УДК 629.3:620.9:355

В. Є. Максименко, І. В. Віштак

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВІЙСЬКОВИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Анотація. *Розглянуто проблему підвищення енергоефективності військових транспортних засобів в умовах зростання залежності підрозділів від паливного забезпечення. Проаналізовано структуру енергетичного балансу машини, основні чинники втрат енергії та напрями їх зменшення: вдосконалення силової установки, гібридизація, зниження опору руху, оптимізація трансмісії й енергоменеджмент. Запропоновано комплексний підхід до вибору заходів з урахуванням запасу ходу, автономності, сигнатури та ремонтопридатності у польових умовах.*

Ключові слова: *енергоефективність, військові транспортні засоби, витрата палива, гібридна силова установка, автономність.*

Abstract. *The problem of improving the energy efficiency of military vehicles is considered in the context of the growing dependence of units on fuel supply. The energy balance of a vehicle, the main sources of energy losses and the ways of reducing them are analysed: powertrain improvement, hybridisation, reduction of motion resistance, transmission optimisation and energy management. A comprehensive approach to selecting measures is proposed, taking into account operating range, autonomy, signature and field maintainability.*

Keywords: *energy efficiency, military vehicles, fuel consumption, hybrid powertrain, autonomy.*

Досвід сучасних збройних конфліктів засвідчує, що паливне забезпечення є вразливою ланкою військової логістики: доставка пального потребує ресурсів, охорони та створює додаткові ризики [1]. Тому зменшення питомої витрати пального військовими транспортними засобами (ВТЗ) сприяє збільшенню запасу ходу й автономності підрозділів, а також може знижувати теплову та акустичну помітність машин.

Енергоефективність ВТЗ ускладнюють значна маса, рух бездоріжжям, робота двигуна на холостому ході та живлення бортового обладнання. Технічні рішення мають зберігати живучість, надійність і ремонтопридатність за низьких температур, запиленості та бойових пошкоджень.

Мета роботи – систематизувати напрями підвищення енергоефективності ВТЗ і запропонувати підхід до вибору доцільних заходів.

Енергетичний баланс і джерела втрат. Тягова сила, яку має реалізувати ВТЗ під час руху, визначається сумою сил опору коченню, підйому, повітря та інерції [4]:

$$F_{\text{т}} = G \cdot f \cdot cos\alpha + G \cdot sin\alpha + \frac{c_x \cdot \rho \cdot A \cdot v^2}{2} + \delta \cdot m \cdot a \qquad (1)$$

де G – вага машини; f – коефіцієнт опору коченню; α – кут схилу; c_x – коефіцієнт аеродинамічного опору; ρ – густина повітря; A – лобова площа; v – швидкість руху; δ – коефіцієнт врахування обертових мас; m – маса; a – прискорення.

Потужність двигуна визначається залежністю:

$$P_e = F \cdot m \cdot v / \eta_{\text{тр}}, \qquad (2)$$

де $\eta_{тр}$ – коефіцієнт корисної дії (ККД) трансмісії.

На бездоріжжі часто домінує опір коченню, а на високих швидкостях зростає роль аеродинамічного опору. За даними National Academies, ефективний ККД наявних армійських двигунів оцінюється приблизно у 39 %, а перспективних – близько 50 %; фактичні значення залежать від конструкції та режиму роботи [3, 6]. Втрати виникають також у трансмісії, під час гальмування й на холостому ході.

На основі джерел [2, 3, 5, 6, 8, 9] виокремлено такі напрями підвищення енергоефективності:

1. Удосконалення силової установки. Сучасні системи впорскування, турбонаддуву й керування двигуном підвищують ефективність у робочих режимах; перспективними є рекуперація теплоти відпрацьованих газів та оптимізація роботи двигуна за малих навантажень.

2. Гібридизація та електрифікація. Гібридний привод дає змогу працювати двигуну в ефективнішій зоні, рекуперувати енергію гальмування й застосовувати електротягу на малих швидкостях [2, 6, 9]. Режим «тихого чергування» забезпечує живлення бортового обладнання без

постійної роботи двигуна. Обмеженнями є маса й вартість батарей, їхня чутливість до низьких температур і потреба в захисті.

3. Зменшення опору руху та маси. Регулювання тиску в шинах відповідно до ґрунту може зменшувати буксування й опір руху; дослідження підтверджують вплив тиску на тягову ефективність і витрату пального [8]. Зменшення маси також може скорочувати витрату пального, однак оцінки для легкових автомобілів не можна безпосередньо переносити на ВТЗ [7]. Зниження маси не повинно погіршувати бронезахист.

4. Оптимізація трансмісії та керування. Адаптивне перемикання передач, блокування гідротрансформатора й оптимальний розподіл крутного моменту можуть зменшувати втрати та підтримувати прохідність [5].

5. Енергоменеджмент і режими експлуатації. Обмеження холостого ходу, застосування допоміжних джерел живлення й автономних підігрівачів, телеметричний контроль витрат пального, навчання водіїв та планування маршрутів можуть бути впроваджені на наявному парку з відносно невеликими витратами.

Оцінка потенціалу рекуперації. Для ілюстрації ефекту розглянемо рекуперативне гальмування. Кінетична енергія машини масою m під час руху зі швидкістю v дорівнює $E_к = m \cdot v^2/2$. Частина цієї енергії, що може бути повернута в акумулятор, становить:

$$E_{рек} = \eta_г \cdot \eta_а \cdot E_к \quad (3)$$

де $\eta_г$ – ККД електричної машини в генераторному режимі; $\eta_а$ – ККД накопичувача енергії. Для машини масою 20 т за швидкості 50 км/год (13,9 м/с) кінетична енергія становить близько 1,9 МДж, або приблизно 0,54 кВт·год. У традиційній трансмісії вона повністю розсіюється у гальмах, а під час маршу з частими зупинками, рухом у колоні та подоланням нерівностей ці втрати повторюються десятки разів. Водночас реальний ефект обмежений потужністю електричної машини, ємністю накопичувача та необхідністю зберігати ефективність механічних гальм для аварійного гальмування.

У табл. 1 наведено якісне авторське порівняння заходів за очікуваним впливом на витрату пального й автономність, доступністю для наявного парку та основними обмеженнями. Рівні потенціалу визначено попередньо на основі [2, 6–9]; вони не є результатами порівняльних випробувань.

Таблиця 1 – Порівняння напрямів підвищення енергоефективності ВТЗ

Напрям	Потенціал економії	Основні обмеження
Удосконалення двигуна	Середній	Вартість, складність обслуговування
Гібридизація	Високий	Маса й вартість батарей, захист від уражень
Зниження опору руху та маси	Середній	Баланс із рівнем захисту
Оптимізація трансмісії	Середній	Модернізація наявного парку
Енергоменеджмент і режими експлуатації	Середній – високий	Дисципліна й підготовка екіпажів

Гібридизація може бути доцільною за частих зупинок і потреби в автономному електроживленні, тоді як енергоменеджмент доступніший для наявного парку. Тому пропонується багатокритеріально оцінювати заходи з урахуванням запасу ходу, маси, вартості життєвого циклу, ремонтопридатності, живучості та сигнатури. Модель має концептуальний характер і потребує практичної перевірки на типових циклах руху.

$$K = w_1 k_1 + w_2 k_2 + \ldots + w_n k_n, \; w_1 + w_2 + \ldots + w_n = 1 \quad (4)$$

де k_i – нормовані показники, приведені до єдиного напряму оцінювання; w_i – вагові коефіцієнти із сумою, що дорівнює одиниці. Їх визначення, аналіз чутливості та перевірка моделі за даними телеметрії є завданнями подальшого дослідження.

Практичне впровадження доцільно здійснювати поетапно: спочатку – контроль витрат пального, обмеження холостого ходу й підготовка водіїв; далі – модернізація шин, трансмісії та

систем керування двигуном; під час закупівлі нових машин – оцінювання доцільності гібридного привода, рекуперації й режиму тихого чергування.

Під час впровадження слід враховувати якість пального, запиленість, потребу в зарядній інфраструктурі, захист батарей і сумісність нових вузлів із системою технічного забезпечення. Ефективність заходів необхідно надалі перевіряти вимірюваннями в реальних циклах руху та за даними бортової телеметрії.

Енергоефективність ВТЗ підвищується завдяки поєднанню технічних заходів – удосконалення силової установки, гібридизації, зменшення опору руху й оптимізації трансмісії – з енергоменеджментом. Запропонована багатокритеріальна модель дає змогу концептуально зіставляти заходи, але потребує практичної перевірки за даними телеметрії та типовими циклами руху. Її можна використати для обґрунтування модернізації й закупівлі ВТЗ.

Список використаних джерел:

1. Defense Science Board. Report of the Defense Science Board Task Force on DoD Energy Strategy: "More Fight—Less Fuel" [Електронний ресурс]. 2008. Режим доступу: https://www.semanticscholar.org/paper/Report-of-the-Defense-Science-Board-Task-Force-on-Dsb/3cccfeef562e07e5d464e5eb2bcadbc015c1058e
2. Ehsani M., Gao Y., Emadi A. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2004. 424 p. https://doi.org/10.1201/9781420037739
3. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, [Електронний ресурс]. 2018. Режим доступу: https://ru.scribd.com/doc/58605220/Heywood-Jb-Internal-Combustion-Engine-Fundamentals
4. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles [Електронний ресурс]. 2022. 258 p. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119719984
5. Guzzella L., Sciarretta A. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization. 3rd ed. Berlin: Springer, 2013. 436 p. DOI: 10.1007/978-3-642-35913-2
6. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Powering the U.S. Army of the Future. Washington, DC: The National Academies Press, 2021. DOI: https://doi.org/10.17226/26052 .
7. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Assessment of Technologies for Improving Light-Duty Vehicle Fuel Economy. 2025. 2035 p. Washington, DC: The National Academies Press, 2021. DOI: https://doi.org/10.17226/26092 .
8. Sharaf A. M. An Investigation of Tire Inflation Pressure on Fuel Consumption for Off-Road Vehicles. WCX SAE World Congress Experience. Detroit, Michigan, 2023. DOI: https://doi.org/10.4271/2023-01-0751 .
9. Крайник Л., Кіхтан А., Кохан В., Волощук М. Концептуальні основи формування гібридного привода автомобіля високої прохідності. Військово-технічний збірник. 2022. № 27. С. 10–18. DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.27.2022.10-18 .

Максименко Владислав Євтихійович – студент групи 1ГМ-24б, кафедри галузевого машинобудування, факультет машинобудування та транспорту, Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, буд. 95, інд. 20021, e-mail: plohahomas@gmail.com

Віштак Інна Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, e-mail: vishtakiv@vntu.edu.ua. https://orcid.org/0000-0001-5646-4996

Vladyslav Yevtykhiiovych Maksymenko – Student (Group 1GM–24b) of the Department of Industrial Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Khmelnytske Shosse St., Building 95, Ind. 20021, e-mail: plohahomas@gmail.com

Vishtak Inna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Life Safety and Safety Pedagogy, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vishtakiv@vntu.edu.ua . https://orcid.org/0000-0001-5646-4996