

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

ПОЛІПШЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ РАЦІОНАЛЬНИМ ВИБОРОМ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ

У статті на основі рівнянь потужнісного балансу з використанням результатів експериментальних досліджень розроблено математичну модель гібридного автомобіля Toyota Prius II, яка дозволяє визначити показники його енергоефективності та екологічної безпеки у заданих умовах руху.

Розроблено алгоритм вибору режиму роботи гібридного автомобіля, що досягається залежно від умов руху, параметрів енергоустановки, виконання контрольних та граничних умов, дозволяє реалізувати конкретну стратегію управління та впливає на його показники енергоефективності та екологічної безпеки.

Для оцінювання впливу параметрів енергоустановки гібридного автомобіля та його управління на показники енергоефективності та екологічної безпеки запропоновано коефіцієнти максимальної ємності та потужності тягової батареї, а також граничну швидкість переходу у гібридний режим. Залежно від цих параметрів виконано математичне моделювання показників енергоефективності та екологічності гібридного автомобіля Toyota Prius II у їздовому циклі за Правилами ООН № 83.

За результатами моделювання встановлено, що з токи зору поліпшення показників енергоефективності та екологічної безпеки найбільш ефективним є застосування стратегії управління з переходом у гібридний режим на швидкостях понад 40 км/год, забезпечуючи відбір електричної потужності від тягової батареї на рівні не більше 50% від номінальної за умови наявної ємності батареї в межах 50-100 % від номінальної. Це дозволяє досягти зменшення витрати палива гібридного автомобіля порівняно з традиційним автомобілем з ДВЗ до 42 %, викидів CO до 29 %, C_mH_n до 52 %, CO_2 до 46% при зростанні викидів NO_x до 33 %.

Ключові слова: потужнісний баланс, гібридний автомобіль, енергоефективність, екологічна безпека, параметри управління, тягова батарея, гібридний режим, їздовий цикл.

ВСТУП

Найбільш поширеними енергоустановками на автомобільному транспорті сьогодні є установки на базі двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Внаслідок цього, такі автомобілі є потужними споживачами рідких та газоподібних палив та забруднювачами довкілля продуктами їхнього згоряння. Загальна енергоефективність та екологічність автомобіля залежить від досконалості робочих процесів, виду та походження палива, параметрів управління, умов експлуатації, технічного стану, тощо.

До сучасних автомобілів застосовують все більш жорсткі вимоги щодо викидів забруднюючих речовин, зокрема, діоксиду вуглецю CO_2 . Знаною мірою ці викиди залежать від паливної економічності. Одним із напрямів підвищення паливної економічності автомобілів є зближення найбільш енергоефективних режимів роботи ДВЗ та режимів руху автомобіля, зокрема з використанням гібридної електричної енергоустановки та трансмісії.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Останнім часом дослідженню питань, пов'язаних з показниками паливної ефективності та екологічності гібридних електричних транспортних засобів, присвячено численні наукові публікації [1-9]. Переважно дослідження направлені на: удосконалення алгоритмів управління тяговим асинхронним двигуном м'якого гібридного автомобіля шляхом збільшення ефективності рекуперативного гальмування для покращення економічних та екологічних параметрів [1]; дослідження динаміки параметрів елементів гібридного автомобіля з послідовно-паралельним приводом за допомогою імітаційного моделювання у середовищі Matlab / Simulink [2]; підвищення ефективності експлуатації гібридних транспортних засобів за рахунок раціонального використання ДВЗ та електричних двигунів [3]; дослідження методів оцінювання показників якості електричних та гібридних автомобілів на етапі експлуатації залежно від середньої швидкості руху автомобіля [4]; дослідження в міських умовах економічних характеристик переобладнаного гібридного автомобіля [5]; математичне моделювання показників паливної економічності та рівня викидів CO_2 в умовах неусталеного руху звичайного комерційного автомобіля та спроектованого на його базі гібридного автомобіля [6]; питання оптимального керування компонентами приводу гібридного автомобіля [7]; дослідження нової гібридної енергетичної установки на основі лінійного вільнопоршневого двигуна

[8]; нові технології Toyota по удосконаленню гібридних автомобілів Toyota Prius для збільшення їхньої ефективності та зниження викидів CO₂ [9].

Аналіз результатів вказаних досліджень свідчить про значний інтерес дослідників та розробників автомобілів до технологій гібридного енергозабезпечення транспорту. Однак, питання оптимального проектування та ефективної експлуатації гібридних автомобілів з точки зору енергоефективності, надійності, вартості та екологічності не є до кінця вирішеними, що спонукає до проведення подальших наукових досліджень.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є поліпшення показників енергоефективності та екологічної безпеки гібридного автомобіля раціональним вибором його параметрів управління відповідно до умов руху.

Для досягнення мети вирішують наступні завдання:

- розроблення математичної моделі гібридного автомобіля, яка дозволить визначити показники його енергоефективності та екологічної безпеки у заданих умовах руху;
- розроблення алгоритму вибору режиму роботи гібридного автомобіля, що досягається залежно від умов руху, параметрів енергоустановки, виконання контрольних та граничних умов;
- визначення параметрів, що дозволять виконати оцінювання впливу параметрів енергоустановки гібридного автомобіля та його управління на показники енергоефективності та екологічної безпеки;
- математичне моделювання показників енергоефективності та екологічності гібридного автомобіля Toyota Prius II у їздовому циклі за Правилами ООН № 83.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Математичне моделювання руху гібридного автомобіля базується на відомому рівнянні потужнісного балансу автомобіля у даний момент часу [10]:

$$N = N_{\psi} + N_W + N_j = \left(M_a g \psi + C_x \frac{p_0}{R_{\text{нов}} T_0} F_a \frac{V_a^2}{2} + M_a \delta_{об} j_a \right) \cdot V_a \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

де N – потужність на ведучих колесах, кВт; N_{ψ} – потужність дорожнього опору, кВт; N_W – потужність опору повітря, кВт; N_j – потужність опору інерції, кВт; M_a – поточна маса автомобіля, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; ψ – коефіцієнт дорожнього опору; C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору; p_0 – атмосферний тиск, Па; T_0 – температура навколишнього повітря, К; $R_{\text{нов}}$ – газова стала повітря, Дж/(кг·К); F_a – площа фронтального перерізу автомобіля, м²; V_a – швидкість автомобіля, м/с; $\delta_{об}$ – коефіцієнт обертових мас автомобіля; j_a – прискорення автомобіля, м/с².

Потужність на ведучих колесах автомобіля формується відповідно до роботи наявних джерел енергії. З урахуванням відомих схем гібридних автомобільних енергетичних установок, у загальному випадку модель енергетичних та масових потоків у гібридному автомобілі можна представити у вигляді схеми (рис. 1).

На рис. 1 і далі в тексті використано наступні позначення: r_w – радіус кочення колеса, м; $I_K, I_{\delta}, I_{MG1}, I_{MG2}$ – момент інерції колеса, двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), MG1, MG2, кг·м²; $M, M_e, M_{MG1}, M_{MG2}, M_{MG2}^{\max}$ – крутний момент на ведучих колесах (вихідному валі енергоустановки), ДВЗ, MG1, поточний та максимальний крутний момент MG2, Н·м; $n, n_{\delta}, n_{MG1}, n_{MG2}, n_{MG1}^{\max}$ – частота обертання ведучих коліс (вихідного вала енергоустановки), колінчастого вала ДВЗ, MG1, MG2, максимальна частота обертання вала MG1, хв⁻¹; $U_{mp}, U_{MG1}, U_0, U_{MG}$ – передаточні відношення гібридної трансмісії від двигуна, MG1, MG2, між MG1 та MG2; $\eta_{mp}, \eta_{mp}, \eta_{MG1}, \eta_{MG2}, \eta_e$ – коефіцієнти корисної дії гібридної трансмісії, механічної частини трансмісії, MG1, MG2, ДВЗ; $k_{N_{доMG}}$ – коефіцієнт розподілу потужності ДВЗ між електричними елементами та передачею на ведучі колеса; $N_e, N_{MG1}, N_{MG2}, N_{MG2}^{\max}, N_{BAT}, N_{BAT}^{ch}, N_{BAT}^{\max}$ – ефективна потужність ДВЗ, MG1, поточна та максимальна потужність MG2, потужність розрядження, зарядження та максимальна потужність батареї, кВт; S_{ch}, S_{ch}^{trg} – поточний та цільовий рівень заряду батареї, %; δ_{BAT}^{ch} – коефіцієнт потужності

заряджання батареї; m_{BAT} – маса батареї, кг; $\rho_{Q_{BAT}}$ – питома ємність батареї, кВт·год/кг; $k_{Q_{BAT}}, k_{N_{BAT}}$ – коефіцієнти максимальної ємності та потужності батареї; Q_{BAT}, Q_{BAT}^{max} – поточна та максимальна ємність батареї, кВт·год; $i_{ц}$ – число циліндрів ДВЗ; D, S – діаметр циліндра та хід поршня ДВЗ, м; η_v – коефіцієнт наповнення циліндрів ДВЗ; α – коефіцієнт надміру повітря ДВЗ; g_e – питома ефективна витрата палива ДВЗ г/(кВт·год); $G_{нов}, G_{нал}, G_{ВГ}, G_{CO}, G_{C_mH_n}, G_{NO_x}, G_{CO_2}$ – годинні витрати повітря, палива, ВГ та викиди CO, C_mH_n, NO_x, CO_2 , кг/год; l_0 – теоретично необхідна кількість повітря для згоряння палива, кг повітря/кг палива; g_C, g_H, g_O – масові частки у паливі вуглецю, водню, кисню; h_n – нижча теплота згоряння палива, Дж/кг; $k_{нал}$ – відношення кількості водню до кількості СО у ВГ; m_H – маса каталітичного нейтралізатора, кг; C_H – теплоємність матеріалу каталітичного нейтралізатора, кДж/(кг·К); $T_{ВГ}$ – температура ВГ, К; $\mu_{C_{vмПЗ}}$ – середня ізохорна мольна теплоємність продуктів згоряння, кДж/(кмоль·К); $\mu_{ПЗ}$ – мольна маса продуктів згоряння, кг/кмоль; $k_{ПЗ}$ – показник адиабати продуктів згоряння; T_H – температура каталітичного нейтралізатора, К; $C_{CO}, C_{C_mH_n}, C_{NO_x}, C_{CO_2}$ – концентрації у ВГ CO, C_mH_n, NO_x, CO_2 , %, млн⁻¹; $E_{CO}, E_{C_mH_n}, E_{NO_x}$ – ефективність нейтралізації CO, C_mH_n, NO_x .

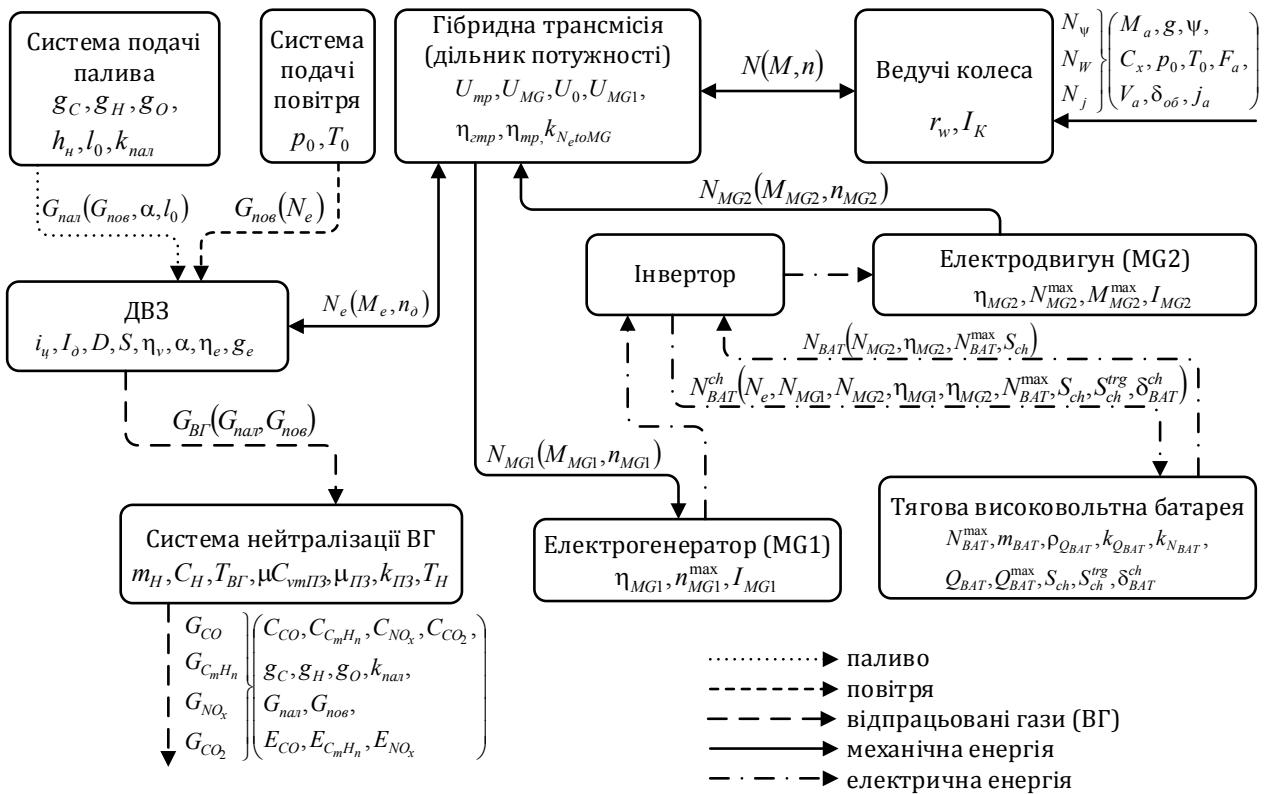


Рисунок 1 – Модель енергетичних та масових потоків у гібридному автомобілі

Як видно зі схеми, потужність на ведучих колесах (вихідному валі енергоустановки), яка є функцією крутного моменту і частоти обертання, об'єднує потужності елементів енергоустановки, кВт:

$$N = f(M, n) = N_e + N_{MG1} + N_{MG2}. \tag{2}$$

Використання тих чи інших елементів гібридної енергоустановки для забезпечення руху визначається системою управління відповідно до швидкісного та навантажувального режиму руху транспортного засобу, рівня заряду батареї, вибраного водієм режиму роботи енергоустановки тощо. Залежно від конкретних умов може бути реалізовано наступні режими роботи:

- режим заряджання на зупинці (автомобіль не рухається, ДВЗ працює та передає механічну енергію до MG1 в режимі електрогенератора, який перетворює отриману енергію в електричну та через інвертор заряджає тягову високовольтну батарею);

- режим рекуперативного гальмування (автомобіль рухається зі сповільненням, отримана механічна енергія від ведучих коліс передається до MG2 в режимі електрогенератора, який перетворює отриману енергію в електричну та через інвертор заряджає тягову високовольтну батарею; ДВЗ вимкнено або у разі високої швидкості чи необхідності застосування додаткового гальмівного моменту ДВЗ може продовжувати працювати в режимі примусового прокручування, споживаючи частину механічної енергії, для захисту MG1 від надмірної швидкості обертання);

- електричний режим із заряджанням у русі (автомобіль рухається зі швидкістю та навантаженням, які не перевищують встановлені у вибраному водієм режимі або допустимі з токи зору максимальної потужності MG2 та/або високовольтної батареї, а високовольтна батарея має рівень заряду нижче цільового; механічна енергія для подолання сил опору руху виробляється MG2, який працює в режимі електродвигуна, споживаючи електричну енергію від батареї; ДВЗ працює та виробляє механічну енергію для приводу MG1, який працює в режимі електрогенератора та виробляє електричну енергію, заряджаючи високовольтну батарею; при цьому, потужність ДВЗ має забезпечити потужність заряджання батареї вищу, ніж потужність розряджання);

- електричний режим (автомобіль рухається зі швидкістю та навантаженням, які не перевищують встановлені у вибраному водієм режимі або допустимі з токи зору максимальної потужності MG2 та/або високовольтної батареї, а високовольтна батарея має рівень заряду вище цільового; ДВЗ вимкнено, а механічна енергія для подолання сил опору руху виробляється MG2, який працює в режимі електродвигуна, споживаючи електричну енергію від батареї);

- гібридний режим (автомобіль рухається зі швидкістю та навантаженням, які перевищують встановлені у вибраному водієм режимі або допустимі з токи зору максимальної потужності MG2 та/або високовольтної батареї; механічна енергія для подолання сил опору руху виробляється ДВЗ, який виробляє механічну енергію та підводить її до дільника потужності гібридної трансмісії; частина механічної енергії споживається MG1, який працює у режимі електрогенератора, підтримуючи частоту обертання, необхідну для формування визначеного у даному режимі руху передаточного відношення трансмісії, та передає вироблену електричну енергію через інвертор для живлення MG2, що працює у режимі електродвигуна; інша частина механічної енергії ДВЗ після дільника потужності (неспожита MG1) та механічна енергія, вироблена MG2, підводяться до ведучих коліс автомобіля; електрична енергія не підводиться та не споживається високовольтною батареєю);

- режим повного навантаження (автомобіль рухається з повністю натиснутою водієм педаллю акселератора; рівень заряду високовольтної батареї не нижче мінімально допустимого; механічна енергія для подолання сил опору руху виробляється ДВЗ, який працює у номінальному режимі, виробляє механічну енергію та підводить її до дільника потужності гібридної трансмісії; частина механічної енергії споживається MG1, який працює у режимі електрогенератора, підтримуючи частоту обертання, необхідну для формування передаточного відношення трансмісії, що забезпечує отримання номінальної частоти обертання колінчастого вала ДВЗ, та передає вироблену електричну енергію через інвертор для живлення MG2, що працює у режимі електродвигуна, споживаючи також електричну енергію від високовольтної батареї; інша частина механічної енергії ДВЗ після дільника потужності (неспожита MG1) та механічна енергія, вироблена MG2, підводяться до ведучих коліс автомобіля).

Вибір режиму роботи здійснюється системою управління гібридної енергоустановки за алгоритмом (рис. 2).

Представлений алгоритм базується на низці умов, виконання чи невиконання яких призводить до вибору відповідного режиму роботи. Вказані умови порівнюють: значення поточної швидкості автомобіля з нульовим значенням (умова зупинки), з мінімальною швидкістю руху у гібридному режимі $V_a^{\min_{ДВЗ}}$, з максимальною швидкістю руху в електричному режимі $V_a^{\max_{EV}}$; значення прискорення відносно нульового значення (умови прискорення або сповільнення); значення ступеня натискання на педаль акселератора ϕ_a з максимальним натисканням (умова повного навантаження); значення поточного рівня заряду високовольтної батареї із цільовим (умова необхідності заряджання), мінімальним S_{ch}^{\min} та максимальним S_{ch}^{\max} рівнем заряду; значення частоти обертання вала MG1 із максимально допустимим значенням (умова захисту гібридної трансмісії від перевищення частоти обертання); значення безперервного часу роботи ДВЗ $\tau_{ДВЗ}$ із мінімально

доцільним часом $\tau_{ДВЗ}^{\min}$ (умова мінімізації пусків-зупинок ДВЗ); значення поточної та максимальної за поточних умов потужності MG2 (умова можливості руху у електричному режимі); значення поточної та максимальної потужності високовольтної батареї (умова достатності потужності батареї для живлення електродвигуна) з урахуванням коефіцієнта потужності заряджання; значення потужності опору на ведучих колесах автомобіля та наявної потужності гібридної енергоустановки (умова достатності потужності енергоустановки для поточних умов руху). Зміна вказаних контрольних або граничних умов призводить до фактичних змін у виборі режиму роботи у конкретних умовах руху гібридного автомобіля, що має вплив на його показники енергоефективності та екологічної безпеки.

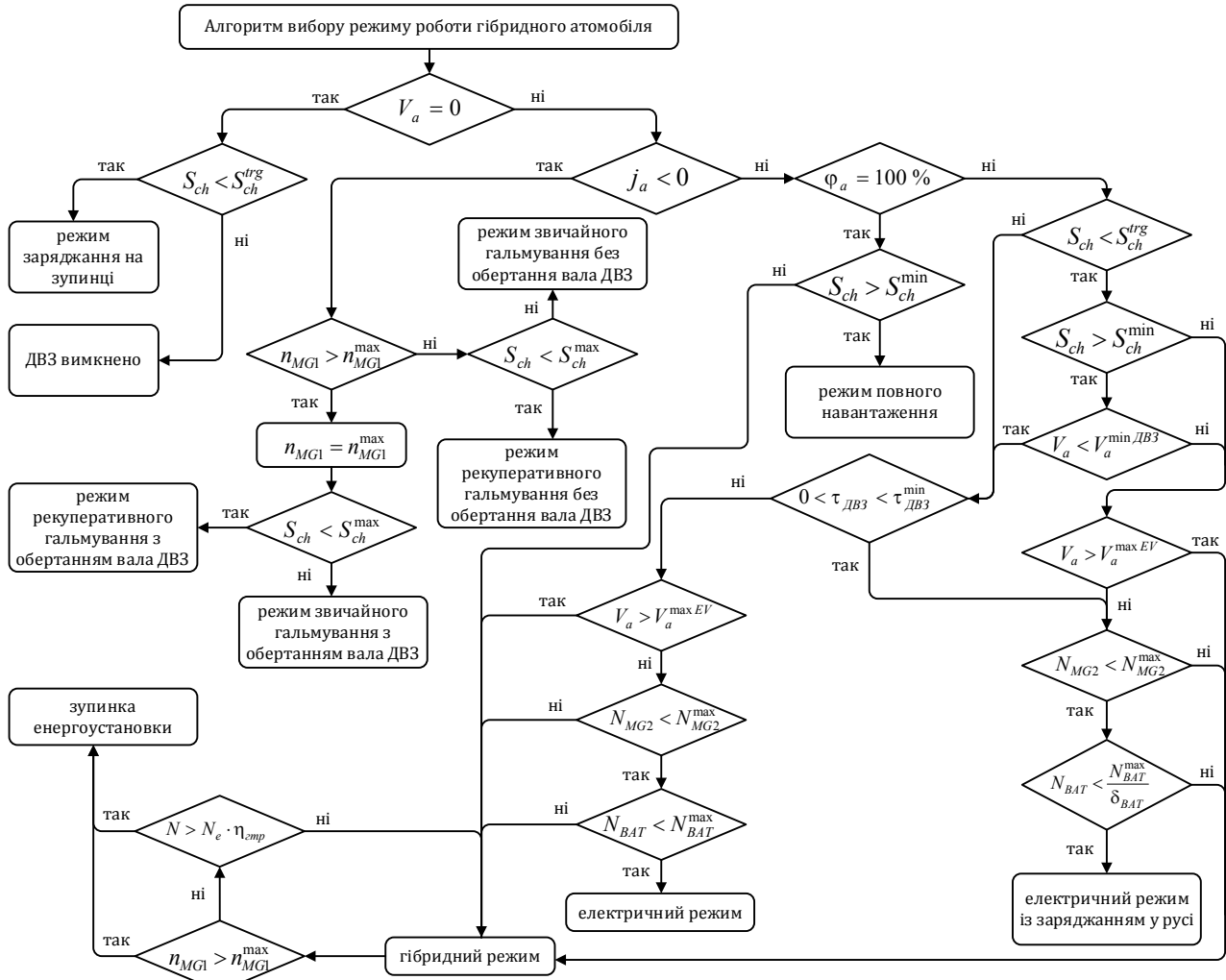


Рисунок 2 – Алгоритм вибору режиму роботи гібридного автомобіля

Поточні швидкість та прискорення гібридного автомобіля визначаються конкретними дорожніми і транспортними умовами руху. Поточна частота обертання ведучих коліс (вихідного вала енергоустановки) визначається із відомої залежності, хв⁻¹:

$$n = \frac{30 \cdot V_a}{\pi \cdot r_w} \tag{3}$$

Частота обертання вала MG2, хв⁻¹:

$$n_{MG2} = n \cdot U_0 \tag{4}$$

Частота обертання колінчастого вала ДВЗ, хв⁻¹:

$$\begin{cases} n_{\partial} = 0 - \text{у режимах з вимкненим ДВЗ}; \\ n_{\partial} = n_{\partial}^{\min} \text{ при } V_a = 0; \\ n_{\partial} = n \cdot U_{mp} \leq n_{\partial}^{\max} \text{ при } V_a > 0, \end{cases} \quad (5)$$

де n_{∂}^{\min} , n_{∂}^{\max} – мінімальна та максимальна робочі частоти обертання колінчастого вала ДВЗ, хв^{-1} .

Частота обертання вала MG1, хв^{-1} :

$$\begin{cases} n_{MG1} = 0 \text{ при } V_a = 0 \text{ з вимкненим ДВЗ}; \\ n_{MG1} = n_{\partial} \cdot (1 - U_{MG}) \text{ при } V_a = 0; \\ n_{MG1} = n \cdot U_{MG1} \leq n_{MG1}^{\max} \text{ при } V_a > 0. \end{cases} \quad (6)$$

У випадку застосування планетарної передачі у гібридній трансмісії між MG1 та MG2 передаточне відношення від ДВЗ буде визначатись як

$$U_{mp} = \frac{U_{MG1} - U_{MG} \cdot U_0}{1 - U_{MG}}. \quad (7)$$

Оскільки, передаточні відношення U_{MG} та U_0 є фіксованими та визначені конструкцією відповідних елементів трансмісії, то передаточне відношення трансмісії U_{mp} від ДВЗ в експлуатаційних режимах руху буде визначатись значенням U_{MG1} , тобто, частотою обертання вала MG1 у даному швидкісному режимі. Для конкретної енергоустановки ці передаточні відношення та закони їх управління будуть визначатись найвигіднішими з точки зору енергоефективності ДВЗ та електричних компонентів швидкісними та навантажувальними режимами роботи. Експериментальні стендові дослідження гібридної енергоустановки автомобіля Toyota Prius II у лабораторії кафедри двигунів і теплотехніки Національного транспортного університету [11] дозволяють сформулювати наступну емпіричну залежність для визначення U_{MG1} :

$$U_{MG1} = \left(2^{\frac{n}{82}-1.5} - 0.0017 \right) \cdot N^2 + \left(-0.000001734 n^2 + 0.001826 n + 0.058 \right) \cdot N + 2^{\frac{n}{120}+5.55} - 7.5. \quad (8)$$

У режимах з вимкненим ДВЗ

$$U_{MG1} = U_{MG} \cdot U_0. \quad (9)$$

Кінематичні параметри гібридної енергоустановки дозволяють визначити потужнісні показники. Для енергоустановки Toyota Prius II за результатами експериментальних досліджень визначена наступна залежність потужності ДВЗ від частоти обертання колінчастого вала, кВт:

$$\begin{aligned} N_e = & -88.57882 + 0.17682 \cdot n_{\partial} - 1.26655 \cdot 10^{-4} \cdot n_{\partial}^2 + \\ & + 4.62688 \cdot 10^{-8} \cdot n_{\partial}^3 - 8.08273 \cdot 10^{-12} \cdot n_{\partial}^4 + 5.42612 \cdot 10^{-16} \cdot n_{\partial}^5. \end{aligned} \quad (10)$$

Потужність MG2 визначається залежно від режиму роботи, кВт:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{MG2} = 0 \text{ при } V_a = 0; \\ N_{MG2} = N \cdot \eta_{mp} - N_e \geq \\ \geq -\frac{N_{BAT}^{\max}}{\eta_{MG2}} \vee -N_{MG2}^{\max}(n_{MG2}) \text{ у режимі рекуперативного гальмування при } S_{ch} < S_{ch}^{\max}; \\ N_{MG2} = \frac{N}{\eta_{mp}} \leq \frac{N_{BAT}^{\max}}{\delta_{BAT}^{ch}} \cdot \eta_{MG2} \vee N_{BAT}^{\max} \cdot \eta_{MG2} \vee N_{MG2}^{\max}(n_{MG2}) \text{ у електричному режимі;} \\ N_{MG2} = k_{N_{etoMG}} \cdot N_e \cdot \eta_{MG1} \cdot \eta_{MG2} \leq N_{MG2}^{\max}(n_{MG2}) \text{ у гібридному режимі.} \end{array} \right. \quad (11)$$

Коефіцієнт розподілу потужності ДВЗ між електричними елементами та передачею на ведучі колеса визначається системою управління з урахуванням найоптимальніших режимів роботи електричних елементів за енергоефективністю. Для енергоустановки Toyota Prius II за результатами експериментальних досліджень визначена наступна залежність:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{N_{etoMG}} = -\frac{U_{MG1}}{4.2} \leq 1 \text{ при } U_{MG1} < 0; \\ k_{N_{etoMG}} = -2 \frac{U_{MG1}^{0.75}}{6} + 1 \text{ при } U_{MG1} \geq 0. \end{array} \right. \quad (12)$$

Потужність високовольтної батареї, кВт:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{BAT} = \frac{N_{MG2}}{\eta_{MG2}} \leq \frac{N_{BAT}^{\max}}{\delta_{BAT}^{ch}} \vee N_{BAT}^{\max} \text{ у електричному режимі;} \\ N_{BAT} = 0 \text{ у інших режимах.} \end{array} \right. \quad (13)$$

Потужність заряджання високовольтної батареї, кВт:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{BAT}^{ch} = -N_e \cdot \eta_{MG1} \geq -N_{BAT}^{\max} \text{ під час заряджання на зупинці та у електричному режимі;} \\ N_{BAT}^{ch} = N_{MG2} \cdot \eta_{MG2} \geq -N_{BAT}^{\max} \text{ у режимі рекуперативного гальмування при } S_{ch} < S_{ch}^{\max}; \\ N_{BAT}^{ch} = 0 \text{ при } S_{ch} \geq S_{ch}^{trg} \text{ або } S_{ch} \geq S_{ch}^{\max} \text{ або у гібридному режимі.} \end{array} \right. \quad (14)$$

На основі даних про потужність елементів енергетичної установки з'являється можливість визначити показники ефективності перетворення енергії (коефіцієнти корисної дії (ККД), витрати та накопичення електричної енергії у високовольтній батареї, витрат повітря та палива ДВЗ, викидів забруднюючих речовин.

ККД гібридної трансмісії визначається залежно від режиму роботи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{emp} = 0 \text{ при } V_a = 0; \\ \eta_{emp} = \frac{N_{MG2}}{N} = \eta_{mp} - \frac{N_e}{N} \text{ у режимі рекуперативного гальмування;} \\ \eta_{emp} = \frac{N}{N_{MG2}} = \eta_{mp} \text{ у електричному режимі;} \\ \eta_{emp} = \frac{N}{N_e} = \eta_{mp} \cdot (k_{N_{etoMG}} \cdot (\eta_{MG1} \cdot \eta_{MG2} - 1) + 1) \text{ у гібридному режимі.} \end{array} \right. \quad (15)$$

Поточна ємність високовольтної батареї у i -й момент часу, кВт·год:

$$Q_{BAT i} = Q_{BAT i-1} - (N_{BAT} + N_{BAT}^{ch}) \cdot \frac{d\tau}{3600} \leq Q_{BAT}^{\max}, \quad (16)$$

де $d\tau$ – розрахунковий проміжок часу, с.
Максимальна ємність батареї, кВт·год:

$$Q_{BAT}^{max} = m_{BAT} \cdot \rho_{Q_{BAT}} \cdot k_{Q_{BAT}} \quad (17)$$

Максимальна потужність батареї, кВт:

$$N_{BAT}^{max} = k_{N_{BAT}} \cdot N_{BATn}^{max} \quad (18)$$

де N_{BATn}^{max} – номінальна максимальна потужність батареї, кВт.

Рівень заряду батареї, %:

$$S_{ch} = \frac{Q_{BAT}}{Q_{BAT}^{max}} \cdot 100. \quad (19)$$

Як встановлено за результатами експериментальних досліджень гібридної енергоустановки Toyota Prius II, система управління забезпечує керування швидкісним та навантажувальним режимом ДВЗ залежно від зовнішнього навантаження таким чином, що незалежно від швидкості автомобіля вплив на частоту обертання та ступінь відкриття дросельної заслінки ДВЗ має лише потужність на виході з енергоустановки, а між значеннями потужності та витрати повітря ДВЗ встановлюється лінійна залежність без впливу частоти обертання колінчастого вала. Отримана за результатами обробки даних експериментальних досліджень залежність витрати повітря ДВЗ має вигляд, кг/год:

$$G_{nog} = 8.26796 + 2.64415 \cdot N_e + 0.01114 \cdot N_e^2. \quad (20)$$

Годинна та питома витрати палива, ефективний ККД ДВЗ визначаються залежно від витрати повітря, ефективної потужності та теплоти згоряння палива за відомими залежностями [12].

Викиди забруднюючих речовин визначаються за відомою методикою, розробленою у Національному транспортному університеті з урахуванням концентрацій забруднюючих речовин у відпрацьованих газах, ефективності нейтралізації. Для визначення останньої може бути застосована методика, описана в роботі [13], яка враховує хімічні та температурні умови роботи системи нейтралізації. Концентрації основних забруднюючих речовин у відпрацьованих газах перед нейтралізатором за коефіцієнта надміру повітря $\alpha = 1$ описуються залежностями, визначеними за результатами експериментальних досліджень гібридної енергоустановки.

Концентрація CO, %:

$$C_{CO} = -1 \cdot 10^{-6} \cdot N_e^3 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot N_e^2 + 4.6 \cdot 10^{-3} \cdot N_e + 0.5489. \quad (21)$$

Концентрації C_{mH_n} та NO_x , млн⁻¹:

$$C_{C_mH_n} = -2.7 \cdot 10^{-3} \cdot N_e^3 + 0.2362 \cdot N_e^2 - 7.9653 \cdot N_e + 271.08, \quad (22)$$

$$C_{NO_x} = 0.0337 \cdot N_e^3 - 3.8658 \cdot N_e^2 + 159.65 \cdot N_e + 10313. \quad (23)$$

Концентрація CO₂ визначається за методикою [13].

За визначеними витратою палива та викидами забруднюючих речовин енергоустановкою у окремих режимах роботи розраховуються сумарні за пройдений шлях та пробігові витрати і викиди, які дають можливість оцінити ефективність гібридної енергоустановки в умовах експлуатації автомобіля.

З використанням розробленої математичної моделі досліджено вплив коефіцієнтів максимальної ємності та потужності батареї на показники енергоефективності та екологічності гібридного автомобіля за різних граничних швидкостей переходу в гібридний режим у їздовому циклі за Правилами ООН № 83 (рис. 3-7).

Ємність високовольтної батареї змінювали від максимальної (100 % номінальної ємності, вказаної у технічних характеристиках) до мінімально можливої (за якої можливе рушення з місця та розгін автомобіля до мінімальної швидкості переходу в гібридний режим без зниження рівня заряду нижче S_{ch}^{min}). Максимальну потужність батареї змінювали від максимальної (100 % номінальної потужності батареї, вказаної у технічних характеристиках) до мінімально можливої (за якої можливе рушення з місця та розгін автомобіля до мінімальної швидкості переходу в гібридний режим). Граничну швидкість переходу в гібридний режим задавали в межах від максимально можливої (обмеженої лише потужністю сил опору руху автомобіля, яка перевищує задану максимальну потужність батареї з урахуванням ККД елементів гібридного автомобіля, які забезпечують електромеханічне перетворення енергії) до мінімальної (визначеної умовами руху автомобіля з мінімальною швидкістю у гібридному режимі).

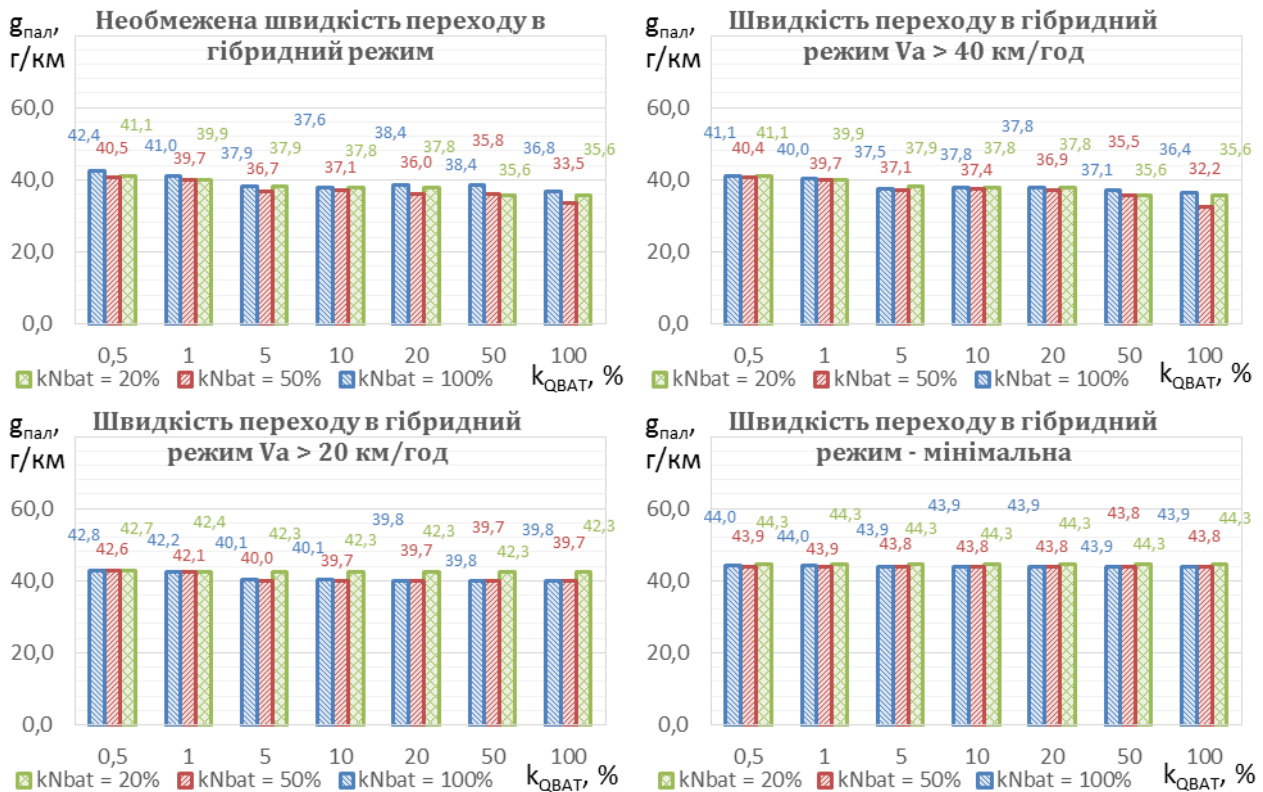
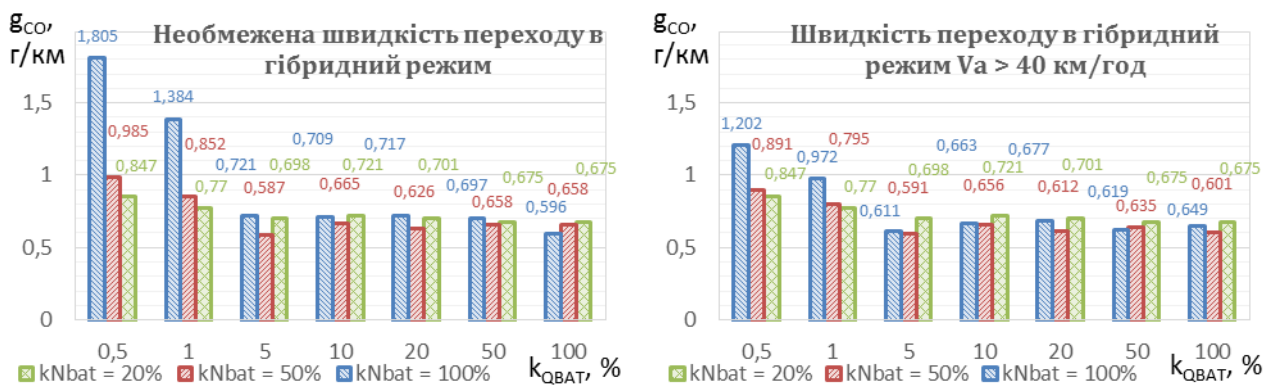


Рисунок 3 – Залежності витрати палива гібридного автомобіля від граничної швидкості переходу в гібридний режим, максимальної потужності та ємності високовольтної батареї



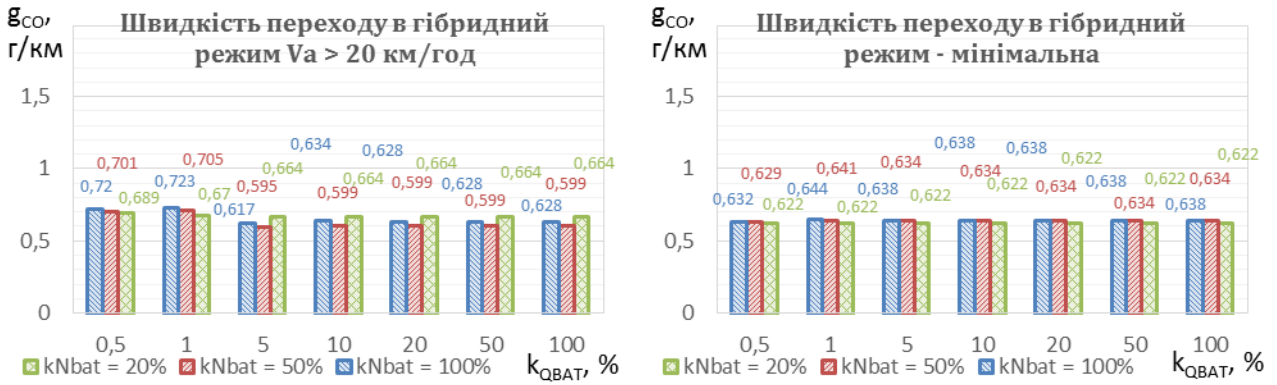


Рисунок 4 – Залежності викидів CO гібридного автомобіля від граничної швидкості переходу в гібридний режим, максимальної потужності та ємності високовольтної батареї

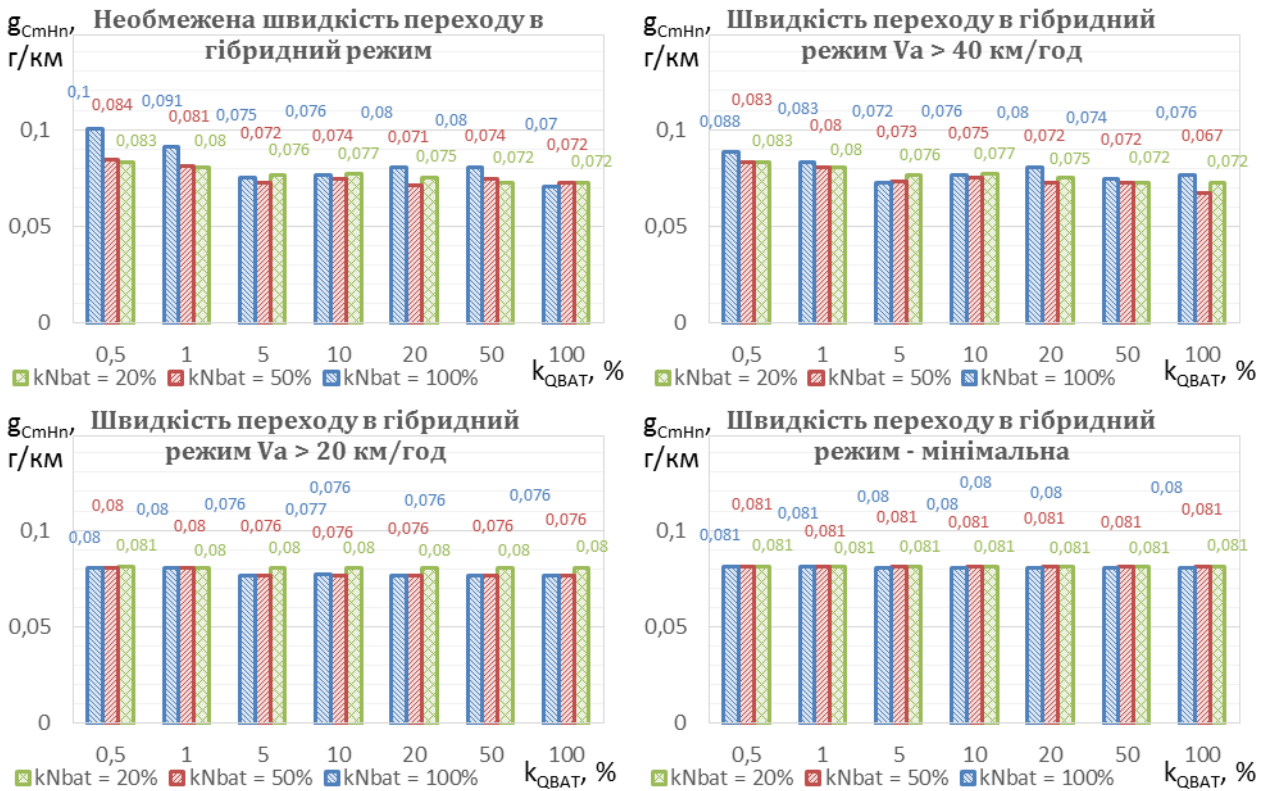
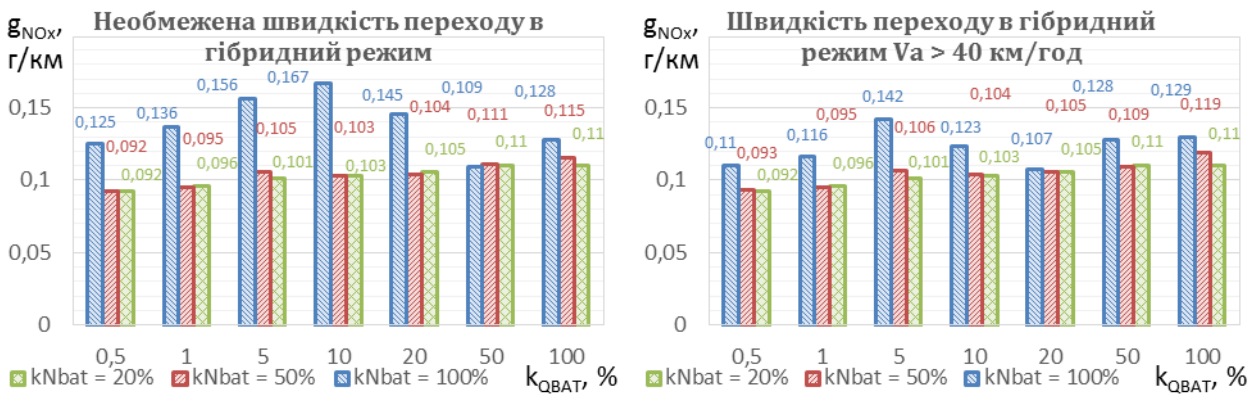


Рисунок 5 – Залежності викидів C_mH_n гібридного автомобіля від граничної швидкості переходу в гібридний режим, максимальної потужності та ємності високовольтної батареї



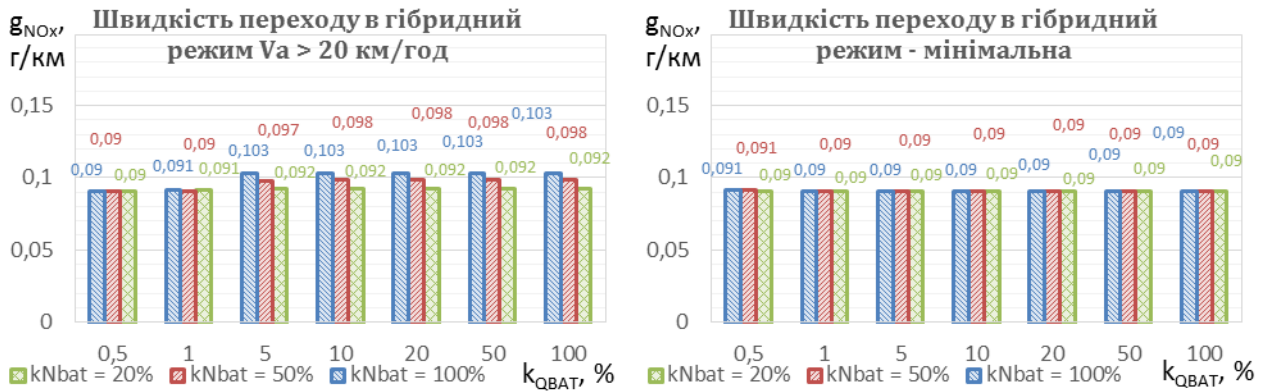


Рисунок 6 – Залежності викидів NO_x гібридного автомобіля від граничної швидкості переходу в гібридний режим, максимальної потужності та ємності високовольтної батареї

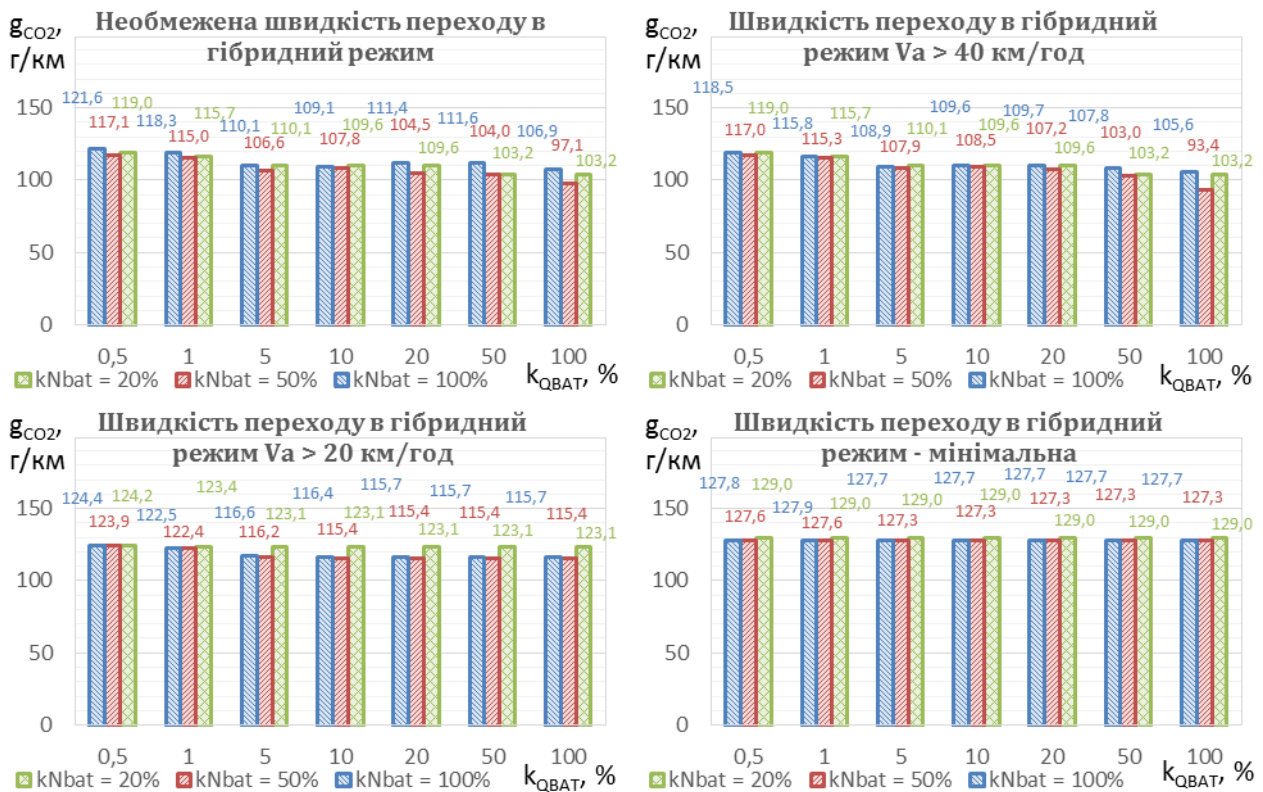


Рисунок 7 – Залежності викидів CO_2 гібридного автомобіля від граничної швидкості переходу в гібридний режим, максимальної потужності та ємності високовольтної батареї

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Згідно отриманих результатів, найменша витрата палива 32,2 г/км (рис. 3) досягається за умови переходу в гібридний режим за швидкостей понад 40 км/год при 100 % номінальної ємності та 50 % номінальної потужності батареї. Зменшення максимальної потужності до 20 % від номінальної призводить до зростання витрати палива до 35,6 г/км; за 100 % номінальної потужності витрата палива складає 36,4 г/км. При зменшенні ємності батареї витрата палива зростає, зокрема, в цьому режимі управління до 40,4-41,1 г/км. Використання стратегії управління енергоустановкою з переходом у гібридний режим за максимально можливих відповідно до умов руху швидкостей призводить до збільшення витрати палива до 33,5-40,5 г/км при 50 % номінальної потужності та до 36,8-42,4 г/км при 100 % номінальної потужності батареї; при 20 % номінальної потужності батареї витрата палива від зміни стратегії управління не залежить. Зниження швидкості переходу у гібридний режим до 20 км/год призводить до зростання витрати палива до 42,3-42,7, 39,7-42,6 та 39,8-42,8 г/км при 20 %, 50 % та 100 % номінальної потужності батареї відповідно. За мінімальної швидкості переходу у гібридний режим вплив максимальної потужності та ємності високовольтної батареї на витрату палива, яка складає близько 43,8-44,3 г/км, практично відсутній.

На викиди забруднюючих речовин мають одночасний вплив кілька факторів. З одного боку, це концентрації забруднювачів у продуктах згоряння та загальна кількість продуктів згоряння, які залежать від режиму роботи ДВЗ. З іншого – ефективність системи нейтралізації викидів, яка залежить від температурних умов і хімічного складу продуктів згоряння у нейтралізаторі. Тому, загальна тенденція зміни викидів від досліджуваних параметрів гібридного автомобіля певною мірою повторює тенденцію зміни витрати палива, але має відмінності від неї з урахуванням впливу утворення забруднювачів у циліндрах в різних режимах роботи та ефективності нейтралізації.

Внаслідок цього, менші викиди CO в межах 0,59-0,61 г/км (рис. 4) досягаються за умов, коли ДВЗ працює час, достатній для підтримання ефективного температурного режиму нейтралізатора, і, разом з тим, у режимах, які сприяють меншому утворенню забруднювачів та ефективніші за витратою палива. Це переважно умови зі швидкістю переходу у гібридний режим понад 20 км/год з максимальною потужністю батареї 50 % від номінальної та максимальною ємністю в межах 5-100 % від номінальної, а також окремі комбінації параметрів для швидкостей переходу в гібридний режим більше 40 км/год та максимально можливих для даних умов швидкостей. Суттєво зростають викиди CO до 0,77-1,8 г/км у для стратегій управління з максимально можливими та понад 40 км/год швидкостями переходу в гібридний режим при зниженні ємності батареї до 1 % і менше від номінальної. Для інших ємностей батареї за цих стратегій управління, а також для інших стратегій управління (крім вказаних вище комбінацій, за яких досягаються мінімальні викиди CO) спостерігаються підвищені викиди CO межах 0,62-0,72 г/км.

Менші викиди C_mH_n в межах 0,067-0,075 г/км (рис. 5) досягаються для окремих комбінацій параметрів для стратегій управління з максимально можливими та понад 40 км/год швидкостями переходу в гібридний режим з ємністю батареї в діапазоні 5-100 % від номінальної. При зменшенні ємності за цих стратегій управління викиди C_mH_n зростають до 0,08-0,1 г/км. При застосуванні стратегій управління з меншими швидкостями переходу в гібридний режим викиди C_mH_n є дещо підвищеними до 0,076-0,081 г/км практично незалежно від коефіцієнтів потужності та ємності батареї.

Менші викиди NO_x в межах 0,09-0,096 г/км (рис. 6) досягаються за умов, коли тривалість роботи у гібридному режимі найбільша: за управління з мінімальною швидкістю переходу в гібридний режим, при зниженні ємності батареї до 1 % від номінальної і нижче за інших стратегій управління, при зниженій максимальній потужності батареї. При збільшенні потужності батареї та швидкості переходу в гібридний режим за достатньої ємності батареї, коли частка електричних режимів зростає, викиди NO_x збільшуються до 0,1-0,167 г/км через погіршення ефективності нейтралізації внаслідок падіння температури носія нейтралізатора та недостатнього часу для відновлення оптимального температурного стану.

Викиди CO_2 за різних комбінацій параметрів гібридної енергоустановки та управління (рис. 7) змінюються за тими ж тенденціями, що і витрата палива, описаними вище. Менші викиди CO_2 93,4-104 г/км досягаються за умов швидкості переходу в гібридний режим понад 40 км/год та за максимально можливих швидкостей, ємності батареї 50-100 % номінальної та потужності батареї 20-50 %. При збільшенні потужності батареї до 100 % від номінальної викиди CO_2 дещо зростають до 105,6-111,6 г/км, через збільшення часу заряджання батареї. Зниження максимальної ємності батареї та швидкості переходу в гібридний режим призводить до збільшення викидів CO_2 до 115-129 г/км.

Таким чином, з токи зору поліпшення показників енергоефективності та екологічної безпеки гібридного автомобіля Toyota Prius II найбільш ефективним є застосування стратегії управління з переходом у гібридний режим на швидкостях понад 40 км/год, забезпечуючи відбір електричної потужності від тягової батареї на рівні не більше 50% від номінальної за умов наявної ємності батареї в межах 50-100 % від номінальної. За цих умов, можливе досягнення витрати палива на рівні 32,2-35,5 г/км, викидів CO – 0,601-0,635 г/км, C_mH_n – 0,067-0,072 г/км, NO_x – 0,109-0,119 г/км, CO_2 – 93,4-103 г/км. Порівнюючи отримані показники з відповідними показниками традиційного автомобіля з ДВЗ з подібними параметрами, наприклад, Skoda Fabia відповідно до результатів дослідження [13], можна визначити зменшення витрати палива з 55,78 г/км на 36,4-42,3%, викидів CO з 0,851 г/км на 25,4-29,4%, C_mH_n з 0,142 г/км на 49,3-52,8%, CO_2 з 174,5 г/км на 41-46,5% та збільшення викидів NO_x з 0,089 г/км на 22,5-33,7%. У випадку критичної втрати ємності батареї можлива реалізація стратегії управління з переходом у гібридний режим при мінімальній швидкості. У цьому випадку отримуємо показники витрати палива на рівні 43,8-44,3 г/км, викидів CO – 0,622-0,644 г/км, C_mH_n – 0,08-0,081 г/км, NO_x – 0,09-0,091 г/км, CO_2 – 127,3-129 г/км. У цьому випадку витрата палива збільшується порівняно з найбільш ефективним управлінням на 23,4-37,6%, викиди

CO – на 1,4-7,2%, C_mH_n – на 11,1-20,9%, CO_2 – на 23,6-38,1%, а викиди NO_x зменшуються на 16,5-24,4%. Порівняно з традиційним автомобілем гібридний автомобіль за управління з переходом у гібридний режим при мінімальній швидкості забезпечить зниження витрати палива на 20,6-21,5%, викидів CO – на 24,3-26,9%, C_mH_n – на 43-43,7%, CO_2 – на 26,1-27 % та збільшення викидів NO_x на 1,1-2,2%.

ВИСНОВКИ

На основі рівнянь потужнісного балансу з використанням результатів експериментальних досліджень розроблено математичну модель гібридного автомобіля Toyota Prius II, яка дозволяє визначити показники його енергоефективності та екологічної безпеки у заданих умовах руху.

Розроблено алгоритм вибору режиму роботи гібридного автомобіля, що досягається залежно від умов руху, параметрів енергоустановки, виконання контрольних та граничних умов, дозволяє реалізувати конкретну стратегію управління та впливає на його показники енергоефективності та екологічної безпеки.

Для оцінювання впливу параметрів енергоустановки гібридного автомобіля та його управління на показники енергоефективності та екологічної безпеки запропоновано коефіцієнти максимальної ємності та потужності тягової батареї, а також граничну швидкість переходу у гібридний режим. Залежно від цих параметрів виконано математичне моделювання показників енергоефективності та екологічності гібридного автомобіля Toyota Prius II у їздовому циклі за Правилами ООН № 83.

За результатами моделювання встановлено, що з токи зору поліпшення показників енергоефективності та екологічної безпеки найбільш ефективним є застосування стратегії управління з переходом у гібридний режим на швидкостях понад 40 км/год, забезпечуючи відбір електричної потужності від тягової батареї на рівні не більше 50% від номінальної за умови наявної ємності батареї в межах 50-100 % від номінальної. Це дозволяє досягти зменшення витрати палива гібридного автомобіля порівняно з традиційним автомобілем з ДВЗ до 42 %, викидів CO до 29 %, C_mH_n до 52 %, CO_2 до 46% при зростанні викидів NO_x до 33 %.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. 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>.
2. Сергієнко М.Є., Павлова Н.М., Сергієнко А.М., Любарський Б.Г., Борисенко А.М., Калинин П.М., Губский С.О., Древаль О.М. Результати моделювання компонентів і робочих процесів гібридного автомобіля з асинхронним електродвигуном. 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>.
3. 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>.
4. 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>.
5. 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>.
6. 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>.
7. 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. p.p. 102087. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102087>.
8. 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). p.p. 185-191. URL: <https://doi.org/10.4271/02-14-02-0014>.
9. Tomita M., Shibata R., Mizuno Y., Maeda H. et al. Development of New 2.0-Liter Plug-in Hybrid System for the Toyota Prius. SAE Technical Paper. 2024. № 2024-01-2169. 7 p. URL: <https://doi.org/10.4271/2024-01-2169>.
10. Сахно В.П., Безбородова Г.Б., Маяк М.М., Шарай С.М. Автомобілі: Тягово-швидкісні

властивості та паливна економічність: Навч. посібник. К.: В-во «КВІЦ», 2004. 174 с. URL: <https://library.ztu.edu.ua/doccard.php/119274>.

11. Садовник І.І. Експериментальні дослідження паливної економічності та екологічних показників автомобільної гібридної енергоустановки. Ювілейна наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. К.: НТУ, 2024. Вип. 80. С. 54. URL.: <https://doi.org/10.33744/2786-6459-2024-80>.

12. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни: підручник. К.: Арістей, 2007. 476 с.

13. Садовник І.Д. Поліпшення екологічних показників автомобіля удосконаленням процесу прогріву каталітичного нейтралізатора відпрацьованих газів: дис. ... д-р філософії : 274 - Автомобільний транспорт. Київ, 2024. 200 с. URL: <https://drive.google.com/file/d/1L7RWjY8zAz2g0vxpzaU3SxFhOkYdCRI9/view>.

REFERENCES

1. Dvadnenko, V., Dziubenko, O., & Pushkar, O. (2022). Rozrobka asynkhronnoho elektropyvodu miakoho hibrydnoho avtomobilia [Asynchronous Motor in a Mild Hybrid Vehicle]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii – Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, 22, 47–53. <https://doi.org/10.30977/veit.2022.22.0.6> [in Ukrainian].

2. Sergienko, N., Pavlova, N., Sergienko, A., Lyubarsky, B., Borysenko, A., Kalinin, P., Gubskiy, S., & Dreval, O. (2023). Rezultaty modeliuvannia komponentiv i robochykh protsesiv 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». Serii: Avtomobile- ta traktorobuduvannia – 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].

3. 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].

4. 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.bpsacea.2312.241023.19.989> [in Ukrainian].

5. Maush, Khakim. (2017). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti avtomobiliv v umovakh ekspluatatsii za rakhunok hibrydnykh tekhnologii [Increase of the energy efficiency of vehicles by the use of hybrid technologies]. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].

6. 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].

7. 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].

8. 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].

9. 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].

10. Sakhno, V. P., Bezborodova, H. B., Maiak, M. M., & Sharai, S. M. (2004). Avtomobili: Tiahovoshvydkisni vlastyvoli ta palyvna ekonomichnist: Navch. posibnyk. [Automobiles: Traction–speed characteristics and fuel economy [Textbook]. Kyiv, Ukraine: KVITS Publishing House. Retrieved from <https://library.ztu.edu.ua/doccard.php/119274> [in Ukrainian].

11. Sadovnyk I.I. (2024). Eksperymentalni doslidzhennia palyvnoi ekonomichnosti ta ekolohichnykh pokaznykiv avtomobilnoi hibrydnoi enerhoustanovky [Experimental studies of fuel efficiency and environmental performance of an automotive hybrid power unit]. Yuvileina naukova konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu, aspirantiv, studentiv ta spivrobitnykiv vidokremlyenykh strukturykh pidrozdiliv universytetu – Scientific Conference of Teaching Staff, Postgraduates, Students and Staff of

Separate Structural Units of the University, 80, 54. <https://doi.org/10.33744/2786-6459-2024-80> [in Ukrainian].

12. Abramchuk F.I., Hutarevych Yu.F., Dolhanov K.Ie., Tymchenko I.I. (2007). Avtomobilni dvyhuny: pidruchnyk [Automotive engines: a textbook]. Kyiv, Ukraine: Aristei [in Ukrainian].

13. Sadovnyk I.D. (2024). Polipshennia ekolohichnykh pokaznykiv avtomobilia udoskonalenniam protsesu prohrivu katalychnoho neitralizatora vidpratsovanykh haziv [Improvement of the ecological indicators of a car by improving the warming-up process of the catalytic converter for exhaust gases.]. PhD thesis. Kyiv: NTU [in Ukrainian].

Tsiuman M.P., Sadovnyk I.I. Improvement of energy efficiency and environmental safety indicators of a hybrid vehicle through rational selection of its control parameters.

In the article, based on power balance equations and using the results of experimental studies, a mathematical model of the Toyota Prius II hybrid vehicle has been developed, which makes it possible to determine its energy efficiency and environmental safety indicators under specified driving conditions.

An algorithm for selecting the operating mode of a hybrid vehicle has been developed, which is achieved depending on driving conditions, power unit parameters, and the fulfillment of control and boundary conditions. This algorithm enables the implementation of a specific control strategy and influences the vehicle's energy efficiency and environmental safety indicators.

To evaluate the influence of the hybrid vehicle power unit parameters and its control on energy efficiency and environmental safety indicators, coefficients of maximum capacity and power of the traction battery, as well as the threshold speed for switching to hybrid mode, are proposed. Depending on these parameters, mathematical modeling of the energy efficiency and environmental performance of the Toyota Prius II hybrid vehicle was carried out in a driving cycle according to UNECE Regulation No. 83.

Based on the simulation results, it was established that, from the standpoint of improving energy efficiency and environmental safety indicators, the most effective approach is to use a control strategy with switching to hybrid mode at speeds above 40 km/h, ensuring that the electric power drawn from the traction battery does not exceed 50% of its nominal value, provided that the battery maximum capacity is within 50-100% of nominal capacity. This makes it possible to reduce the fuel consumption of the hybrid vehicle compared to a conventional ICE vehicle by up to 42%, CO emissions by up to 29%, C_mH_n by up to 52%, and CO₂ by up to 46%, while NO_x emissions increase by up to 33%.

Keywords: power balance, hybrid vehicle, energy efficiency, environmental safety, control parameters, traction battery, hybrid mode, driving cycle.

ЦЮМАН Микола Павлович, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, e-mail: tsuman@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2537-8010>.

САДОВНИК Ігор Іванович, аспірант кафедри двигунів і теплотехніки, Національний транспортний університет, e-mail: igorsid100@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-4699-2079>.

Mykola TSIUMAN, Ph.D. in Engineering, Professor, Head of Department of Engines and Heating Engineering, National Transport University, e-mail: tsuman@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2537-8010>.

Ihor SADOVNYK, Postgraduate Student, Department of Engines and Heating Engineering, National Transport University, e-mail: igorsid100@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-4699-2079>.

Дата надходження статті до видання: 03.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

<https://doi.org/10.36910/rg59qe08>