

## АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.33 : 621.43 : 621.3

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2026.112.0.283

## АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМАХ

Цюман М. П., Садовник І. І.  
Національний транспортний університет

**Анотація.** У статті розглянуто результати оцінювання показників ефективності гібридної електричної автомобільної енергоустановки в експлуатаційних режимах. Визначено закономірності зміни залежно від частоти обертання вихідного вала та потужності енергоустановки показників: ефективного крутного моменту та частоти обертання колінчастого вала двигуна; баланс потужностей елементів гібридної енергетичної установки; питомої ефективної витрати палива, коефіцієнта наповнення та ефективного коефіцієнта корисної дії двигуна; коефіцієнта корисної дії гібридної трансмісії та енергоустановки загалом; передаточних співвідношень гібридної трансмісії.

**Ключові слова:** показники ефективності, гібридна автомобільна енергоустановка, експлуатаційний режим, баланс потужностей, паливна економічність, енергетичні показники, коефіцієнт корисної дії, гібридна трансмісія.

### Вступ

Найпоширенішими джерелами енергії на транспорті, зокрема автомобільному, є двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ). З огляду на це автомобільні транспортні засоби є найбільшими споживачами паливних ресурсів та забруднювачами навколишнього середовища шкідливими речовинами, які викидаються з відпрацьованими газами двигунів. Показники ефективності автомобільних двигунів залежать від типу та особливостей робочих процесів перетворення енергії, використовуваних палив, регулювання параметрів, технічного стану.

Крім того, ці особливості робочих процесів значною мірою впливають і на кількість викинутих забруднювальних речовин. Тому показники паливної економічності, енергетичні й екологічні показники двигунів належать до загальної групи показників енергоефективності.

Сучасні вимоги до автомобільних транспортних засобів щодо показників енергоефективності передбачають суттєве скорочення викидів діоксиду карбону, що досягається насамперед поліпшенням паливної економічності. Тому постійно ведуться роботи з удосконалення робочих процесів автомобільних двигунів, які сприяють досягненню вищого рівня паливної ефективності.

Одним із напрямів такого вдосконалення є забезпечення вищої ефективності двигуна в найбільш поширених експлуатаційних ре-

жимах роботи. Актуальним варіантом розвитку цього напрямку вдосконалення автомобільних двигунів є приведення його режимів роботи до таких, де досягається висока ефективність використанням гібридної електричної трансмісії. Найбільшого розповсюдження в таких гібридних електричних автомобільних енергетичних установках набули двигуни з іскровим запалюванням.

### Аналіз публікацій

Аналіз показників ефективності гібридних електричних автомобільних енергетичних установок було здійснено у великій кількості досліджень останнього часу [1–14].

Так, у роботі [1] розглянуто особливості конверсії автомобіля з ДВЗ до гібридного автомобіля й технології, які вже втілені в сучасні енергоустановки автомобілів. У процесі моделювання показників паливної економічності та викидів шкідливих речовин традиційного і гібридного автомобіля під час їх руху в режимах їздового циклу визначено, що витрата палива гібридного автомобіля менше на 28 %, а викиди нормованих шкідливих речовин на 47–48 %.

У дослідженні [2] розглянуто вдосконалений алгоритм управління тяговим асинхронним двигуном м'якого гібридного автомобіля через збільшення ефективності рекуперативного гальмування для покращення економічних та екологічних параметрів.

У роботі [3] досліджено питання небезпеки та ризиків, які виникають у процесі використання акумуляторів електричної енергії.

У роботі [4] розглянуто імітаційні моделі системи керування та контролю, проведено дослідження динаміки параметрів елементів гібридного автомобіля з послідовно-паралельним приводом за допомогою імітаційного моделювання в середовищі Matlab / Simulink.

У роботі [5] наведені теоретичне узагальнення та нове вирішення важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів завдяки раціональному використанню ДВЗ та електричних двигунів; отримано залежності зміни показників тягово-швидкісних властивостей, паливної економічності, електричних параметрів в умовах міського руху.

У роботі [6] здійснене теоретичне дослідження методів оцінювання показників якості електричних і гібридних автомобілів на етапі експлуатації залежно від середньої швидкості руху автомобіля.

У роботі [7] подано обґрунтування ефективного використання електричних і гібридних транспортних засобів з метою їх широкого впровадження у виробництво і мінімізації екологічної небезпеки наявних ДВЗ. Наведено математичну модель оцінювання якості автомобіля за основними споживчими показниками; проаналізовано вплив електричних компонентів електричних і гібридних автомобілів на показники загальної та екологічної безпеки.

У [8] розглянуто розроблення концепції переобладнання автомобіля з ДВЗ і механічною коробкою передач на гібридний. Проведено експериментальні дослідження з вибору тягового електричного двигуна для переобладнання автомобіля, а також математичне моделювання й аналіз у міських умовах економічних характеристик переобладнаного гібридного автомобіля, що доводять зниження витрати палива у 2...3 рази, як порівняти з базовим автомобілем.

У дослідженні [9] здійснено математичне моделювання показників паливної економічності та рівня викидів CO<sub>2</sub> в умовах неусталеного руху звичайного комерційного автомобіля та спроектованого на його основі гібридного автомобіля, де було визначено, що за однакового рівня продуктивності гібридний автомобіль викидає CO<sub>2</sub> майже на 30 % менше.

У роботі [10] досліджено важливості гібридних автомобілів у міському русі щодо впливу на довкілля. Результати, отримані за допомогою газоаналізатора складу відпрацьованих газів та розрахунку викидів на основі інформації з блока керування двигуном, довели, що під час міської експлуатації гібридний автомобіль працював на електроприводі до 75,40 % часу, а викиди CO<sub>2</sub>, HC та NO<sub>x</sub> значно нижчі за викиди традиційних автомобілів подібного класу.

У дослідженні [11] розглянуто питання оптимального керування компонентами приводу гібридного автомобіля та визначено характеристики автомобіля через моделювання за допомогою Matlab/Simulink у магістральному їздовому циклі EPA HWFET (США) для визначення паливної економічності.

У роботі [12] досліджено сучасні технології гібридних електромобілів з аналізом основних схем поєднання різних джерел енергії, характеристик компонентів гібридної системи, способів зберігання та перетворення енергії, стратегій управління гібридними енергоустановками, екологічних показників, критичних проблем і викликів для сучасних гібридних енергоустановок.

Зокрема серед проблем, що становлять найбільше значення, визначено такі: ефективність, доступність і надійність способів зберігання електричної енергії; ефективне управління потоками енергії від різних джерел; ефективна структура системи на основі потреб у потужності та вартості; ефективність і надійність силових електроніки; характеристики основних електричних машин; ефективність управління основними елементами гібридної електричної енергоустановки.

У роботі [13] проаналізовано нову гібридну енергетичну установку на основі лінійного вільнопоршневого двигуна, яка використовується для гібридних легких комерційних міських автомобілів. Досліджено ефективність її роботи та різноманітні фактори, що на це впливають.

У роботі [14] розглянуто нові технології Toyota з удосконалення гібридних автомобілів Toyota Prius для збільшення їхньої ефективності та зниження викидів CO<sub>2</sub> на глобальному рівні. Зокрема збільшено ємність тягової батареї, ефективність трансмісії, енергоефективність ДВЗ і силових електроніки. Ці вдосконалення збільшили запас ходу на електроприводі до 72 км за одночасного поліпшення енергоефективності.

У дослідженні [15] визначено показники енергоефективності елементів гібридної трансмісії автомобіля Toyota Prius II, зокрема електродвигуна, інвертора та механічної передачі під час експериментальних стендових випробувань компонентів.

Аналіз цих та інших досліджень, які проведени останнім часом у сфері розвитку гібридних електричних автомобільних енергетичних установок у світі, свідчить про значний інтерес дослідників і розробників автомобілів до таких технологій енергозабезпечення транспорту.

Провідні світові автомобільні компанії вже розробили та вдосконалюють елементи гібридних автомобілів. Однак існують значні, невирішені поки критичні проблеми щодо ефективності, надійності та вартості гібридних електричних енергетичних установок.

В Україні розроблення технологій гібридних електричних автомобілів перебуває на етапі становлення для подальшого розвитку, що спонукає до проведення досліджень у цьому напрямі, зокрема до вивчення наявних технологій, їхньої ефективності, особливостей реалізації.

Це дасть можливість впроваджувати та розвивати автомобільні енергоустановки цього типу у вітчизняній сфері автомобільного транспорту з метою підвищення його енергоефективності та екологічної безпеки.

Першочерговим етапом до вивчення вже наявних гібридних енергетичних установок є експериментальні дослідження в лабораторних умовах, які дають можливість визначити їхні основні робочі характеристики та закономірності управління їхніми експлуатаційними режимами.

#### Мета та постановка задачі

Метою роботи є оцінювання показників ефективності й особливостей робочих процесів гібридної електричної автомобільної енергетичної установки на основі двигуна з іскровим запалюванням в експлуатаційних режимах.

Для досягнення мети необхідно здійснити аналіз результатів експериментальних стендових досліджень гібридної електричної автомобільної енергетичної установки в експлуатаційних режимах з метою визначення закономірностей зміни енергетичних показників і паливної економічності ДВЗ, балансу потужностей елементів гібридної енергетичної установки, коефіцієнта корисної дії енер-

гоустановки та параметрів управління гібридною трансмісією.

#### Виклад основного матеріалу

Як зазначено вище, показниками енергоефективності автомобільної енергоустановки є показники паливної економічності, енергетичні та екологічні показники, що визначаються витратою палива та викидами шкідливих речовин з відпрацьованими газами в основних експлуатаційних режимах, які в сучасного двигуна суттєво залежать від витрати ним повітря, концентрацій забруднювальних речовин у продуктах згоряння та ефективності роботи системи нейтралізації.

Тому під час експериментальних стендових досліджень показників енергоефективності автомобільної гібридної електричної енергоустановки було визначено масові витрати палива та повітря, концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах та параметри роботи електричних компонентів у різних експлуатаційних режимах роботи, що зі свого боку визначають швидкісні параметри та навантаження складових джерел енергії.

Об'єктом експериментальних досліджень (рис. 1) була гібридна електрична енергетична установка автомобіля Toyota Prius на основі двигуна з іскровим запалюванням 1NZ-FXE (4Ч 7,5/8,47) потужністю 57 кВт, обладнаного системами впорскування палива з електронним керуванням, регулювання фаз газорозподілу, нейтралізації відпрацьованих газів (ВГ) з трикомпонентним каталітичним нейтралізатором, що встановлено в лабораторії випробування двигунів кафедри «Двигуни та теплотехніка» Національного транспортного університету. Коротку технічну характеристику енергоустановки наведено в табл. 1.



Рис. 1. Об'єкт експериментальних досліджень – гібридна електрична енергетична установка з двигуном Toyota 1NZ-FXE

Програма експериментальних досліджень складається з визначення серії навантажувальних характеристик гібридної енергетичної установки за частот обертання вихідного вала 250 хв<sup>-1</sup>, 500 хв<sup>-1</sup> і 750 хв<sup>-1</sup>, що дорівнюють швидкостям автомобіля 28 км/год, 57 км/год і 85 км/год.

Під час експериментальних досліджень вимірювались частота обертання вихідного вала, крутний момент на вихідному валі енергоустановки, частота обертання колінчастого вала двигуна, ступінь відкриття дросельної заслінки, годинна витрата палива, годинна витрата повітря, температура повітря у впускному колекторі двигуна, коефіцієнт надлишку повітря, кут випередження запалювання, температура охолоджувальної рідини двигуна, температура оливи, температура ВГ, рівень заряду тягової батареї, часто-

та обертання MG1, крутний момент MG1, частота обертання MG2, крутний момент MG2, температура MG1, температура MG2, температура інвертора MG1, температура інвертора MG2, температура тягової батареї, концентрації у ВГ O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>, NO<sub>x</sub>, умовна швидкість автомобіля.

На основі вимірних параметрів розраховувались потужність енергоустановки, потужність MG1, потужність MG2, крутний момент двигуна, потужність двигуна, питома ефективна витрата палива, циклова витрата повітря, коефіцієнт наповнення циліндрів двигуна, коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна, ККД гібридної трансмісії, ККД гібридної енергоустановки, передаточне співвідношення гібридної трансмісії від MG1 і від двигуна.

Таблиця 1 – Коротка технічна характеристика об'єкта експериментальних досліджень

Найменування параметрів	Значення параметрів
Модель двигуна	1NZ-FXE
Кількість циліндрів	4
Порядок роботи циліндрів	1-3-4-2
Розташування циліндрів	рядне
Робочий об'єм, л	1,497
Діаметр циліндра та хід поршня, мм	75/84,7
Ступінь стискання	13
Кількість впускних/випускних клапанів на циліндр, шт.	2/2
Номинальна потужність, кВт	57 за 5000 хв <sup>-1</sup>
Максимальний крутний момент, Нм	111 за 4200 хв <sup>-1</sup>
Сорт палива	бензин А-95
Система впорскування палива	розподілене впорскування
Система зміни фаз газорозподілу	гідрокерована муфта приводу розподільчого вала
Система запалювання	електронна з індивідуальними котушками запалювання та регулюванням детонації
Система нейтралізації відпрацьованих газів	трикомпонентний каталітичний нейтралізатор
Гібридна система	Послідовно-паралельна
Тягова акумуляторна батарея	Нікель-металогібридна (NiMH)
Напруга батареї, В	201,6
Ємність тягової акумуляторної батареї, кВт·год	1,31
Маса батареї, кг	40,3
Потужність батареї, кВт	21
Діапазон напруги інвертора, В	200–500
Тип мотор-генератора MG1, мотор-генератора MG2	Двигун змінного струму з ротором на постійних магнітах
Номинальна потужність MG1, кВт	33
Номинальна потужність MG2, кВт	50 за 1200–1540 хв <sup>-1</sup>
Максимальний крутний момент MG2, Нм	400 за 0–1200 хв <sup>-1</sup>
Гібридна трансмісія	Одинарна планетарна передача для розподілу потужності
Передаточне співвідношення планетарної передачі	-2,6
Передаточне співвідношення головної передачі	4,113
Максимальна потужність системи, кВт	82 пза ≥ 85 км/год
Максимальний крутний момент системи, Нм	478 за ≤ 22 км/год

Методика розрахування зазначених параметрів використовує такі рівняння: потужність енергоустановки, кВт:

$$N = \frac{M \cdot n}{9550}, \quad (1)$$

де  $M$  – крутний момент на вихідному валу енергоустановки, Нм;  $n$  – частота обертання вихідного вала,  $\text{хв}^{-1}$ ;  
потужність MG1, кВт:

$$N_{MG1} = \frac{M_{MG1} \cdot n_{MG1}}{9550}, \quad (2)$$

де  $M_{MG1}$  – крутний момент MG1, Нм;  $n_{MG1}$  – частота обертання MG1,  $\text{хв}^{-1}$ ;  
потужність MG2, кВт:

$$N_{MG2} = \frac{M_{MG2} \cdot n_{MG2}}{9550}, \quad (3)$$

де  $M_{MG2}$  – крутний момент MG2, Нм;  $n_{MG2}$  – частота обертання MG2,  $\text{хв}^{-1}$ ;  
крутний момент двигуна, Нм:

$$M_e = \frac{M \cdot n - M_{MG1} \cdot n_{MG1} - M_{MG2} \cdot n_{MG2}}{n_d}, \quad (4)$$

де  $n_d$  – частота обертання колінчастого вала двигуна,  $\text{хв}^{-1}$ ;  
потужність двигуна, кВт:

$$N_e = \frac{M_e \cdot n_d}{9550}, \quad (5)$$

питома ефективна витрата палива,  $\text{г}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$ :

$$g_e = \frac{G_{\text{пал}} \cdot 10^3}{N_e}, \quad (6)$$

де  $G_{\text{пал}}$  – годинна витрата палива,  $\text{кг}/\text{год}$ ;  
циклова витрата повітря,  $\text{мг}/\text{цикл}$ :

$$g_{\text{ц.пов}} = \frac{G_{\text{пов}} \cdot 10^6}{30 \cdot \tau \cdot n_d}, \quad (7)$$

де  $G_{\text{пов}}$  – годинна витрата повітря,  $\text{кг}/\text{год}$ ;  
 $\tau$  – тактність двигуна;  
коефіцієнт наповнення циліндрів двигуна:

$$\eta_v = \frac{g_{\text{ц.пов}}}{V_h \cdot \frac{p_0}{R_{\text{пов}} \cdot T_0}}, \quad (8)$$

де  $V_h$  – робочий об'єм циліндра,  $\text{см}^3$ ;  $p_0$  – атмосферний тиск, Па;  $T_0$  – температура навколишнього середовища, К;  $R_{\text{пов}}$  – газова стала повітря,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  
ККД двигуна:

$$\eta_e = \frac{3600}{h_n \cdot g_e}, \quad (9)$$

де  $h_n$  – нижча теплота згоряння палива,  $\text{МДж}/\text{кг}$ ;  
ККД гібридної трансмісії:

$$\eta_{\text{гтр}} = \frac{N}{N_e}, \quad (10)$$

ККД гібридної енергоустановки:

$$\eta_{\text{ге}} = \eta_e \cdot \eta_{\text{гтр}}; \quad (11)$$

передаточне співвідношення гібридної трансмісії від MG1:

$$U_{MG1} = \frac{n_{MG1}}{n}; \quad (12)$$

передаточне співвідношення гібридної трансмісії від двигуна:

$$U_{\text{тр}} = \frac{n_d}{n}. \quad (13)$$

Відповідно до залежностей ефективного крутного моменту ДВЗ від зовнішнього навантаження гібридної енергетичної установки (рис. 2), зі збільшенням зовнішнього навантаження ефективний крутний момент збільшується. Тип отриманих кривих обумовлений значеннями частоти обертання колінчастого вала ДВЗ, які автоматично формує гібридна трансмісія. Досліджені режими енергетичної установки доводять, що вона працює у гібридному режимі, тобто, ДВЗ та електричні компоненти працюють сумісно: залежно від навантаження частина механічної енергії ДВЗ надходить до MG1, який працює в режимі генератора та виробляє електричну енергію для перетворення в інверторі для живлення MG2, що працює в режимі двигуна

та генерує механічну енергію на вихідному валу енергоустановки.

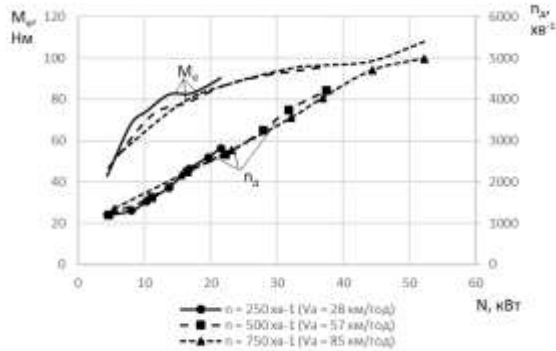
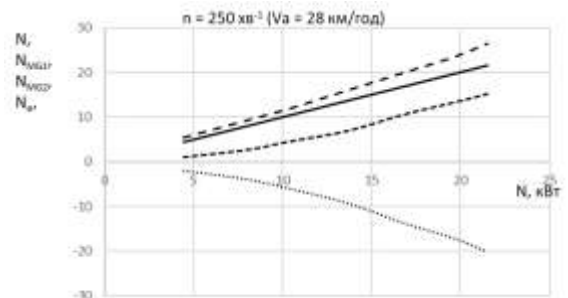


Рис. 2. Залежності ефективного крутного моменту та частоти обертання колінчастого вала ДВЗ від зовнішнього навантаження гібридної енергетичної установки з двигуном Toyota 1NZ-FXE

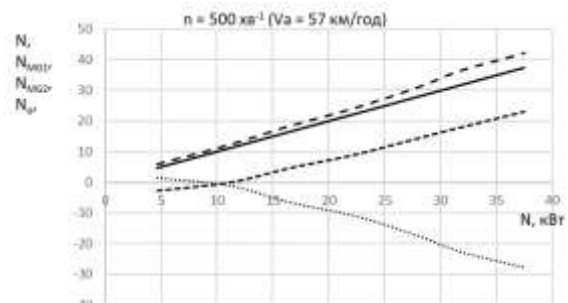
Баланс потужностей елементів гібридної енергоустановки у різних експлуатаційних режимах наведено на рис. 3. У гібридному режимі джерелом первинної енергії є ДВЗ. Елементи гібридної трансмісії MG1 та MG2 забезпечують формування передаточного співвідношення, перетворення та передачу енергії від ДВЗ до тягових коліс автомобіля за допомогою планетарного розподільника потужності. Залежно від навантаження частина механічної енергії від ДВЗ використовується для перетворення на електричну, а інша частина безпосередньо підводиться до тягових коліс.

У більшості режимів середніх та високих навантажень функцію перетворювача механічної енергії на електричну здійснює MG1, а MG2 перетворює отриману від MG1 електричну енергію на механічну та підводить її до тягових коліс у доповнення до частини енергії, отриманої на колесах безпосередньо від ДВЗ. У разі зменшення навантаження до певної величини (яка збільшується зі збільшенням частоти обертання) у режим генератора переходить MG2, а MG1 переходить у режим двигуна. Таким чином, у гібридному режимі енергоустановка працює без залучення тягової батареї. За цих умов потужність, яку розвиває ДВЗ, більша за величину потужності на вихідному валу на величину електричних і механічних втрат у гібридній трансмісії.

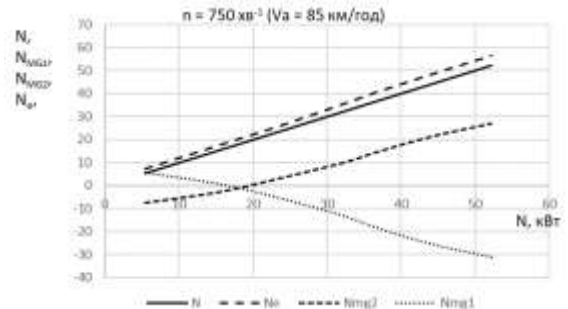
Ефективність ДВЗ визначається питомою ефективною витратою палива (рис. 4). Отримані залежності доводять порівняно високу ефективність використання палива в гібридному режимі. Це обумовлено як навантаженням ДВЗ, так і його конструктивними особливостями.



а



б



в

Рис. 3. Баланс потужностей елементів гібридної енергетичної установки з двигуном Toyota 1NZ-FXE: а – за частоти вихідного вала 250  $\text{хв}^{-1}$  (дорівнює швидкості автомобіля 28 км/год); б – за частоти вихідного вала 500  $\text{хв}^{-1}$  (дорівнює швидкості автомобіля 57 км/год); в – за частоти вихідного вала 750  $\text{хв}^{-1}$  (дорівнює швидкості автомобіля 85 км/год)

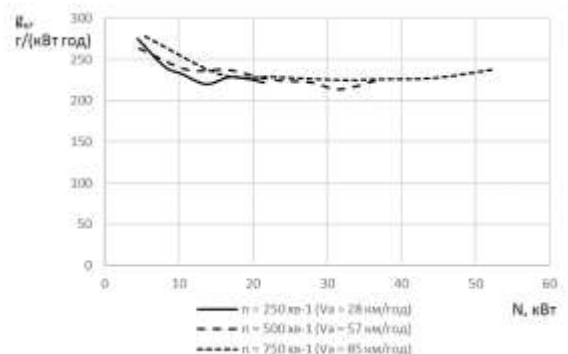


Рис. 4. Залежності питомої ефективно витрати палива ДВЗ від зовнішнього навантаження гібридної енергетичної установки з двигуном Toyota 1NZ-FXE

Мінімальний коефіцієнт наповнення циліндрів (рис. 5) повітрям становить орієнтовно 0,33, що дорівнює середньому навантаженню, а максимальний – 0,73.

Такі значення пояснюються особливостями організації робочого циклу із суттєвим запізненням закриття впускних клапанів для забезпечення високої ефективності витрачання палива зі зменшенням номінальної потужності.

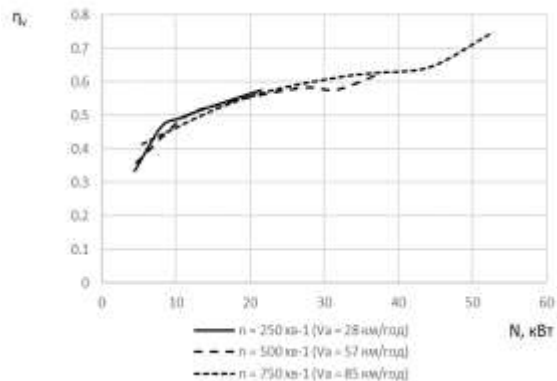


Рис. 5. Залежності коефіцієнта наповнення ДВЗ від зовнішнього навантаження гібридної енергетичної установки з двигуном Toyota 1NZ-FXE

Отже, у всіх експлуатаційних режимах ДВЗ має ефективний ККД на рівні 0,3–0,38 (рис. 6), а ККД гібридної енергоустановки з урахуванням ККД гібридної трансмісії – 0,22–0,33 (рис. 7).

Формування передаточного співвідношення гібридної трансмісії від ДВЗ забезпечується завдяки MG1, частота обертання якого є безступінчастим задавачем (рис. 8).

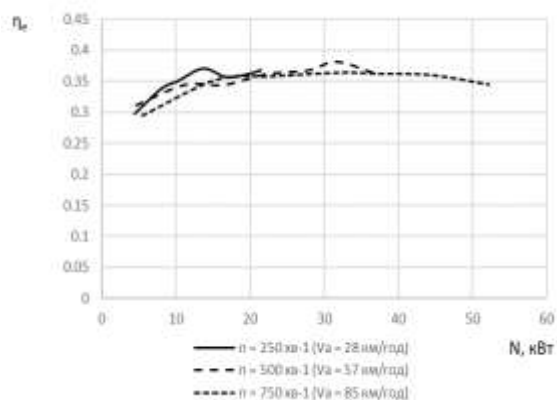


Рис. 6. Залежності ефективного коефіцієнта корисної дії ДВЗ від зовнішнього навантаження гібридної енергетичної установки з двигуном Toyota 1NZ-FXE

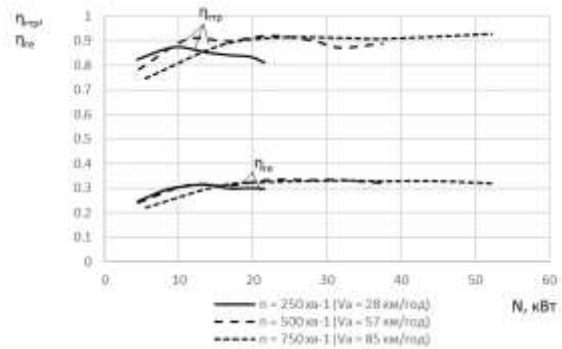


Рис. 7. Залежності коефіцієнта корисної дії гібридної трансмісії та енергоустановки з двигуном Toyota 1NZ-FXE від зовнішнього навантаження

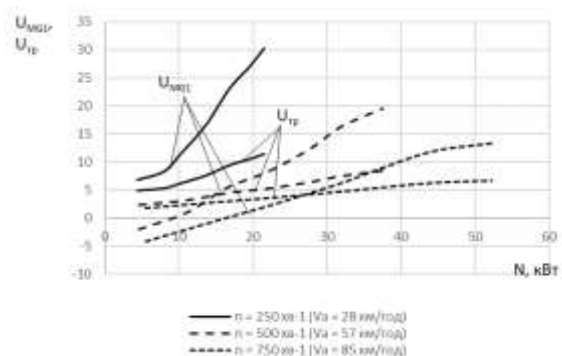


Рис. 8. Залежності передаточних співвідношень гібридної трансмісії від зовнішнього навантаження гібридної енергетичної установки з двигуном Toyota 1NZ-FXE

Внаслідок цього передаточні співвідношення MG1 і ДВЗ є лінійно залежними. Таким чином, гібридна трансмісія формує найвигідніший швидкісний і навантажувальний режим роботи ДВЗ і здійснює розподіл отриманої від нього механічної енергії за критерієм найбільшої ефективності.

## Висновки

Під час оброблення результатів експериментального дослідження здійснено аналіз показників ефективності й особливостей робочих процесів гібридної електричної автомобільної енергетичної установки на основі двигуна з іскровим запалюванням в експлуатаційних режимах. Визначено закономірності зміни залежно від частоти обертання вихідного вала та потужності енергоустановки показників: ефективного крутного моменту та частоти обертання колінчастого вала ДВЗ; баланс потужностей елементів гібридної енергетичної установки; питомої ефективної витрати палива, коефіцієнта наповнення

та ефективного ККД ДВЗ; ККД гібридної трансмісії та енергоустановки загалом; передаточних співвідношень гібридної трансмісії.

Визначено, що в гібридному режимі трансмісія формує найвигідніший швидкісний і навантажувальний режим роботи ДВЗ і здійснює розподіл отриманої від нього механічної енергії за критерієм найбільшої ефективності. Внаслідок організації робочого циклу із суттєвим запізненням закриття впускних клапанів забезпечується ефективний ККД ДВЗ на рівні 0,3...0,38, а ККД гібридної енергоустановки з урахуванням ККД гібридної трансмісії на рівні 0,22...0,33 у всіх досліджених експлуатаційних режимах.

Отримані результати є основою подальшого уточнення математичної моделі руху гібридного автомобіля з метою дослідження впливу окремих параметрів його енергоустановки на паливну економічність та екологічні показники.

#### Література

- Особливості конверсії автомобіля з ДВЗ в гібридний автомобіль / В. П. Матейчик та ін. Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. 2017. Вип. 3 (39). С. 87–96. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/39/087.pdf>
- Двадненко В., Дзюбенко О., Пушкар О. Розробка асинхронного електроприводу м'якого гібридного автомобіля. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. 2022. № 22. С. 47–53. URL: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.6>
- Гавриць А. П., Лаврівський М. З. Небезпеки електромобілів і гібридних транспортних засобів. Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Том 28 № 10. С. 66–70. URL: <https://doi.org/10.15421/40281014>
- Результати моделювання компонентів і робочих процесів гібридного автомобіля з асинхронним електродвигуном / М. Є. Сергієнко та інші. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Автомобіле- та тракторобудування». 2022. № 2. С. 31–47. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.04>
- Смирнов О. П. Науково-технічні основи підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів: автореф. дис. ...д-р техн. наук: 05.22.20. Харків, 2016. 40 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/2ef037f8-5ea9-4179-a75d-465ac98a3bcb/content>
- Бажинов О. В., Кравцов М. М. Визначення індексу якості електричних та гібридних транспортних засобів. Український журнал будівництва та архітектури. 2023. № 5. С. 19-26. URL: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.241023.19.989>
- Бажинов О. В., Бажинова Т. О., Кравцов М. М. Основи ефективного використання екологічно-чистих автомобілів: монографія. Харків: Видво ФОП Панов А.М., 2018. 200 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/a934d93a-cfc3-4364-9698-11cd30de9e80>
- Мауш Хакім. Підвищення енергоефективності автомобілів в умовах експлуатації за рахунок гібридних технологій: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.22.20. Харків, 2017. 18 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/7a33ca68-69ba-417b-8bf7-6d76162c4d3c>
- Taymaz I., Benli M. Emissions and fuel economy for a hybrid vehicle. Fuel. 2014. № 115. p.p. 812–817. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.045>
- Šarkan B., Gnap J., Kiktová M. The importance of hybrid vehicles in urban traffic in terms of environmental impact. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2019. № 85(3). Pp 115–122. URL: <https://doi.org/10.14669/am.vol85.art8>
- Saju C., Michael P.A., Jarin T. Modeling and control of a hybrid electric vehicle to optimize system performance for fuel efficiency. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. № 52. Pp. 102087. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102087>
- Mustafi N. N. An Overview of Hybrid Electric Vehicle Technology. In: Kalghatgi, G., Agarwal, A.K., Leach, F., Senecal, K. (eds) Engines and Fuels for Future Transport. Energy, Environment, and Sustainability. Singapore: Springer, 2022. Pp. 73–102. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8717-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8717-4_5)
- Wang Y., Wang Y., Ren G. A Brief Introduction to a Novel High-Efficiency Hybrid Power System for Hybrid Electric Urban Light Commercial Vehicles. SAE Int. J. Commer. Veh. 2021. № 14(2). Pp. 185–191. URL: <https://doi.org/10.4271/02-14-02-0014>
- Development of New 2.0-Liter Plug-in Hybrid System for the Toyota Prius / M. Tomita et al. SAE Technical Paper. 2024. № 2024-01-2169. 7 p. URL: <https://doi.org/10.4271/2024-01-2169>
- Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System / R. H. Staunton et al. Oak Ridge National Laboratory report. May 2006. 95 p. URL: <https://doi.org/10.2172/890029>

#### References

- Mateichyk, V. P., Tsiunan, M. P., Yanovskyi, V. V., & Rudenko, D. Ye. (2017). Osoblyvosti konversii avtomobilia z DVZ v hibrydnyi avtomobil [Peculiarities of conversion the automobile with internal combustion engine to hybrid automobile]. Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Seriiia "Tekhnichni nauky". Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk – The National Transport University Bulletin: A Scientific and Tech-

- nical Journal. Series "Technical sciences", 3(39), 87–96. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/39/087.pdf> [in Ukrainian]
2. Dvadenko, V., Dziubenko, O., & Pushkar, O. (2022). Rozrobka asynkhronnoho elektropryvodu miakoho hibrydnoho avtomobilia [Asynchronous Motor in a Mild Hybrid Vehicle]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii – Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, 22, 47–53. <https://doi.org/10.30977/veit.2022.22.0.6> [in Ukrainian]
  3. Havrys, A. P., & Lavrivskiy, M. Z. (2018). Nebezpeky elektromobiliv i hibrydnykh transportnykh zasobiv [Risks of Electric and Hybrid Vehicles]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of UNFU*, 28(10), 66–70. <https://doi.org/10.15421/40281014> [in Ukrainian]
  4. Sergienko, N., Pavlova, N., Sergienko, A., Lyubarsky, B., Borysenko, A., Kalinin, P., Gubskiy, S., & Dreval, O. (2023). Rezultaty modeliuvannya komponentiv i robochykh protseviv hibrydnoho avtomobilia z asynkhronnym elektrodvyhunom [Results of Modeling of Components and Working Processes of a Hybrid Car with an Asynchronous Motor]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seria: Avtomobile- ta traktorobuduvannya – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Automobile and Tractor Construction*, 2, 31–47. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.04> [in Ukrainian]
  5. Smyrnov, O. P. (2016). Naukovo-tekhnichni osnovy pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii hibrydnykh transportnykh zasobiv [Scientific and technical basis of increasing the operational efficiency of hybrid vehicles]. Extended abstract of Doctor's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
  6. Bazhynov, O. V., & Kravtsov, M. M. (2023). Vyznachennia indeksu yakosti elektrychnykh ta hibrydnykh transportnykh zasobiv [Determining the Quality Index of Electric and Hybrid Vehicles]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury – Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5, 19–26. <https://doi.org/10.30838/j.bpsacca.2312.241023.19.989> [in Ukrainian]
  7. Bazhynov, O. V., Bazhynova, T. O., & Kravtsov, M. M. (2018). Osnovy efektyvnoho vykorystannia ekolohichno-chystykh avtomobiliv: monohrafiia [Fundamentals of effective use of environmentally friendly vehicles: monograph]. Kharkiv: Vydavnytstvo FOP Panov A.M. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/a934d93a-cfc3-4364-9698-11cd30de9e80> [in Ukrainian]
  8. Maush Khakim. (2017). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti avtomobiliv v umovakh ekspluatatsii za rakhunok hibrydnykh tekhnolohii [Increase of the energy efficiency of vehicles by the use of hybrid technologies]. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
  9. Taymaz, I., & Benli, M. (2014). Emissions and fuel economy for a hybrid vehicle. *Fuel*, 115, 812–817. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.045> [in English].
  10. Šarkan, B., Gnap, J., & Kiktová, M. (2019). The importance of hybrid vehicles in urban traffic in terms of environmental impact. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, 85(3), 115–122. <https://doi.org/10.14669/am.vol85.art8> [in English].
  11. Saju, C., Michael, P. A., & Jarin, T. (2022). Modeling and control of a hybrid electric vehicle to optimize system performance for fuel efficiency. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102087. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102087> [in English].
  12. Mustafi, N. N. (2021). An Overview of Hybrid Electric Vehicle Technology. *Engines and Fuels for Future Transport*, 73–102. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8717-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8717-4_5) [in English].
  13. Wang, Y., Wang, Y., & Ren, G. (2021). A Brief Introduction to a Novel High-Efficiency Hybrid Power System for Hybrid Electric Urban Light Commercial Vehicles. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 14(2), 185–191. <https://doi.org/10.4271/02-14-02-0014> [in English].
  14. Tomita, M., Shibata, R., Mizuno, Y., Maeda, H., Murasato, K., Shimura, A., Takayama, T., Nakado, T., & Tomita, Y. (2024). Development of New 2.0-Liter Plug-in Hybrid System for the Toyota Prius. *SAE Technical Paper Series*, 1. <https://doi.org/10.4271/2024-01-2169> [in English].
  15. Staunton, R. H., Ayers, C. W., Marlin, L. D., Chiasson, J. N., & Burrell, B. A. (2006). Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). <https://doi.org/10.2172/890029> [in English].
- Цюман Микола Павлович**, к.т.н., проф.,  
зав. каф. двигунів і теплотехніки,  
[tsuman@ukr.net](mailto:tsuman@ukr.net),  
тел. +38 097-717-74-79,  
**Садовник Ігор Іванович**, асп. каф. двигунів і  
теплотехніки,  
[igorsid100@gmail.com](mailto:igorsid100@gmail.com),  
тел. +38 044-280-47-16
- Національний транспортний університет,  
вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ,  
01010, Україна,
- Evaluation of the efficiency indicators of a hybrid electric automotive power unit in operating modes**  
*Abstract. Problem. There remain significant unresolved critical problems related to the efficiency, reliability, and cost of hybrid electric power units. In Ukraine, the development of hybrid electric vehicle technologies is still at the formative stage, which encourages further research in this field, par-*

ticularly the study of existing technologies, their efficiency, and implementation features. This will enable the introduction and further development of automotive power units of this type in the domestic road transport sector to improve energy efficiency and environmental safety. **Goal.** The purpose of the study is to evaluate the efficiency indicators and the characteristics of the working processes of a hybrid electric automotive power unit based on a spark-ignition engine under operating modes. **Methodology.** Research method – analysis of the results of experimental bench tests of a hybrid electric automotive power unit under specified operating conditions in order to determine the patterns of variation in the energy performance and fuel economy of the internal combustion engine (ICE), the power balance of the hybrid power unit components, the efficiency of the power unit, and the control parameters of the hybrid transmission. **Results.** Based on the processing of the results of the experimental study, an evaluation of the efficiency indicators and the characteristics of the working processes of a hybrid electric automotive power unit based on a spark-ignition engine under operating modes was carried out. The patterns of variation, depending on the rotational speed of the output shaft and the power of the power unit, were determined for the following indicators: the effective torque and crankshaft speed of the ICE; the power balance of the hybrid power unit components; the specific effective fuel consumption, volumetric efficiency, and effective efficiency of the ICE; the efficiency of the hybrid transmission and of the power unit as a whole; and the transmission ratios of the hybrid transmission. **Originality.** It was determined that in hybrid mode the transmission forms the most favorable speed and load operating conditions for the ICE and distributes the mechanical energy received from it according to the criterion of maximum efficiency. As a result of organizing the operating

cycle with a significant delay in the closing of the intake valves, the effective efficiency of the ICE is ensured at a level of 0.30...0.38, while the efficiency of the hybrid power unit, taking into account the efficiency of the hybrid transmission, is 0.22...0.33 in all studied operating modes. **Practical value.** The results of the study will be useful in the practical activities of road transport enterprises for determining the feasibility of using hybrid electric vehicles. The obtained results provide a basis for further refinement of the mathematical model of hybrid vehicle motion in order to study the influence of individual parameters of its power unit on fuel economy and environmental performance.

**Key words:** efficiency indicators, hybrid automotive power unit, operating mode, power balance, fuel economy, energy performance, efficiency, hybrid transmission.

**Tsiuman Mykola<sup>1</sup>**, Ph.D., Prof., Head of Engines and Heating Engineering Department,

[tsuman@ukr.net](mailto:tsuman@ukr.net),

tel. +38 097-717-74-79,

<https://orcid.org/0000-0003-2537-8010>

**Sadovnyk Ihor<sup>1</sup>**, postgraduate, Engines and Heating Engineering Department,

[igorsid100@gmail.com](mailto:igorsid100@gmail.com),

tel. +38 044-280-47-16,

<https://orcid.org/0009-0002-4699-2079>

National Transport University, 1, Mykhaila Omeljanovycha-Pavlenka Str., Kyiv, 01010, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received: 12.02.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted: 23.02.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.

---