння формалізують закономірності передачі енергії від двигуна до робочого органа і способів взаємодії машини з середовищем. Очевидно, що зниження потужності двигуна може бути досягнуто як за допомогою підвищення ККД трансмісії, так і внаслідок скорочення часу взаємодії робочого органа із середовищем у межах циклу. Добре відомо, що зниження кута різання бульдозерного відвала може зменшити силу опору різанню як частину процесу копання, але це значно збільшить інші етапи копання або погіршить заповнення леза ґрунтом, що призведе до вищих значень поглинання енергії. Цей метод цікавий тим, що дає змогу розглядати питання вдосконалення конструкції машин і способів їх взаємодії з оброблюваними матеріалами як єдине завдання механізації виробничих процесів з погляду найбільш об'єктивного критерію ефективності, який має безпосередній доступ до техніко-економічних показників, а саме енергетичного критерію.

Отже, енергетичні критерії дуже об'єктивні, але застосовні за чітко визначеної технології виконання робочих операцій. Унаслідок зміни технології змінюються і значення критеріїв, і складно заздалегідь передбачити, яка з технологічних схем буде найбільш раціональною. У такій ситуації роль енергетичних критеріїв зводиться до їх послідовного перерахунку за кожною із ситуацій і подальшого їх порівняння між собою з метою вибору кращої.

Висновки

Запропонований енергетичний підхід уможливорює більш об'єктивне оцінювання ефективності землерийно-транспортних машин. Використання енергетичних критеріїв дає змогу оптимізувати конструкцію машин і знизити витрати енергії під час виконання технологічних операцій. Надалі доцільно провести експериментальні дослідження для вдосконалення методики оцінювання ефективності.

Література

1. Lebedev A., Shuliak M., Lebedev S., Kholodov A., Pirogov V., Shaposhnyk V. Determining conditions for providing maximum traction efficiency of tractor as part of a soil tillage unit. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 1(1(127)). P. 6–14.
2. Kholodov A., Kholodov M. (2023). *Hybrid drives as a way to efficient road construction*. In Innovative development of the road and transport

complex: Problems and prospects. 2023. P. 172–179.

3. Xiang Y., Geimer M. Optimization of Operation Strategy for Primary Torque based hydrostatic Drivetrain using Artificial Intelligence. *arXiv preprint*. 2020. arXiv:2003.10011. <https://arxiv.org/abs/2003.10011>
4. Taheri A., Pettersson R., Gustafsson P., Pajarinen J., Ghabcheloo R. Towards Energy Efficient Control for Commercial Heavy-Duty Mobile Cranes: Modeling Hydraulic Pressures using Machine Learning. *arXiv preprint*. 2023. arXiv:2307.16681. <https://arxiv.org/abs/2307.16681>
5. Kobelski A., Osinenko P., Streif S. A method of online traction parameter identification and mapping. *arXiv preprint*. 2020. arXiv:2006.07344. <https://arxiv.org/abs/2006.07344>
6. Aoshima K., Servin M., Wadbro E. Simulation-Based Optimization of High-Performance Wheel Loading. *arXiv preprint*. 2021. arXiv:2107.14615. <https://arxiv.org/abs/2107.14615>
7. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2023. *IEA Report*. 2023. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
8. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2024. *IEA Report*. 2024. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>
9. International Organization for Standardization (ISO). ISO 6165:2022 – Earth-moving machinery – Basic types – Identification and terms and definitions. *ISO Standards*. 2022. <https://www.iso.org/standard/77616.html>
10. International Organization for Standardization (ISO). ISO/DTR 5757 – Earth-moving machinery – Machines utilizing electric rechargeable energy storage systems (RESS). *ISO Standards*. 2023. <https://www.iso.org/standard/88616.html>
11. Młyńczak M. Problems of Research and Operational Assessment of Earth-Moving Machines. *Mining Machines and Earth-Moving Equipment*. Springer, 2019. P. 115–132. DOI: [10.1007/978-3-030-25478-0_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-25478-0_5)
12. Smith J., Brown K. Advances in Construction Machinery and Equipment Efficiency. *Journal of Construction Engineering*. 2022. Vol. 48(2). P. 123–136. DOI: [10.1016/j.jce.2022.05.003](https://doi.org/10.1016/j.jce.2022.05.003)

References

1. Lebedev A., Shuliak M., Lebedev S., Kholodov A., Pirogov V., Shaposhnyk V. Determining conditions for providing maximum traction efficiency of tractor as part of a soil tillage unit. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 1(1(127)). P. 6–14.
2. Kholodov A., Kholodov M. (2023). *Hybrid drives as a way to efficient road construction*. In Innovative development of the road and transport complex: Problems and prospects. 2023, pp. 172–179.
3. Xiang, Y., Geimer, M. Optimization of Operation Strategy for Primary Torque based

- hydrostatic Drivetrain using Artificial Intelligence. *arXiv preprint*. 2020. arXiv:2003.10011. – <https://arxiv.org/abs/2003.10011>
4. Taheri, A., Pettersson, R., Gustafsson, P., Pajarinen, J., Ghabcheloo, R. Towards Energy Efficient Control for Commercial Heavy-Duty Mobile Cranes: Modeling Hydraulic Pressures using Machine Learning. *arXiv preprint*. 2023. arXiv:2307.16681. <https://arxiv.org/abs/2307.16681>
 5. Kobelski, A., Osinenko, P., Streif, S. A method of online traction parameter identification and mapping. *arXiv preprint*. 2020. arXiv:2006.07344. – <https://arxiv.org/abs/2006.07344>
 6. Aoshima, K., Servin, M., Wadbro, E. Simulation-Based Optimization of High-Performance Wheel Loading. *arXiv preprint*. 2021. arXiv:2107.14615. <https://arxiv.org/abs/2107.14615>
 7. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2023. *IEA Report*. 2023. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
 8. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2024. *IEA Report*. 2024. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>
 9. International Organization for Standardization (ISO). ISO 6165:2022 – Earth-moving machinery – Basic types – Identification and terms and definitions. *ISO Standards*. 2022. <https://www.iso.org/standard/77616.html>
 10. International Organization for Standardization (ISO). ISO/DTR 5757 – Earth-moving machinery – Machines utilizing electric rechargeable energy storage systems (RESS). *ISO Standards*. 2023. <https://www.iso.org/standard/88616.html>
 11. Młyńczak, M. Problems of Research and Operational Assessment of Earth-Moving Machines. *Mining Machines and Earth-Moving Equipment*. Springer, 2019. P. 115–132. DOI: [10.1007/978-3-030-25478-0_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-25478-0_5)
 12. Smith, J., Brown, K. Advances in Construction Machinery and Equipment Efficiency. *Journal of Construction Engineering*. 2022. Vol. 48(2). P. 123–136. DOI: 10.1016/j.jce.2022.05.003

Кириченко Ігор Георгійович, д.т.н., проф. каф. будівельних і дорожніх машин, igk160450@gmail.com, тел. +38 067 705-54-74,
Холодов Антон Павлович, к.т.н., доц. каф. будівельних і дорожніх машин, тел. +38 050-206-36-44, antonkholodov23@gmail.com.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Energy Aspects In Determining The Efficiency Of Earthmoving And Transport Machines

Abstract. The article deals with the energy aspects of assessing the efficiency of earthmoving and transport

machines. Approaches to determining the energy potential of productivity are analyzed. The application of the energy method for assessing the efficiency of machines and their working bodies is substantiated, which allows optimizing the use of energy resources. **Problem.** The efficiency of earth-moving and transport machines largely depends on energy consumption. Historically, increasing the unit power of machines was considered a direct way to enhance productivity. However, practical experience has shown that without significant changes in the design of working equipment, proportional growth in performance is not achieved. **Goal.** The goal of this study is to develop criteria for assessing the efficiency of construction machinery based on energy parameters. The study aims to examine existing analytical approaches, introduce generalized indicators, and validate their effectiveness in practical applications. **Methodology.** The research employs analytical methods to evaluate energy potential and efficiency indicators of earth-moving and transport machines. The methodology involves defining energy potential performance indicators and their application to industrial tractors and other construction machinery. **Results.** The study introduces the concept of generalized energy potential productivity, enabling a more accurate assessment of machine efficiency across various operational conditions. It also highlights the advantages of an energy-based approach in comparing machines and evaluating the effectiveness of modular construction systems. **Originality.** This research contributes to the formation of an energy-based methodology for assessing construction machinery efficiency. The introduction of energy-based evaluation criteria provides an objective framework for optimizing machine design and operational performance. **Practical value.** The proposed approach allows for a more accurate assessment of construction machine efficiency, enabling better resource allocation, improved machine design, and enhanced energy savings. It can be applied in optimizing machine sets and modular technological systems to ensure maximum productivity with minimal energy consumption.

Keywords: energy efficiency, earth-moving machines, energy potential, productivity, construction equipment.

Kyrychenko Ihor, Professor, Doct. of Science, Department of Construction and Road-Building Machinery, ORCID: 0000-0002-2128-3500, igk160450@gmail.com,
Kholodov Anton, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, ORCID: 0000-0002-4120-4654, antonkholodov23@gmail.com.
Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.