

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства
та природокористування

Навчально-науковий механічний інститут

Кафедра автомобілів та автомобільного господарства



02-03-149М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни
«Дорожні транспортні засоби з електроприводом»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за освітньо-професійною програмою «Автомобільний транспорт»
спеціальності 274 (J8) «Автомобільний транспорт»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою
з якості ННМІ
Протокол №10 від 19.05.2026 р.

Рівне – 2026

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Дорожні транспортні засоби з електроприводом» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автомобільний транспорт» спеціальності 274 (J8) «Автомобільний транспорт» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Ігнатюк Р. М. – Рівне : НУВГП, 2026. – 44 с.

Укладач:

Ігнатюк Р. М. – к.т.н., доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства.

Відповідальний за випуск: Стадник О. С., в.о. завідувача кафедри автомобілів та автомобільного господарства.

Керівник групи забезпечення спеціальності
274 «Автомобільний транспорт»

Марчук Р. М.

Методичні вказівки схвалено на засіданні кафедри автомобілів та автомобільного господарства
Протокол від 16 лютого 2026 р. №7

© Р. М. Ігнатюк, 2026
© НУВГП, 2026

ЗМІСТ

Практична робота № 1 Класифікація транспортних засобів з електроприводом.....	4
Практична робота №2 Розрахунок кількості зарядних станцій для електромобілів.....	6
Практична робота № 3 Розрахунок параметрів електродвигуна електромобіля.....	8
Практична робота № 4 Розрахунок параметрів акумуляторної батареї електромобіля.....	10
Практична робота № 5. Розрахунок ефективності рекуперативного гальмування електромобіля.....	12
Практична робота № 6. Визначення деградації акумуляторної батареї електромобіля.....	15
Практична робота № 7. Розрахунок економічної ефективності утилізації АКБ електромобілів.....	19
Практична робота № 8 Аналіз енергоефективності гібридних електромобілів різних конфігурацій.....	22
Практична робота № 9 Розрахунок параметрів бездротової зарядки електромобіля.....	25
Практична робота № 10 Розрахунок параметрів гібридного електромобіля на водневих паливних елементах.....	27
Додатки.....	33
Список рекомендованої літератури	44

Практична робота № 1

Класифікація транспортних засобів з електроприводом

Мета роботи: вивчити класифікацію транспортних засобів з електроприводом відповідно до сучасних стандартів, ознайомитися з їх основними характеристиками, а також виконати оцінку експлуатаційних витрат різних типів електрифікованих транспортних засобів.

Теоретичні відомості.

У зв'язку з переходом до сталого розвитку, зниженням викидів парникових газів та впровадженням зеленої енергетики, транспортна галузь ЄС зазнає глибокої трансформації. Центральну роль у цьому процесі відіграють транспортні засоби з електроприводом (Electric Vehicles EV).

Європейське законодавство чітко регламентує визначення, класифікацію та вимоги до електрифікованих транспортних засобів через такі документи:

- Регламент (ЄС) № 2019/631 – щодо стандартів CO₂ для нових автомобілів;
- Директива 2007/46/ЄС, замінена Регламентом (ЄС) 2018/858 – визначає типові схвалення ТЗ;
- UNECE Regulation №100 – вимоги безпеки до електротранспортних засобів;
- ISO 6469 – технічні аспекти електроприводу.

1. BEV (Battery Electric Vehicle) – повністю електричний ТЗ (Tesla Model 3, Nissan Leaf).

- Джерело енергії: акумуляторні батареї.
- Привід: один або кілька електродвигунів.
- Заряджання: виключно з електромережі

Відповідає визначенню “плагін-група M1/M2” згідно з Регламентом (ЄС) 2018/858

2. HEV (Hybrid Electric Vehicle) – гібридний ТЗ (Toyota Prius).

Силова установка: комбінація ДВЗ та електродвигуна.

Акумулятор заряджається: тільки від ДВЗ або при рекуперації.

Заряджання ззовні: неможливе

Класифікується як "гібридний ТЗ без зовнішньої зарядки" (non-rechargeable hybrid).

3. PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) – плагін-гібрид. Має два джерела енергії акумулятор і ДВЗ. Може заряджатися від мережі,

автономність на електротязі 40–80 км (залежно від моделі). Приклади: Mitsubishi Outlander PHEV, Volvo XC60 Recharge. Визнається "електричним транспортним засобом з розширеним діапазоном (E-REV)" у деяких стандартах.

4. FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) — водневий ДТЗ. Джерело енергії, водень у паливних елементах. Продукт реакції: водяна пара (H₂O). Заряджання: водневе заправлення. Приклади: Toyota Mirai, Hyundai Nexo. Регламентується UNECE R 134 – «Водневі транспортні засоби».

Європейські стандарти передбачають також класифікацію EV за архітектурою приводу:

- Передньопривідні (FWD);
- Задньопривідні (RWD);
- Повнопривідні (AWD)

У країнах ЄС від типу електрифікації залежить ставка реєстраційного збору, рівень компенсації чи субсидії (наприклад, у Німеччині та Франції — до €5 000 на BEV/PHEV), можливість в'їзду у "зони з низьким рівнем викидів" (LEZ). У багатьох країнах тільки BEV та FCEV отримують повну податкову пільгу.

Класифікація EV є основою для технічної регламентації, безпеки, екологічних норм та державної підтримки.

Основні типи EV (BEV, HEV, PHEV, FCEV) відрізняються за принципом роботи, інфраструктурними вимогами та екологічним ефектом.

Таблиця 1.1. – Особливості ДТЗ з електроприводом

Тип ЕТЗ	Повна назва	Особливість
BEV	Battery Electric Vehicle	Працює лише від акумулятора. Не має ДВЗ.
HEV	Hybrid Electric Vehicle	Комбінація ДВЗ + електродвигун, заряд акумулятора – лише від ДВЗ.
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle	Гібрид, який можна заряджати від мережі. Працює як BEV на коротких дистанціях.
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle	Електродвигун живиться енергією з водневих паливних елементів.

У рамках ЄС активно стимулюється перехід саме до повністю електричних та водневих ТЗ відповідно до політики "Green Deal 2050".

Порядок виконання роботи

Заповнити таблицю, використовуючи офіційні технічні характеристики реальних моделей автомобілів наданих викладачем.

Таблиця 1.2. – Характеристики ДТЗ з електроприводом

Тип ЕТЗ	Мо-дель	Запас ходу (км)	Час зарядки	Вартість (USD)	Викиди CO ₂ (г/км)
BEV					
HEV					
PHEV					
FCEV					

Розрахувати оновлення рухомого парку автомобілів Миської ради для комунальних та адміністративних підрозділів. ДТЗ для розрахунку використати з таблиці 1.2.

Для електромобіля:

$$C_{EV} = E_{EV/100} \cdot C_e \quad 1.1$$

де C_{EV} – вартість експлуатації на 100 км, (грн); $E_{EV/100}$ – споживання електроенергії (кВт·год/100 км); C_e – ціна електроенергії (грн/кВт·год).

Для гібридного (плагін-гібридного) електромобіля:

$$C_{HEV} = (L_{100} \cdot C_{\text{пальне}}) + E_{HEV/100} \cdot C_e \quad 1.2$$

де L_{100} – витрати палива на 100 км, (л/грн); $C_{\text{пальне}}$ – вартість пального, (грн/л); $E_{HEV/100}$ – споживання електроенергії на 100 км, (кВт·год/100 км); C_e – ціна електроенергії, (грн/кВт·год).

Вихідні дані для розрахунку брати з додатка 1. Зробити висновок щодо обраної моделі електромобіля, в якому охарактеризувати доступність зарядної інфраструктури в місті. Охарактеризувати коливання цін на електроенергію, паливо та вплив кліматичних умов на ефективність використання електромобілів.

Практична робота № 2

Розрахунок кількості зарядних станцій для електромобілів

Мета роботи: опанувати методику визначення кількості зарядних станцій електромобіля.

Теоретичні відомості.

За даними Головного управління статистики у Рівненській області чисельність населення м Рівне нараховує 245 000 чол. Оскільки населення міста постійно зростає, кількість автомобілів у місті також зростає, що спричиняє погіршення якості повітря.

У 2025 році на Рівненщині сервісні центри МВС зареєстрували 69 488 автомобілів. З них 42 064 – у Рівному.

У місті Рівне рівень NO_2 у повітрі перевищує допустимі межі. Основною причиною цієї аномалії можна пояснити велику кількість автомобілів, що працюють на викопному паливі, які їздять вулицями Рівного. Революція в транспортному секторі може допомогти принести знизити величезний рівень забруднення, особливо спричинений транспортними викидами, який у Впровадження електромобілів замість традиційних автомобілів з ДВЗ часто прогнозується як прогресивний крок у сприятливому сталому розвитку.

Існує багато факторів, які ускладнюють спробу визначити кількість зарядних пристроїв, необхідних для інфраструктури у Рівному. Об'єктивно аналізуючи проблему, можна побачити, що важливі питання включають кількість електромобілів, їх типіву щоденну активність і потреби в електроенергії, а також час, необхідний для задоволення потреб в електроенергії. Для вирішення цих проблем використовуються стандартна методика розрахунку кількості електростанцій.

Порядок виконання роботи

Середньодобовий пробіг усіх електромобілів становить:

$$L = n_{\text{ел}} \cdot l_{\text{сд}}, \text{ км}, \quad (2.1)$$

де $n_{\text{ел}}$ - кількість електромобілів, шт; $l_{\text{сд}}$ – середньодобовий пробіг, км.

Відомо, що електромобіль за 1 кВт/год може долати до 8 км. Таким чином, енергія, необхідна для подолання L .

$$N_{\text{сд}} = N_{1\text{км}} \cdot L, \text{ кВт} \quad (2.2)$$

Однак, при поточному використанні транспортних засобів, водії не щодня заряджає автомобіль. Кількість необхідних зарядних пристроїв залежить від потужності зарядного пристрою та кількості годин, які він заряджає на день. У таблиці додатку 2 потрібно знайти середню потужність ключових компонентів від зарядного пристрою потужністю 50 кВт і час заряджання.

Саме автомобіль визначає потік потужності при заряджанні. Потік потужності не лінійний і досить сильно змінюється залежно від автомобіля навіть від того самого виробника, наприклад Nissan Leaf 24 кВт-год і 30 кВт-год, оскільки вони є найпоширенішими електромобілями на даний момент.

Визначення кількості рекомендованих зарядних станцій:

$$H = \frac{A \cdot L \cdot D}{E \cdot F \cdot T}, \text{ шт,} \quad (2.3)$$

де A – частка електромобілів, %, (для визначення частки електромобілів скористайтесь значенням загальної кількості автомобілів, B , шт); L – середньодобовий пробіг, км; D – % пробігу, який потребує швидкої зарядки; E – кількість км на спожитий кВт-год; F – середня потужність зарядного пристрою 27 кВт; T – кількість годин використання зарядного пристрою, год.

Відповідно до вихідних даних (додаток 2) виконати розрахунок кількості зарядних станцій.

Практична робота № 3 **Розрахунок параметрів електродвигуна електромобіля**

Мета роботи: визначити необхідну потужність електродвигуна електромобіля, розрахувати енергетичні витрати на рух та визначити необхідну ємність акумуляторної батареї для забезпечення заданого запасу ходу.

Теоретичні відомості.

Безщіткові двигуни постійного струму (BLDC) широко використовуються завдяки своїм винятковим характеристикам і високому коефіцієнту корисної дії. Вони мають відмінні експлуатаційні властивості, такі як високий пусковий момент, ефективність на рівні 95–98% тощо. BLDC-двигуни надають перевагу в конструкціях з високою питомою потужністю, оскільки демонструють кращі характеристики порівняно з іншими типами електродвигунів.

Акумулятор електромобіля використовується для живлення електродвигунів. Найпоширенішими є літій-іонні та літій-полімерні батареї завдяки високій енергетичній щільності відносно маси.

Виконаємо розрахунок двигуна та батареї електромобіля згідно варіанту додатка 3.

Порядок виконання роботи

Потужність на максимальній швидкості:

$$P_{max} = \frac{F_{ок} \cdot V_{max}}{\eta}, \text{ Вт} \quad 3.1$$

де $F_{оп}$ - сила опору коченню, Н; V_{max} – максимальна швидкість руху автомобіля, м/с; η – ККД трансмісії.

Визначимо необхідну потужність на розгін:

Сила для розгону:

$$F_{роз} = \frac{m \cdot V}{t}, \text{ Н} \quad 3.2$$

де m – повна маса автомобіля, кг; V – швидкість для розгону, приймаємо 100 км/год, (в м/с); t – час розгону, приймаємо 10 с.

Потужність на розгін:

$$P_{розгін} = \frac{F_{роз} \cdot V}{\eta}, \text{ Вт} \quad 3.3$$

За вихідними даними та розрахунком номінальної потужності обираємо необхідну потужність електродвигуна.

Таблиця 3.1. – Підбір потужності електродвигуна за масою ДТЗ

Маса ДТЗ, кг	Орієнтовна потужність двигуна (номінальна), кВт	Рекомендована батарея, кВт·год	Приклади
500 – 800	10 – 20	8 – 15	Електроскутер, квадроцикл, Smart EQ
800 – 1000	20 – 30	15 – 25	Легкий міський EV, типу Renault Twizy
1000 – 1300	30 – 40	25 – 35	Типові міські хетчбеки: Zoe, VW e-Up
1300 – 1600	40 – 60	35 – 50	Nissan Leaf, VW e-Golf, Hyundai Kona EV
1600 – 2000	60 – 100	50 – 75	Tesla Model 3, BMW i4, електрокросовери
2000 – 2500	100 – 150	75 – 100	Tesla Model X, Rivian R1T, електричні пікапи
2500+	150 – 250+	100 – 150+	Вантажні фургони, автобуси, тягачі

Розрахунок енергії, необхідної для подолання заданого запасу ходу.

Середня споживана потужність:

$$P_{сер} = \frac{F_{оп} \cdot V_{сер}}{\eta}, \text{ Вт} \quad 3.4$$

де $V_{сер}$ – середня швидкість руху автомобіля, м/с.

Розрахунковий час руху електромобіля на одному заряді:

$$t = \frac{D}{V_{\text{сеп}}}, \text{ год} \quad 3.5$$

де D – запас ходу, км.

Розраховуємо необхідну енергію для подолання заданого запасу ходу:

$$E = P_{\text{сеп}} \cdot t, \text{ кВт} \quad 3.6$$

Для коригування необхідної потужності АКБ слід врахувати коефіцієнт запасу (10-20%).

Тоді, ємність АКБ:

$$C = \frac{E}{U}, \text{ А год} \quad 3.7$$

де E – енергія необхідна для подолання заданого запасу ходу, Вт*год;

U – номінальна напруга тягової батареї електромобіля, В.

За результатами розрахунків сформулювати висновки.

Практична робота № 4

Розрахунок параметрів акумуляторної батареї електромобіля

Мета роботи: визначення енергетичних параметрів електромобіля.

Теоретичні відомості.

В даній практичній наведено методику розрахунку літій-іонні (Li-ion) батареї. Батарея складається з одного або кількох електрохімічних елементів (елементів батареї), які перетворюють хімічну енергію в електричну (під час розрядження) та електричну енергію в хімічну (під час зарядження). Тип елементів, що містяться в батареї, і хімічні реакції під час розрядження-зарядження визначають хімічний склад батареї .

Елемент батареї складається з п'яти основних компонентів: електродів – анода та катода, сепараторів, клем, електроліту та корпусу. Для автомобільного застосування використовуються різні типи комірок:

Окремі елементи батареї згруповані в єдиний механічний і електричний блок, який називається модулем батареї. Модулі електрично з'єднані, щоб утворити акумуляторну батарею рис. 4.1.



Рис. 4.1 -Різні форми елементів літій-іонної батареї

Є кілька типів акумуляторів, які використовуються в гібридних і електричних транспортних системах, для прикладу ми розглядатимемо літій-іонні елементи. Основна причина полягає в тому, що літій-іонні акумулятори мають вищу питому енергію [Вт год/кг] і питому потужність [Вт/кг] порівняно з іншими типами.

Порядок виконання роботи

Розрахунок кінетичної енергії, при розгоні до 100 км/год, вихідні дані для розрахунку беремо з додатку 6:

$$E_{\text{кін}} = \frac{1}{2} m \cdot V^2, \text{ Дж}, \quad 4.1$$

де m – споряджена маса автомобіля, кг; V^2 – швидкість руху електро-мобіля, (приймаємо 100 км/год) м/с.

Необхідна потужність при розгоні до 100 км/год, для електро-мобіля:

$$W = E_{\text{кін}} / t_1, \text{ кВт}, \quad 4.2$$

де t_1 – час розгону від 0 – 100 км/год, с.

Споживання струму двигуном:

$$I = \frac{W}{U}, \text{ А}, \quad 4.3$$

де U – напруга на клемі акумулятора, В; I – сила струму, яка необхідна для роботи двигуна при повному навантаженні, А.

Розрахунок енергоспоживання за 1 годину роботи:

$$P = W \cdot t, \text{ Вт} \cdot \text{год} \quad 4.4$$

де t - час роботи електро-мобіля, Вт · год (приймаємо 1 год).

АКБ повинен мати запас енергії κ , що на 20-30% перевищує розрахункову необхідність при експлуатації ТЗ:

$$P_3 = P \cdot \kappa \quad 4.5$$

Тоді ємність АКБ, (підставляємо у Вт):

$$C_1 = \frac{P_3}{U}, \text{ А}\cdot\text{год}, \quad 4.6$$

Номінальний заряд батареї:

Розрахунок необхідної потужності при різних швидкостях руху.

Якщо транспортному засобу потрібно проїхати 100 км зі швидкістю V_1 км/год, то:

$$t_2 = S/V_{(1,2,3)}, \text{ год}, \quad 4.7$$

Виходячи з ємності АКБ:

$$I_2 = \frac{C_1}{t_2}, \text{ А}, \quad 4.8$$

Тоді потужність, яка буде спожита протягом цього періоду:

$$W_3 = V \cdot I_2, \text{ Вт}, \quad 4.9$$

Відповідно до вихідних даних (додаток 4) виконати розрахунок основних параметрів АКБ.

Виконати розрахунок необхідної потужності для швидкостей V_1, V_2, V_3 , згідно додатка та побудувати графічну залежність швидкості руху електроавтомобіля від сили струму та потужності.

Практична робота № 5 **Розрахунок ефективності рекуперативного** **гальмування електромобіля**

Мета роботи: визначити параметри рекуперативного гальмування електромобіля, оцінити кількість енергії, що може бути повернена в акумуляторну батарею а також проаналізувати вплив основних експлуатаційних та конструктивних факторів на ефективність процесу рекуперативності.

Теоретичні відомості.

Рекуперативне гальмування – це процес, при якому електродвигун транспортного засобу під час зниження швидкості переходить у

генераторний режим і перетворює частину кінетичної енергії руху в електричну. Отримана енергія повертається в акумуляторну батарею та може бути повторно використана для руху.

На відміну від традиційних гальмівних систем, де енергія повністю розсіюється у вигляді тепла, рекуперація дозволяє зменшити втрати енергії та підвищити загальну ефективність електромобіля.

У процесі руху електромобіля електродвигун працює в режимі споживання електроенергії та створює тягове зусилля. Під час гальмування він починає виконувати функцію генератора. Обертання коліс передається на електродвигун, який виробляє електричну енергію і направляє її через інвертор назад у акумулятор.

Таким чином відбувається двосторонній процес перетворення енергії: під час руху – електрична енергія перетворюється в механічну, а під час гальмування – навпаки.

Складові системи рекуперації:

- електродвигун, що працює у генераторному режимі;
- інвертор, який забезпечує перетворення електричної енергії;
- акумуляторну батарею, яка накопичує повернену енергію;
- систему керування, що регулює процес рекуперації залежно від умов руху.

Ефективність рекуперації залежить від швидкості руху транспортного засобу, маси автомобіля, режиму гальмування (різке або плавне), стану заряду акумулятора, технічних характеристик електродвигуна та інвертора, дорожніх умов (покриття, ухил дороги).

Найбільш ефективно рекуперація працює в міських умовах, де часто відбуваються розгони та гальмування.

Незважаючи на переваги, процес має певні обмеження:

- при повністю зарядженій батареї рекуперація обмежується або відключається;
- при низьких швидкостях ефективність знижується;
- максимальна сила гальмування обмежена можливостями електродвигуна;
- у разі екстреного гальмування підключається механічна гальмівна система.

Виконати розрахунок ефективності рекуперації енергії електромобіля за вихідними даними додатка 5.

Порядок виконання роботи

Визначення кінетичної енергії автомобіля.

Визначаємо загальну енергію, автомобіль під час руху. Саме ця енергія частково може бути повернена в акумулятор при гальмуванні.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2), \text{ Дж} \quad 5.1$$

де m – маса автомобіля, кг; V_1 – швидкість руху, м/с; V_2 – швидкість після гальмування, м/с.

Для оцінки втрати енергії через деформацію шин і дорожнього покриття під час руху визначимо сили опору кочення:

$$F_k = f \cdot m \cdot g, \text{ Н} \quad 5.2$$

де f – коефіцієнт опору коченню (0,01 – 0,02 для асфальту); g – прискорення вільного падіння, м/с².

Визначимо втрати енергії на подолання опору повітря, які значно зростають зі швидкістю аеродинамічний опір повітря:

$$F_{\text{аер}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot V^2, \text{ Н} \quad 5.3$$

де ρ – густина повітря, 1,2 кг/м³; C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору; A – лобова площа автомобіля, м².

Знайдемо загальні втрати енергії, які не можуть бути рекуперовані. Сумарні сили опору під час руху:

$$F_{\text{оп}} = F_k + F_{\text{аер}}, \text{ Н} \quad 5.4$$

Розрахуємо частину енергії, яка безповоротно втрачається при гальмуванні. Робота сил опору руху визначає кількість енергії, яка втрачається під час гальмування автомобіля і не може бути використана для рекуперації. Вона залежить від сумарної сили опору та шляху гальмування.

$$A_{\text{втр}} = F_{\text{оп}} \cdot S, \text{ Дж} \quad 5.5$$

де S – шлях гальмування, м.

Визначимо теоретичну кількість енергії, яка доступна для рекуперації. Дана енергія визначається як різниця між кінетичною енергією автомобіля та втратами енергії на подолання сил опору. Дане значення є теоретичною максимальною величиною енергії, яка може бути перетворена в електричну та повернута в акумулятор.

$$E_{\text{т.рек}} = E_k - A_{\text{втр}}, \text{ Дж} \quad 5.6$$

Визначення ККД системи рекуперації. Коефіцієнт корисної дії системи рекуперативного гальмування визначається добутком ККД

електродвигуна, інвертора та акумуляторної батареї. Для сучасних електромобілів його значення зазвичай становить 0.75–0.85.

$$\eta_{\text{рек}} = \eta_{\text{інв}} \cdot \eta_{\text{ел.дв}} \cdot \eta_{\text{акб}} \quad 5.7$$

де $\eta_{\text{інв}}$ – ККД інвертора; $\eta_{\text{ел.дв}}$ – ККД електродвигуна; $\eta_{\text{акб}}$ – ККД акумуляторної батареї.

Фактичне значення рекуперативної енергії визначається як добуток енергії, доступної для рекуперації, на загальний коефіцієнт корисної дії системи. Даний показник характеризує ефективність використання енергії в електромобілі та є важливим параметром при оцінці енергоспоживання транспортного засобу.

$$E_{\text{рек}} = E_{\text{т.рек}} \cdot \eta_{\text{рек}}, \text{ Дж} \quad 5.8$$

Визначимо ефективність рекуперативного гальмування, вона визначається як відношення реально повернутої енергії до початкової кінетичної енергії автомобіля.

$$\phi = \frac{E_{\text{рек}}}{E_k} \quad 5.9$$

Для сучасних електромобілів розрахункова ефективність становить близько 70%. Однак у реальних умовах експлуатації цей показник знижується до 20–30% внаслідок технічних обмежень системи та режимів руху.

За результатами розрахунків сформулювати висновки, в яких проаналізувати вплив основних експлуатаційних та конструктивних факторів на ефективність процесу рекуперації.

Практична робота № 6

Визначення деградації акумуляторної батареї електромобіля

Мета роботи: визначити зміну енергетичних характеристик акумуляторної батареї електромобіля в процесі експлуатації, оцінити вплив режимів роботи, температурних умов та типів заряджання на деградацію батареї та її залишкову ємність.

Теоретичні відомості.

Акумуляторна батарея електромобіля є складною електрохімічною системою, яка визначає не лише запас ходу, а й динамічні характеристики, ефективність та економічну доцільність використання

транспортного засобу. Сучасні електромобілі переважно оснащуються літій-іонними акумуляторами, які відрізняються високою питомою енергією, питомою потужністю та відносно низьким рівнем саморозряду.

Основними характеристиками акумуляторної батареї є номінальна ємність, що визначає кількість накопиченої енергії, внутрішній опір, який впливає на втрати та нагрівання, а також коефіцієнт корисної дії, що характеризує ефективність перетворення енергії. Важливим показником є також показник стану батареї — State of Health (SOH), який відображає відношення фактичної ємності батареї до її номінального значення.

Таблиця 6.1. Основні технічні характеристики акумуляторних батарей електромобіля

№	Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Типові значення	Характеристика
1	Номінальна ємність	$E_{\text{ном}}$	кВт·год	20 – 100+	Загальна енергія, яку може накопичити батарея
2	Номінальна напруга	U	В	300 – 800	Робоча напруга тягової батареї
3	Ємність	C	А·год	100 – 300	Заряд, який може віддати батарея
4	Питома енергія	ω	Вт·год/кг	120 – 250	Енергія на одиницю маси
5	Питома потужність	$P_{\text{пит}}$	Вт/кг	300 – 1500	Потужність на одиницю маси
6	ККД батареї	$\eta_{\text{акб}}$	–	0.88 – 0.95	Ефективність заряд-розряд
7	Глибина розряду	DoD	–	0.8 – 0.9	Частка використаної ємності
8	Стан батареї	SOH	%	70 – 100	Відносна залишкова ємність
9	Внутрішній опір	$R_{\text{вн}}$	Ом	0.01 – 0.1	Впливає на втрати і нагрів
10	Кількість циклів	N	цикли	1000 – 3000	Ресурс батареї
11	Температурний діапазон	T	°С	-20...+50	Робочі умови
12	Швидкість зарядки (C-rate)	C_{rate}	–	0.5 – 3С	Інтенсивність зарядки
13	Час зарядки	t	год	0.5 – 10	Залежить від типу зарядки
14	Тип батареї	–	–	Li-ion, LFP, NMC	Хімічний склад
15	Енергетична щільність	ρ_e	Вт·год/л	250 – 700	Об'ємна щільність

Основними технічними параметрами акумуляторної батареї електромобіля є її енергетичні, електричні та ресурсні характеристики, які визначають ефективність роботи електроприводу та експлуатаційні можливості транспортного засобу. Ключовим параметром є номінальна енергоємність батареї $E_{\text{ном}}$, яка вимірюється в кВт·год і визначає

загальну кількість електричної енергії, що може бути накопичена та використана для руху автомобіля. Саме цей показник безпосередньо впливає на запас ходу електромобіля.

Ємність батареї C , що вимірюється в ампер-годинах, характеризує кількість електричного заряду, який може бути відданий батареєю. Вона пов'язана з енергоємністю через номінальну напругу батареї U , яка визначає рівень електричного потенціалу в системі. Номінальна напруга, як правило, знаходиться в межах 300–800 В і впливає на роботу електродвигуна, інвертора та всієї силової електроніки.

Важливою характеристикою є коефіцієнт корисної дії батареї $\eta_{\text{акб}}$, який відображає ефективність процесів заряджання та розряджання. Частина енергії втрачається у вигляді тепла, що пов'язано з внутрішнім опором батареї $R_{\text{вн}}$. Цей параметр визначає величину втрат при протіканні струму і має тенденцію до збільшення в процесі експлуатації, що негативно впливає на ефективність та тепловий режим роботи батареї.

Одним із ключових експлуатаційних параметрів є глибина розряду DoD , яка показує, яка частина ємності батареї використовується під час роботи. Чим більша глибина розряду, тим більше навантаження на акумулятор і тим швидше відбувається його зношування. Тому в реальних умовах експлуатації батареї рідко використовуються на 100% своєї ємності.

Стан акумуляторної батареї характеризується показником SOH (State of Health), який визначає відносну залишкову ємність у відсотках від номінального значення. Зменшення цього показника є основною ознакою деградації батареї і свідчить про зниження її енергетичних можливостей.

Ресурс батареї визначається кількістю циклів заряджання-розряджання N , які вона може витримати до досягнення критичного рівня деградації. Зазвичай цей показник становить від 1000 до 3000 циклів залежно від типу акумулятора та умов експлуатації.

Інтенсивність заряджання характеризується параметром C_{rate} , який визначає відношення струму зарядки до номінальної ємності батареї. Високі значення цього параметра, характерні для швидкої зарядки, призводять до підвищеного тепловиділення та прискорення деградації акумулятора.

Окремо слід враховувати питому енергію батареї ω , яка визначає кількість енергії на одиницю маси, а також питому потужність $P_{\text{пит}}$, що характеризує здатність батареї швидко віддавати енергію. Ці параметри

мають вирішальне значення при проектуванні електромобілів, оскільки впливають на їх масу, динаміку та ефективність.

Температурний режим роботи також є критично важливим фактором. Акумуляторні батареї мають обмежений діапазон ефективної роботи, за межами якого знижується продуктивність та прискорюється деградація. Підвищені температури активізують хімічні процеси старіння, тоді як низькі температури знижують доступну ємність і потужність.

Таким чином, сукупність наведених параметрів визначає технічний стан акумуляторної батареї, її ефективність, довговічність та експлуатаційні можливості в умовах реального використання електромобіля.

Таким чином, оцінка деградації акумуляторної батареї потребує врахування не лише кількості циклів, але й умов експлуатації, що дозволяє більш точно прогнозувати ресурс батареї та ефективність електромобіля в довгостроковій перспективі.

Порядок виконання роботи

Виконати розрахунок згідно вихідних даних додаток 6. Визначимо кількість повних циклів заряджання-розряджання, які пройшла акумуляторна батарея за заданий пробіг. Це дозволяє оцінити базовий рівень зносу батареї внаслідок експлуатації. Кількість циклів визначається як відношення загального пробігу автомобіля до запасу ходу на одному заряді:

$$N = \frac{L}{D \cdot DoD} \quad 6.1$$

де N – кількість циклів роботи батареї; L – загальний пробіг автомобіля, км; D – запас ходу на одному заряді, км; DoD – глибина розряду АКБ.

Розраховуємо базове зниження ємності акумуляторної батареї внаслідок циклічного старіння. Для цього використовується лінійна модель деградації, яка дозволяє оцінити зміну стану батареї в залежності від кількості циклів:

$$SOH = 100 - k \cdot N \quad 6.2$$

де SOH – показник технічного стану акумуляторної батареї, який відображає, наскільки вона зношена порівняно з новою, %; k – коефіцієнт деградації за один цикл, який приймається в межах 0,02 – 0,05 %.

Визначаємо фактичний стан батареї з урахуванням усіх факторів експлуатації. Таким чином, інтегральний показник деградації враховує як циклічне старіння, так і вплив зовнішніх умов:

$$SOH_{\phi} = 100 - (k \cdot k_i \cdot k_T \cdot N) \quad 6.3$$

де k_i – коригуючий коефіцієнт, що збільшує інтенсивність деградації АКБ, від впливу швидкої зарядки; k_T – температурний коефіцієнт, оскільки робота батареї при підвищених або знижених температурах прискорює процеси старіння, таблиця 6.2.

Таблиця 6.2 Вибір температурного коефіцієнта

Температура	(k_T)
+20°C	1.0
0°C	1.1
-10°C	1.2
+40°C	1.3

Розраховуємо фактичну ємність акумуляторної батареї після деградації, що дозволяє оцінити її енергетичні можливості в поточному стані:

$$E_{\phi} = E_n \cdot \frac{SOH_{\phi}}{100} \quad 6.4$$

де E_n – номінальна ємність батареї, кВт·год.

За результатами розрахунків сформулювати висновки, в яких оцінити вплив режимів роботи, температурних умов та типів заряджання на деградацію батареї та її залишкову ємність.

Практична робота № 7 **Розрахунок економічної ефективності утилізації** **АКБ електромобілів**

Мета роботи: визначення техніко-економічної та екологічної ефективності утилізації акумуляторних батарей електромобілів.

Теоретичні відомості

Утилізація акумуляторних батарей електромобілів є важливим етапом у життєвому циклі електротранспорту, оскільки після завершення експлуатації АКБ перетворюється на джерело як цінних ресурсів, так і потенційної небезпеки для довкілля. Сучасні тягові батареї, зокрема літій-іонного типу (наприклад, на основі нікель-марганець-

кобальт — NMC), мають складну багатокомпонентну структуру. Вони включають катодні й анодні матеріали, електроліт, систему управління (BMS), корпус і допоміжні компоненти. Після 8–10 років експлуатації електромобіля акумулятор зберігає приблизно 70–80% своєї первинної ємності, що дозволяє йому бути використаним у стаціонарних системах зберігання енергії в рамках другого життєвого циклу.

Утилізація батарей включає кілька ключових технологічних підходів: механічне розбирання, пірометалургічну переробку (плавлення при високих температурах), гідрометалургічну екстракцію (вилучення металів за допомогою кислот) та інноваційні екологічні методи. Найбільш перспективним вважається гідрометалургічний метод, який забезпечує високий рівень відновлення літію, нікелю, кобальту й міді. Крім того, він має менший вуглецевий слід, ніж термічні методи.

Таблиця 7.1 Методи утилізації АКБ

Етап	Метод	Вихід продукції
1. Демонтаж або розбирання	Механічний розбір (ручний або автоматизований)	Модулі, корпус
2. Пірометалургія	Термічна обробка для випалу органіки	Металеві сплави
3. Гідрометалургія	Хімічне вилучення металів (кислотне)	Li, Ni, Co (до 95%)
4. Регенерація графіту та електроліту	Частково можлива	Залежить від технологій
5. Рафінація / очищення	Етап очистки вторинної сировини	Катодні матеріали для нових батарей

На законодавчому рівні Європейський Союз активно регламентує процес утилізації. Новий регламент ЄС щодо акумуляторів (2023/1542) передбачає впровадження обов'язкових паспортів батарей, цільових показників переробки для кожного виду металів, а також розширену відповідальність виробника (EPR), згідно з якою саме виробник або імпортер зобов'язаний забезпечити повну утилізацію після закінчення терміну служби. До 2030 року планується досягти рівня відновлення літію не менше 70%, а кобальту й нікелю — не менше 90%.

Окрім екологічних міркувань, питання утилізації тісно пов'язане з економікою критичних матеріалів. Переробка старих АКБ дозволяє зменшити залежність від імпорту стратегічних ресурсів, знизити вартість нових батарей та сприяти формуванню замкнутого циклу

виробництва. Також розвиток інфраструктури для переробки та повторного використання АКБ створює нові можливості для енергетичних систем, зокрема для акумуляції електроенергії з відновлюваних джерел.

Таким чином, утилізація акумуляторних батарей електромобілів є критичним фактором сталого розвитку електротранспорту. Вона забезпечує збереження ресурсів, зменшення екологічного навантаження та економічну доцільність у довгостроковій перспективі.

Li-ion батареї є лідерами у використанні на електромобілях і найпоширеніша – NMC: нікель-марганець-кобальтова або LFP: залізо-фосфатна.

Таблиця 7. 2 Склад АКБ за масовою часткою

Компонент	Частка маси (%)	Примітка
Алюміній (корпус, фольга)	20–25%	Легко відновлюється
Мідь (струмозмінач)	10–15%	Цінний вторресурс
Катодні метали (Li, Ni, Co, Mn)	20–30%	Визначають цінність утилізації
Графіт (анод)	10–15%	Можлива регенерація
Електроліт	5–10%	Потребує особливої утилізації
Пластик, інше	5–10%	Частково підлягає спаленню або повторному використанню

Порядок виконання роботи

Виконати розрахунок утилізації АКБ на за вихідними даними, які наведені в додатку 7.

Внести дані очікуваного виходу матеріалу у таблицю 7.3 відповідно до вихідних даних.

Таблиця 7.3.

Матеріал	Ціна (грн/кг)	Відсоток від заг. маси	Вихід (кг)	Вартість (грн)
Літій	2500			
Кобальт	2000			
Нікель	1200			
Мідь	500			
Алюміній	100			
Графіт	100			
Інше (електроліт, пластик, втрати)	20-50			
Загальна вартість матеріалів				

Розраховуємо ступінь утилізації АКБ згідно ISO 22628:

$$R = \frac{M_r + M_e}{M_{\text{акб}}} \cdot 100\% \quad 7.1$$

де M_r - маса матеріалу, що переробляється, кг, (Al, Cu, Fe, Li (до 75%), Co, Ni); M_e – маса частин, що відновлюються енергетично (спалювання, рекуперация) пластики, кг; $M_{\text{акб}}$ – загальна маса батареї, кг.

Тоді ступінь переробки визначається:

$$\frac{M_r}{M_{\text{акб}}} * 100\% \quad 7.2$$

Розрахувати економічну ефективність від утилізації АКБ електромобілів, враховуючи середні витрати в ЄС (станом на 2025 рік) на збір і транспортування (20-40 грн/кг), розбирання АКБ (35-80 грн/кг), прометалургію (60-120 грн/кг), гідрометалургія (80-150 грн/кг), рафінація (40-80 грн/кг).

Сформулювати висновки, в яких охарактеризуйте рентабельність переробки АКБ на сучасному етапі.

Практична робота № 8 **Аналіз енергоефективності гібридних електромобілів** **різних конфігурацій**

Мета роботи: Дослідити принцип роботи гібридних електромобілів різних конфігурацій, визначити їх енергетичну ефективність та порівняти витрати енергії в різних режимах руху.

Теоретичні відомості

Гібридні електромобілі являють собою складні енергетичні системи, у яких поєднуються два джерела енергії – двигун внутрішнього згоряння та електричний привід. Основною метою використання гібридних схем є підвищення загальної енергоефективності транспортного засобу, зниження витрат палива та зменшення шкідливих викидів.

У сучасних дослідженнях гібридні силові установки розглядаються як системи з розподіленими потоками енергії, де ключову роль відіграє алгоритм керування потоками між джерелами енергії, накопичувачем та споживачем.

За принципом передачі енергії виділяють три основні конфігурації гібридних електромобілів: послідовну, паралельну та комбіновану.

У послідовній конфігурації (рис. 8.1) двигун внутрішнього згоряння не має механічного зв'язку з колесами і працює виключно в режимі генератора, перетворюючи хімічну енергію палива в електричну. Далі ця

енергія або безпосередньо подається на електродвигун, або накопичується в акумуляторній батареї.

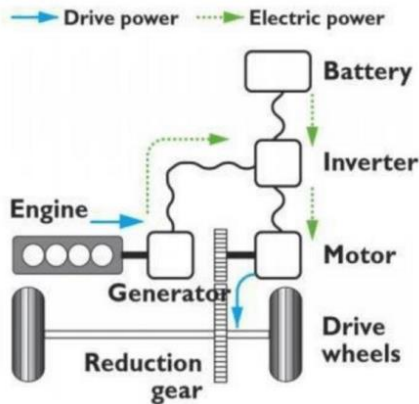


Рис. 8.1 – Схема розміщення елементів послідовного гібриду

Таким чином, відбувається подвійне перетворення енергії, що призводить до додаткових втрат, однак дозволяє експлуатувати двигун у найбільш ефективному режимі.

Паралельна конфігурація (рис. 8.2) передбачає можливість одночасної або роздільної роботи двигуна внутрішнього згоряння та електродвигуна, які мають механічний зв'язок із трансмісією. У цьому випадку частина енергії передається безпосередньо на колеса, що зменшує втрати, пов'язані з перетворенням енергії.

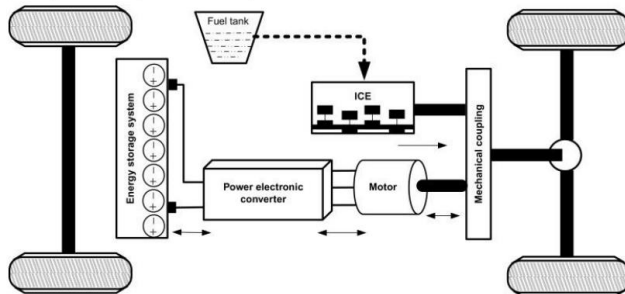


Рис. 8.2 - Схема розміщення елементів паралельного гібриду

Комбінована (послідовно-паралельна) схема (рис. 8.3) є найбільш складною та ефективною, оскільки дозволяє змінювати конфігурацію передачі енергії залежно від режиму руху.

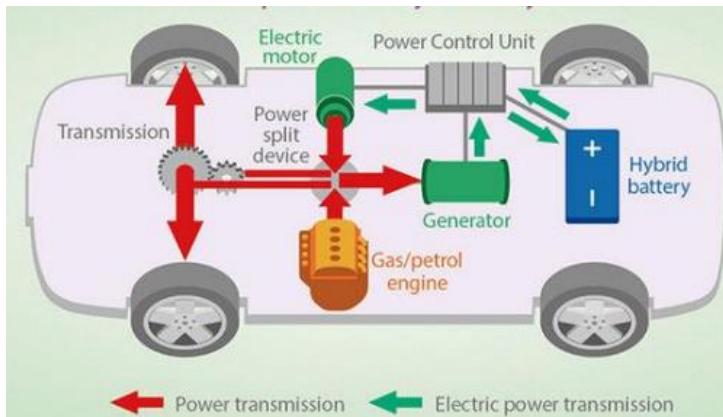


Рис. 8.3 Схема розміщення елементів комбінованого гібриду

У таких системах використовується планетарний механізм або електронно-керований розподіл потужності, що забезпечує оптимальний баланс між ефективністю та динамічними характеристиками.

Порядок виконання роботи

Виконати розрахунок для трьох типів конфігурацій гібридних автомобілів у відповідності до варіанту наведеного в додатку 8. Енергетичний баланс гібридного електромобіля визначається сумою енергії, отриманої від палива та електричної енергії акумулятора:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{паливо}} + E_{\text{ел}} \quad 8.1$$

де $E_{\text{заг}}$ – загальна енергія, що витрачається на рух транспортного засобу, Дж; $E_{\text{паливо}}$ – енергія, отримана від згоряння палива, Дж; $E_{\text{ел}}$ – електрична енергія, використана з акумуляторної батареї, Дж.

Енергія палива визначається за залежністю:

$$E_{\text{паливо}} = \frac{L \cdot q}{100} \cdot \rho \cdot Q_{\text{н}} \quad 8.2$$

де L – пройдений шлях, приймаємо 100 км; q – витрата палива, л/100 км; ρ – густина палива, кг/л (для бензину 0.74...0.76 кг/л); $Q_{\text{н}}$ – нижча теплота згоряння палива, Дж/кг (для бензину $\approx 44 \cdot 10^6$ Дж/кг).

Електрична енергія, що споживається транспортним засобом, визначається як:

$$E_{\text{ел}} = E_{\text{кВт}\cdot\text{год}} \cdot 3,6 \cdot 10^6 \quad 8.3$$

де $E_{\text{кВт}\cdot\text{год}}$ – спожита електроенергія, кВт·год; $3,6 \cdot 10^6$ – коефіцієнт переведення кВт·год у Дж.

Корисна енергія:

$$E_{\text{корисна}} = \eta_{\text{двз}} \cdot E_{\text{заг}} \quad 8.4$$

де $\eta_{\text{двз}}$ – ККД ДВЗ, (0,35); $E_{\text{заг}}$ – загальна енергія, що витрачається на рух транспортного засобу, Дж.

Слід зазначити, що ефективність гібридного електромобіля значною мірою залежить від режиму руху. У міських умовах, де характерні часті розгони та гальмування, перевагу мають електричні режими та рекуперація енергії. При русі на високих швидкостях більш ефективним є використання двигуна внутрішнього згоряння.

У висновку проаналізуйте отримані результати розрахунків та встановіть залежність енергоефективності гібридного електромобіля від його конфігурації. Необхідно порівняти значення загальних витрат енергії для послідовної, паралельної та комбінованої схем і визначити, яка з них є найбільш енергоефективною за заданих умов руху.

Практична робота № 9 **Розрахунок параметрів бездротової зарядки електромобіля**

Мета роботи: дослідити принцип бездротової передачі енергії для заряджання акумуляторної батареї електромобіля та розрахувати основні параметри бездротової зарядки

Теоретичні відомості

Бортові зарядні пристрої обтяжені необхідністю використання кабелю та роз'єму, забезпечення гальванічної розв'язки бортової електроніки, а також значними габаритами і масою. Крім того, виникають питання безпеки та експлуатації в умовах дощу та снігу. Бездротова передача енергії є підходом, який дозволяє вирішити ці проблеми та пропонує користувачам зручну й безперебійну альтернативу провідному заряджанню. Окрім цього, вона забезпечує природну електричну ізоляцію та зменшує вартість, масу й об'єм бортових зарядних систем.

Основний принцип індуктивної передачі енергії полягає в тому, що дві частини індуктивного зв'язку утворюють первинну та вторинну обмотки двокомпонентного трансформатора. Зарядний пристрій перетворює низькочастотну змінну напругу мережі у високочастотну змінну напругу на етапі силового перетворення. Вторинна сторона бездротово приймає цю високочастотну енергію, яка потім випрямляється та

перетворюється у постійну напругу, що подається на акумуляторну батарею.

Двочастинний трансформатор функціонує як взаємоіндуктивно або магнітно зв'язані індуктивності, сконфігуровані таким чином, що зміна струму в одній обмотці індуктує напругу на кінцях іншої обмотки завдяки електромагнітній індукції, рис 9.1.

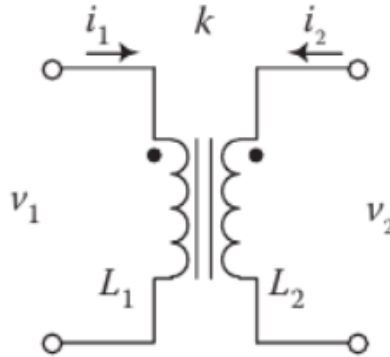


Рис 9.1. Умовне позначення індуктивно зв'язаних котушок

Порядок виконання роботи

Використовуючи вихідні дані (додаток 9) виконати розрахунок основні параметри системи бездротової передачі енергії.

Індуктивний зв'язок між двома провідниками визначається рівняннями 9.1 та 9.2.

Напруга на первинній обмотці:

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \text{ В} \quad 9.1$$

де L_1 - індуктивність первинної обмотки, Гн;

$$v_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}, \text{ В} \quad 9.2$$

де M – взаємна індуктивність, Гн; k – це коефіцієнт зв'язку обмоток, або характеристика якості магнітного кола.

$$M = k\sqrt{L_1 \cdot L_2}, \text{ Гн} \quad 9.3$$

Для струму I_1 (А) в індуктивності L_1 (Гн) напруга холостого ходу, індуквана в L_2 , визначається:

$$U = \omega M I_1 \quad 9.4$$

де ω – це кутова (циклічна) частота (рад/с), яка використовується в змінному струмі та електромагнітних процесах:

$$\omega = 2\pi f \quad 9.5$$

де f - частота роботи системи, Гц.

У разі короткого замикання на правій стороні струм визначається рівнянням:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{U}{\omega L_1} = I_1 = \frac{M}{L_2} \quad 9.6$$

Коли система налаштована на робочу частоту за допомогою конденсатора, доступна потужність визначається як добуток U та $I_{\text{к.з.}}$ (А), помножений на резонансний коефіцієнт налаштування кола Q і визначається рівнянням:

$$Q = \frac{\omega L_1}{R} \quad 9.7$$

Потужність, яку може забезпечити індуктивна система бездротової передачі енергії, залежить від добутку напруги та струму ($V \cdot A$) на первинній стороні, якості магнітного кола k та якості вторинного електричного кола Q .

$$P = U \cdot I_1 \cdot k^2 \cdot Q \quad 9.8$$

Виконавши розрахунок основних параметрів системи бездротової передачі енергії за формулами (9.3)–(9.8) додаток 9, визначте кутову частоту, взаємну індуктивність, напругу холостого ходу, струм короткого замикання, добротність контуру та потужність системи. На основі отриманих результатів сформулюйте висновок, у якому обґрунтуйте ефективність бездротової зарядки електромобіля та оцініть перспективність її практичного застосування.

Практична робота № 10

Розрахунок параметрів гібридного електромобіля на водневих паливних елементах

Мета роботи: опанувати методику визначення необхідної потужності транспортного засобу на паливних елементах (FCHEV), з урахуванням механічної потужності руху та втрат у електроприводі.

Теоретичні відомості

Паливний елемент (FC) – це електрохімічний пристрій, який споживає водень і повітря (кисень) та виробляє тепло, воду й електричну енергію. FC має подібний електрохімічний принцип дії, як і акумулятори, але на відміну від них паливо та окисник (відповідно водень і повітря) подаються ззовні. Ця особливість є дуже зручною для FCHEV, оскільки паливний бак можна швидко заправити, подібно до автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння. Перетворення хімічної енергії в електричну відбувається без процесу згоряння, тому паливні елементи працюють тихо, не потребують високих температур і їх ефективність не обмежується циклом Карно, завдяки цьому вони є ефективнішими за будь-які ДВЗ [17].

Окислювально-відновлювальна реакція, що генерує електроенергію, відбувається без вибуху завдяки використанню мембранно-електродного вузла (MEA), який, окрім запобігання змішуванню газів, виконує функцію провідника іонів. Під час реакції водень розщеплюється на протони (позитивно заряджені частинки) та електрони (негативно заряджені). Протони проходять через полімерну мембрану до катода, тоді як електрони рухаються зовнішнім електричним колом, створюючи електричний струм. Після цього утворюються молекули води.

Відомо, що вологість впливає на провідність мембрани: чим вона сухіша, тим нижча її провідність, однак надмірне зволоження (затоплення) також небажане, оскільки може блокувати реакцію. Чим більший струм відбирається, тим більше води утворюється.

Паливні елементи можна розглядати як джерела постійного струму зі змінною напругою, що залежить від струму. Поляризаційна характеристика — це функція, яка встановлює залежність між усталеною напругою та струмом паливного елемента (тобто $U_{FC} = g(I_{FC})$). Загалом поляризаційна крива складається з трьох ділянок (рис. 10.1).

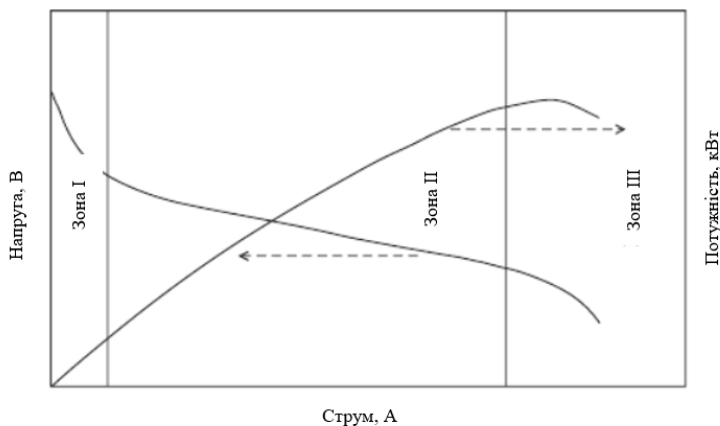


Рис. 10.1 Типова поляризаційна крива PEMFC.

Перша ділянка (Зона I) відповідає малим струмам і високим напругам, де втрати пов'язані з енергією, необхідною для запуску реакції (зона холостого ходу).

Друга ділянка (Зона II) характеризується тим, що втрати струму переважно зумовлені опором електроліту, а також зовнішнім опором електродів і з'єднань (лінійна область). Третя ділянка (Зона III) розташована в області високих струмів і низьких напруг, де відбір потужності обмежується швидкістю масопереносу.

Потужність паливного елемента може бути визначена за його напругою та струмом, як показано на рис. 10.1. Такі характеристики залежать від тиску водню H_2 , який впливає на напругу паливного елемента та загальну потужність. У нормальному режимі роботи паливного елемента уникають областей I та III, тому вимоги до струму (потужності), що відбирається від , повинні бути обмежені.

Струм $I_{ТЗ}$ і потужність $P_{ТЗ}$ споживаються транспортним засобом, $I_{акб}$, $P_{акб}$ та $I_{п.е.}$, $P_{п.е.}$ – це струм і потужність від акумуляторної батареї та від паливного елемента відповідно до рис. 10.2.

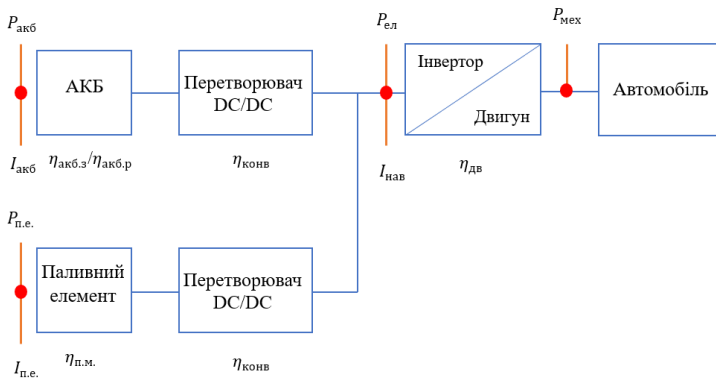


Рис. 10.2. Схема розподілу електричної потужності в FCHEV.

Порядок виконання роботи

Виконати розрахунок необхідної механічної та електричної потужності руху FCHEV, а також розподіл потужності між паливним елементом і акумуляторною батареєю відповідно до варіанту наведеного в додатку 10.

Визначення сили опору коченню.

Сила кочення характеризує втрати енергії при русі автомобіля через деформацію шин і дорожнього покриття.

$$F_{о.к.} = m \cdot g \cdot f \quad 10.1$$

де m – маса автомобіля, кг; g – прискорення вільного падіння, m/c^2 ; f – коефіцієнт кочення.

Визначення сили аеродинамічного опору.

Аеродинамічний опір виникає внаслідок взаємодії автомобіля з повітряним середовищем і суттєво зростає зі збільшенням швидкості.

$$F_{а.о.} = \frac{1}{2} \rho C_x A v^2 \quad 10.2$$

де ρ – густина повітря, $1,25 \text{ кг}/\text{м}^3$; C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору; A – лобова площа автомобіля, м^2 ; v – швидкість руху, $\text{м}/\text{с}$.

Визначення сумарної сили опору руху.

Сумарна сила опору визначає повне навантаження, яке повинен подолати привід автомобіля.

$$F = F_{o.k.} + F_{a.o.} \quad 10.3$$

Визначення механічної потужності руху.

Механічна потужність, яку потребує транспортний засіб, залежить від його динаміки; тобто вона залежить не лише від таких параметрів, як опір коченню, гравітаційне прискорення, лобова площа, нахил дороги тощо, але також і від ефективності передачі руху, що визначається механічною конструкцією транспортного засобу.

Для випадку FCHEV ця механічна потреба в потужності може бути перетворена на електричну потребу в потужності для заданої силової установки. Така потреба є більшою за механічну потужність через неминучі енергетичні втрати в електродвигуні та його приводі.

$$P_{\text{мех}} = F \cdot v \quad 10.4$$

Визначення необхідної електричної потужності/

Електрична потужність більша за механічну через втрати в електродвигуні та його приводі.

$$P_{\text{ел}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta_{\Sigma}} \quad 10.5$$

де η_{Σ} – ККД електроприводу.

Визначення розподілу потужності між джерелами.

Для ефективної роботи гібридної системи потужність розподіляється між паливним елементом та акумуляторною батареєю.

$$P_{\text{п.е.}} = \%П. Е. \cdot P_{\text{ел}} \quad 10.6$$

$$P_{\text{акб}} = \%АКБ \cdot P_{\text{ел}} \quad 10.7$$

Визначення струму паливного елемента.

Струм паливного елемента визначає режим його роботи та впливає на витрату водню.

$$I_{\text{п.е.}} = \frac{P_{\text{п.е.}}}{U} \quad 10.8$$

де U – напруга системи, В.

Споживання водню m_{H_2} (кг/с) паливним елементом пропорційне струму, який він віддає паливний елемент ($I_{\text{п.е.}}$), тобто:

$$\dot{m}_{H_2}(t) = - \frac{\bar{N}M_{H_2}I_{\text{п.е.}}(t)}{2F} \quad 10.9$$

де N – кількість елементів у стеку (зібраний пакет паливних елементів); M_{H_2} – молярна маса водню, 2.016 г/моль; F – стала Фарадея, 96485 Кл/моль; $I_{п.е.}(t)$ – струм, який забезпечує паливний елемент.

У результаті розрахунків визначити необхідну механічну та електричну потужність руху транспортного засобу, а також сформулювати висновок де обґрунтувати розподіл потужності між паливним елементом і акумуляторною батареєю.

ДОДАТКИ

Додаток 1

№ варіанту	Тип ЕТЗ	Модель	Споживання за змішаним циклом
1	BEV	Tesla Model 3	15.5 кВт·год
	HEV	Toyota Prius	4.3 л + 1.2 кВт·год
	PHEV	Ford Kuga PHEV	1.4 л + 15.0 кВт·год
2	BEV	Nissan Leaf	17.0 кВт·год
	HEV	Toyota Corolla Hybrid	4.5 л + 1.3 кВт·год
	PHEV	Mitsubishi Outlander PHEV	1.8 л + 16.5 кВт·год
3	BEV	Hyundai Kona Electric	14.7 кВт·год
	HEV	Hyundai Ioniq Hybrid	4.2 л + 1.1 кВт·год
	PHEV	Toyota Prius Plug-in	1.3 л + 13.5 кВт·год
4	BEV	Volkswagen ID.4	18.2 кВт·год
	HEV	Honda Insight	4.6 л + 1.2 кВт·год
	PHEV	BMW 330e	1.6 л + 15.2 кВт·год
5	BEV	Kia EV6	16.5 кВт·год
	HEV	Kia Niro Hybrid	4.7 л + 1.3 кВт·год
	PHEV	Volvo XC60 Recharge	2.1 л + 17.0 кВт·год
6	BEV	Tesla Model Y	16.9 кВт·год
	HEV	Lexus UX 250h	5.0 л + 1.4 кВт·год
	PHEV	Kia Sorento PHEV	1.9 л + 16.0 кВт·год
7	BEV	BMW i3	15.2 кВт·год
	HEV	Toyota Camry Hybrid	4.4 л + 1.3 кВт·год
	PHEV	Audi A3 e-tron	1.6 л + 14.5 кВт·год
8	BEV	Renault Zoe	16.8 кВт·год
	HEV	Honda CR-V Hybrid	5.3 л + 1.5 кВт·год
	PHEV	BMW X5 xDrive45e	2.4 л + 20.0 кВт·год
9	BEV	Chevrolet Bolt	17.5 кВт·год
	HEV	Toyota RAV4 Hybrid	4.8 л + 1.4 кВт·год
	PHEV	Hyundai Tucson PHEV	1.9 л + 15.8 кВт·год
10	BEV	Hyundai Ioniq 5	17.8 кВт·год
	HEV	Kia Sportage Hybrid	5.0 л + 1.4 кВт·год
	PHEV	Peugeot 3008 Hybrid	1.7 л + 15.3 кВт·год
11	BEV	Kia Niro EV	16.0 кВт·год
	HEV	Ford Escape Hybrid	5.1 л + 1.5 кВт·год
	PHEV	Volvo XC90 Recharge	2.2 л + 18.5 кВт·год
12	BEV	Skoda Enyaq iV	18.5 кВт·год
	HEV	Toyota Highlander Hybrid	6.0 л + 1.8 кВт·год
	PHEV	Mitsubishi Eclipse Cross PHEV	2.0 л + 16.2 кВт·год

Продовження додатка 1

13	BEV	Audi Q4 e-tron	18.1 кВт·год
	HEV	Lexus ES 300h	4.6 л + 1.3 кВт·год
	PHEV	Mercedes C300e	1.5 л + 14.8 кВт·год
14	BEV	BMW i4	18.0 кВт·год
	HEV	Hyundai Sonata Hybrid	4.4 л + 1.2 кВт·год
	PHEV	BMW 530e	1.6 л + 15.0 кВт·год
15	BEV	Mercedes EQA	17.7 кВт·год
	HEV	Toyota Yaris Hybrid	3.9 л + 1.0 кВт·год
	PHEV	Volkswagen Passat GTE	1.5 л + 14.7 кВт·год
16	BEV	Mercedes EQB	19.0 кВт·год
	HEV	Honda Jazz Hybrid	4.5 л + 1.2 кВт·год
	PHEV	Skoda Superb iV	1.6 л + 15.1 кВт·год
17	BEV	Volvo XC40 Recharge	19.5 кВт·год
	HEV	Nissan X-Trail Hybrid	5.8 л + 1.6 кВт·год
	PHEV	Citroen C5 Aircross Hybrid	1.8 л + 15.5 кВт·год
18	BEV	Ford Mustang Mach-E	19.0 кВт·год
	HEV	Subaru Crosstrek Hybrid	6.2 л + 1.7 кВт·год
	PHEV	Jeep Wrangler 4xe	3.0 л + 21.0 кВт·год
19	BEV	Polestar 2	19.2 кВт·год
	HEV	Lexus RX 450h	5.5 л + 1.6 кВт·год
	PHEV	Jeep Grand Cherokee 4xe	2.8 л + 20.5 кВт·год
20	BEV	MG4 Electric	17.0 кВт·год
	HEV	Toyota Sienna Hybrid	6.5 л + 1.8 кВт·год
	PHEV	Chrysler Pacifica Hybrid	2.9 л + 21.5 кВт·год
21	BEV	Peugeot e-208	16.2 кВт·год
	HEV	Kia Sorento Hybrid	6.1 л + 1.7 кВт·год
	PHEV	Ford Explorer PHEV	3.1 л + 22.0 кВт·год
22	BEV	Opel Corsa-e	15.8 кВт·год
	HEV	Renault Clio Hybrid	4.3 л + 1.2 кВт·год
	PHEV	Mini Countryman SE ALL4	2.2 л + 16.8 кВт·год
23	BEV	Fiat 500e	14.5 кВт·год
	HEV	Toyota Aqua Hybrid	3.7 л + 1.0 кВт·год
	PHEV	Renault Captur E-Tech PHEV	1.6 л + 14.9 кВт·год
24	BEV	BYD Dolphin	15.9 кВт·год
	HEV	Hyundai Tucson Hybrid	5.6 л + 1.5 кВт·год
	PHEV	Peugeot 508 Hybrid	1.7 л + 15.6 кВт·год
25	BEV	Volkswagen ID.3	16.0 кВт·год
	HEV	Toyota C-HR Hybrid	4.5 л + 1.3 кВт·год
	PHEV	Cupra Formentor e-Hybrid	1.8 л + 15.4 кВт·год

Додаток 2

№	(n), шт	$l_{сд}$, км	B, шт	D, %	$N_{1км}$, кВт/1км	E, км/кВт год	T, год
1	1100	35	3550	70	0,2	5	10
2	1150	36	3542	71	0,25	4	11
3	1050	37	3322	72	0,12	8,3	12
4	1040	38	2233	73	0,13	7,7	14
5	1560	39	2156	74	0,14	7,14	15
6	1254	40	5621	75	0,15	6,7	16
7	1453	41	2244	76	0,16	6,25	17
8	1751	42	3526	77	0,17	5,9	18
9	1235	43	5421	78	0,18	5,6	19
10	1542	44	2548	79	0,19	5,3	20
11	1652	45	1425	80	0,2	5	21
12	1324	46	2514	81	0,21	4,8	22
13	2432	47	3542	82	0,22	4,5	23
14	5423	48	3322	83	0,23	4,3	24
15	2542	49	2233	84	0,24	4,1	23
16	1782	50	2156	85	0,25	3,9	24
17	2156	51	5621	71	0,26	3,6	22
18	4521	52	2244	72	0,27	3,3	21
19	1323	53	3526	73	0,28	3,1	20
20	1325	54	5421	74	0,29	2,9	24
21	1104	55	2548	75	0,3	2,6	19
22	1025	56	1425	76	0,11	9	19
23	1104	57	3542	77	0,12	8,3	20
24	1025	58	3322	78	0,13	7,7	21
25	1200	59	2233	84	0,14	7,14	22
26	1400	60	2156	85	0,15	6,7	23
27	1542	61	5621	83	0,16	6,25	24
28	1265	62	2244	82	0,17	5,9	23
29	1542	63	3526	81	0,18	5,6	24
30	1452	64	5421	80	0,19	5,3	22
31	4521	54	2233	75	0,27	3,3	21
32	1323	55	2156	76	0,28	3,1	20
33	1325	56	5621	77	0,29	2,9	24
34	1104	57	2244	78	0,3	2,6	19

№	Модель електромобіля	m , кг	V_{max} , км/год	F_{op} , Н	U , В	D , км
1	Tesla Model 3	1760	225	400-900	355	550
2	Tesla Model S	2108	250	410	370	650
3	Tesla Model X	2480	250	420	400	560
4	Tesla Model Y	2003	217	430	390	500
5	Nissan Leaf	1685	144	440	360	270
6	Chevrolet Bolt EV	1628	146	450	350	417
7	Chevrolet Bolt EUV	1669	146	460	350	397
8	Hyundai Kona Electric	1743	167	470	356	450
9	Hyundai Ioniq 5	1990	185	480	697	450
10	Hyundai Ioniq 6	1880	185	490	697	550
11	Kia EV6	1985	185	500	697	500
12	Kia Niro EV	1757	167	510	356	455
13	Volkswagen ID.3	1794	160	520	350	450
14	Volkswagen ID.4	2124	160	530	350	500
15	BMW i3	1365	150	540	360	300
16	BMW i4	2050	190	550	400	550
17	BMW iX	2440	200	560	400	630
18	Audi e-tron	2490	200	570	396	440
19	Audi Q4 e-tron	2125	160	580	350	500
20	Mercedes-Benz EQS	2480	210	590	400	380
21	Mercedes-Benz EQC	2425	180	600	405	300
22	Ford Mustang Mach-E	2190	180	610	376	550
23	Renault Zoe	1577	140	620	400	390
24	Peugeot e-2008	1650	150	630	400	400
25	MG ZS EV	1620	175	640	350	450

№	m, кг	t ₁ (0–100), с	U, В	κ	V ₁ , км/год	V ₂ , км/год	V ₃ , км/год
1	1200	12	300	1.2	40	60	80
2	1300	11	320	1.2	40	70	90
3	1400	10	350	1.25	50	70	90
4	1500	9	360	1.25	50	80	100
5	1600	8	380	1.3	60	80	100
6	1700	8	400	1.2	60	90	110
7	1800	7.5	400	1.25	60	90	120
8	1900	7	420	1.3	70	100	120
9	2000	6.5	450	1.2	70	100	130
10	2100	6	450	1.25	80	110	130
11	2200	6	480	1.3	80	110	140
12	2300	5.5	500	1.2	80	120	140
13	2400	5.5	520	1.25	90	120	150
14	2500	5	540	1.3	90	130	150
15	2600	5	550	1.2	90	130	160
16	2700	4.8	580	1.25	100	140	160
17	2800	4.5	600	1.3	100	140	170
18	2900	4.5	620	1.2	100	150	170
19	3000	4.2	650	1.25	110	150	180
20	3100	4	650	1.3	110	160	180
21	3200	4	680	1.2	110	160	190
22	3300	3.8	700	1.25	120	170	190
23	3400	3.8	720	1.3	120	170	200
24	3500	3.5	750	1.2	120	180	200
25	3600	3.5	800	1.3	130	180	210

№	Модель електро-мобіля	m, кг	V ₁ , км/год	V ₂ , км/год	S, м	Cd	A, м ²	f	η _{ел.дв}	η _{инв}	η _{акб}
1	Nissan Leaf	1580	100	30	95	0.28	2.20	0.015	0.90	0.95	0.90
2	Tesla Model 3	1760	110	20	110	0.23	2.30	0.014	0.93	0.97	0.94
3	Renault Zoe	1500	90	10	82	0.29	2.10	0.015	0.89	0.95	0.90
4	BMW i3	1365	100	10	90	0.29	2.38	0.014	0.91	0.96	0.92
5	VW ID.3	1800	100	30	96	0.27	2.30	0.015	0.91	0.96	0.91
6	Hyundai Kona EV	1743	100	20	98	0.29	2.40	0.015	0.90	0.95	0.90
7	Kia e-Niro	1812	100	15	100	0.29	2.35	0.015	0.90	0.95	0.90
8	Peugeot e-208	1530	90	5	84	0.29	2.10	0.015	0.89	0.95	0.90
9	Opel Corsa-e	1510	90	30	83	0.29	2.05	0.015	0.89	0.95	0.90
10	Dacia Spring	970	80	10	65	0.35	2.00	0.016	0.88	0.94	0.91
11	Tesla Model S	2100	120	20	125	0.24	2.50	0.014	0.93	0.97	0.94
12	Tesla Model X	2480	110	30	118	0.25	2.80	0.015	0.92	0.96	0.93
13	Audi e-tron	2490	100	40	112	0.28	2.70	0.015	0.91	0.96	0.90
14	Porsche Taycan	2295	130	0	138	0.22	2.40	0.014	0.94	0.97	0.94
15	Hyundai Ioniq 5	2000	110	20	108	0.29	2.60	0.015	0.91	0.96	0.90
16	Kia EV6	1985	110	0	107	0.28	2.50	0.015	0.91	0.96	0.90
17	Nissan Ariya	2100	110	10	111	0.30	2.60	0.015	0.90	0.95	0.90
18	Ford Mustang Mach-E	2200	110	5	115	0.29	2.60	0.015	0.91	0.96	0.90
19	Skoda Enyaq	2100	100	10	104	0.27	2.60	0.015	0.91	0.96	0.91
20	VW ID.4	2120	100	25	105	0.28	2.60	0.015	0.91	0.96	0.91
21	Mercedes EQC	2425	100	15	110	0.29	2.70	0.015	0.91	0.96	0.90
22	BMW iX	2440	110	30	119	0.25	2.80	0.015	0.92	0.96	0.92
23	Honda e	1520	90	20	81	0.28	2.10	0.015	0.89	0.95	0.90
24	Mini Electric	1440	90	5	79	0.30	2.00	0.015	0.89	0.95	0.90
25	Fiat 500e	1400	80	10	70	0.31	2.00	0.015	0.89	0.95	0.89

№	Автомобіль	E_n , кВт·год	D , км	L , тис. км	k , %/цикл	T , °C	k_i	DoD
1	Nissan Leaf	40	270	50	0.03	20	1.1	0.9
2	Tesla Model 3	60	400	100	0.025	10	1.3	0.9
3	Hyundai Kona Electric	64	450	120	0.025	0	1.25	0.9
4	Volkswagen ID.4	77	520	150	0.02	-5	1.4	0.9
5	BMW i3	42	260	80	0.03	25	1.1	0.85
6	Kia EV6	77	500	130	0.02	15	1.3	0.9
7	Renault Zoe	52	350	90	0.03	20	1.1	0.85
8	Audi e-tron	95	400	140	0.02	-10	1.5	0.9
9	Mercedes EQC	80	420	110	0.025	-15	1.4	0.9
10	Ford Mustang Mach-E	88	480	160	0.02	5	1.3	0.9
11	Peugeot e-2008	50	320	70	0.03	15	1.1	0.85
12	MG ZS EV	50	300	60	0.03	10	1.15	0.85
13	BMW i4	84	550	180	0.02	0	1.4	0.9
14	Tesla Model S	100	600	200 000	0.02	5	1.5	0.9
15	Tesla Model Y	75	500	150	0.02	10	1.3	0.9
16	Hyundai Ioniq 5	72.6	480	140	0.02	20	1.3	0.9
17	Hyundai Ioniq 6	77.4	520	160	0.02	15	1.3	0.9
18	Kia Niro EV	64.8	450	120	0.025	10	1.2	0.9
19	Volkswagen ID.3	58	420	110	0.025	0	1.2	0.9
20	Audi Q4 e-tron	82	500	150	0.02	-5	1.4	0.9
21	Mercedes EQS	107.8	650	220	0.02	25	1.5	0.9
22	BMW iX	111.5	600	200	0.02	5	1.4	0.9
23	Chevrolet Bolt EV	66	420	130	0.025	10	1.25	0.9
24	Chevrolet Bolt EUV	65	420	120	0.025	15	1.25	0.9
25	Ford Mustang Mach-E GT	91	500	180	0.02	0	1.4	0.9

№	Маса батареї, кг	Частка вмісту різних матеріалів в АКБ, %								
		Al	Cu	C	Ni	Co	Mn	Li	Елект-роліт	Fe/Pe
1	300	10	10	15	5	3	2	1	5	5
2	310	11	11	16	6	4	3	1.5	6	6
3	320	12	12	17	7	5	4	2	7	7
4	330	13	13	18	8	6	5	2.5	8	8
5	340	14	14	19	9	7	2	3	9	9
6	350	15	15	20	10	3	3	1	10	10
7	360	16	10	15	11	4	4	1.5	5	11
8	370	17	11	16	12	5	5	2	6	12
9	380	18	12	17	13	6	2	2.5	7	13
10	390	19	13	18	14	7	3	3	8	14
11	400	20	14	19	15	3	4	1	9	15
12	410	10	15	20	14	4	5	1.5	10	5
13	420	11	10	15	13	5	2	2	5	6
14	430	12	11	16	12	6	3	2.5	6	7
15	440	13	12	17	11	7	4	3	7	8
16	450	14	13	18	10	3	5	1	8	9
17	460	15	14	19	9	4	2	1.5	9	10
18	470	16	15	20	8	5	3	2	10	11
19	480	17	10	15	7	6	4	2.5	5	12
20	490	18	11	16	6	7	5	3	6	13
21	500	19	12	17	5	3	2	1	7	14
22	510	20	13	18	4	4	3	1.5	8	15
23	520	10	14	19	3	5	4	2	9	14
24	530	11	15	20	2	6	5	2.5	10	13
25	540	12	10	15	1	7	2	3	9	12
26	550	13	11	16	2	3	3	1	8	11
27	560	14	12	17	3	4	4	1.5	7	10
28	570	15	13	18	4	5	5	2	6	9
29	580	16	14	19	5	6	4	2.5	5	8
30	590	17	15	20	6	7	3	3	8	7

№	Послідовний гібрид		Паралельний гібрид		Комбінований гібрид	
	q_1 , л/100 км	E_1 , кВт·год/100 км	q_2 , л/100 км	E_2 , кВт·год/100 км	q_3 , л/100 км	E_3 , кВт·год/100 км
1	6.5	18	7.5	10	6.0	14
2	6.8	19	7.8	11	6.3	15
3	7.0	20	8.0	12	6.5	16
4	7.2	21	8.2	12	6.7	16
5	7.5	22	8.5	13	7.0	17
6	7.8	23	8.8	13	7.2	18
7	8.0	24	9.0	14	7.5	18
8	8.2	25	9.2	14	7.7	19
9	8.5	26	9.5	15	8.0	20
10	8.8	27	9.8	15	8.2	21
11	9.0	28	10.0	16	8.5	21
12	9.2	29	10.2	16	8.7	22
13	9.5	30	10.5	17	9.0	23
14	9.8	31	10.8	17	9.2	24
15	10.0	32	11.0	18	9.5	24
16	10.2	33	11.2	18	9.7	25
17	10.5	34	11.5	19	10.0	26
18	10.8	35	11.8	19	10.2	27
19	11.0	36	12.0	20	10.5	27
20	11.2	37	12.2	20	10.7	28
21	11.5	38	12.5	21	11.0	29
22	11.8	39	12.8	21	11.2	30
23	12.0	40	13.0	22	11.5	30
24	12.2	41	13.2	22	11.7	31
25	12.5	42	13.5	23	12.0	32

Додаток 9

№	L ₁ (мкГн)	L ₂ (мкГн)	k	f (кГц)	I ₁ (А)	R (Ом)
1	200	180	0.20	50	10	0.5
2	220	200	0.22	60	11	0.6
3	240	220	0.25	70	12	0.7
4	260	240	0.28	80	13	0.8
5	280	260	0.30	85	14	0.9
6	300	280	0.32	90	15	1.0
7	320	300	0.35	95	16	1.1
8	340	320	0.38	100	17	1.2
9	360	340	0.40	105	18	1.3
10	380	360	0.42	110	19	1.4
11	400	380	0.45	115	20	1.5
12	420	400	0.48	120	21	1.6
13	440	420	0.50	125	22	1.7
14	460	440	0.52	130	23	1.8
15	480	460	0.55	135	24	1.9
16	500	480	0.58	140	25	2.0
17	520	500	0.60	145	26	2.1
18	540	520	0.62	150	27	2.2
19	560	540	0.65	155	28	2.3
20	580	560	0.68	160	29	2.4
21	600	580	0.70	165	30	2.5
22	620	600	0.72	170	31	2.6
23	640	620	0.75	175	32	2.7
24	660	640	0.78	180	33	2.8
25	680	660	0.80	185	34	2.9

№	v (м/с)	m (кг)	f	C_x	A	η_{Σ}	N	U (В)	%П.Е. / %АКБ (%)
1	15	1500	0.015	0.29	2.2	0.85	100	300	70 / 30
2	18	1600	0.015	0.30	2.3	0.85	110	320	65 / 35
3	20	1700	0.016	0.31	2.4	0.86	120	320	60 / 40
4	22	1800	0.016	0.32	2.5	0.86	130	340	65 / 35
5	25	1900	0.017	0.33	2.6	0.87	140	350	70 / 30
6	12	1400	0.014	0.28	2.1	0.84	90	280	60 / 40
7	16	1550	0.015	0.29	2.2	0.85	100	300	65 / 35
8	19	1650	0.016	0.30	2.3	0.85	110	310	70 / 30
9	21	1750	0.016	0.31	2.4	0.86	120	320	75 / 25
10	24	1850	0.017	0.32	2.5	0.87	130	330	70 / 30
11	26	1950	0.017	0.33	2.6	0.87	140	350	75 / 25
12	14	1450	0.014	0.28	2.1	0.84	95	290	60 / 40
13	17	1580	0.015	0.29	2.2	0.85	105	300	65 / 35
14	20	1680	0.016	0.30	2.3	0.86	115	320	70 / 30
15	23	1780	0.016	0.31	2.4	0.86	125	330	70 / 30
16	27	2000	0.018	0.34	2.7	0.88	150	360	80 / 20
17	13	1420	0.014	0.28	2.1	0.84	90	280	60 / 40
18	18	1620	0.015	0.30	2.3	0.85	110	310	65 / 35
19	21	1720	0.016	0.31	2.4	0.86	120	320	70 / 30
20	24	1820	0.017	0.32	2.5	0.87	130	330	75 / 25
21	26	1920	0.017	0.33	2.6	0.87	140	350	75 / 25
22	15	1500	0.015	0.29	2.2	0.85	100	300	65 / 35
23	19	1650	0.016	0.30	2.3	0.86	110	320	70 / 30
24	22	1800	0.016	0.32	2.5	0.86	130	340	70 / 30
25	25	1950	0.017	0.33	2.6	0.87	140	350	75 / 25

Список рекомендованої літератури

1. EU Regulation 2018/858 — eur-lex.europa.eu
2. UNECE Regulations №. 100, №134. <https://unece.org/>
3. Directive 2014/94/EU — щодо розвитку інфраструктури для альтернативних видів палива
4. IEA Global EV Outlook 2023 — iea.org
5. SAE J3016 – терміни й визначення щодо електрифікованих ТЗ
6. ISO 6469 (Parts 1–3) – функціональна безпека електромобілів
7. T. A. Burruss S. L. Campbell C. L. Coomcr C. W. Ayers A. A. Wereszczak J. P. Cunningham L. D. Marlino L. E. Seiber H.T. Lin Evaluation of the 2010 Toyota Prius hybrid synergy drive system. Prepared by the Oak ridge national laboratory Oak Ridge, Tennessee 37831 managed by UT-battelle, LLC for the U.S. Department of energy Under contract DE-AC05-00OR22725
8. Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council. Офіційний текст регламенту англійською (EUR-Lex)
9. Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators (застаріла, але корисна для історії нормування) EUR-Lex
10. IRENA – «End-of-Life Management for Batteries» (2020). PDF-звіт на сайті IRENA.
11. IEA – Global EV Outlook (2023) <https://iea.gov.ua/>
12. McKinsey & Company – Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage <https://surli.cc/kydysp>
13. European Battery Alliance, EBA250. <https://www.eba250.com/>
14. Patil, Shubham. «The Calculation of Electric Motor a Nd Lithium Battery Capacity of IRED E BIKE». VIVA-Tech International Journal for Research and Innovation, 2021. <https://www.viva-technology.org/New/IJRI/2021/136.pdf>
15. ChaoYangab, Tonglin Suna, Weida Wangab. Regenerative braking system development and perspectives for electric vehicles: An overview Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 198, July 2024 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114389>
16. O. Chkalov, R. Dropa. Prediction of electric vehicle mileage according to optimal energy consumption criterion. Energy Engineering and Control Systems, 2024, Vol. 10, No. 1, pp. 19–27. <https://doi.org/10.23939/jeecs2024.01.019>
17. Ali Emadi. Advanced electric drive vehicles. McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada. International Standard Book Number-13:978-1-4665-9770-9 (eBook - PDF) P. 586