

УДК: 629.1.02

ДИНАМІЧНІ ОБМЕЖЕННЯ ГІБРИДІВ, СПРИЧИНЕНІ СТАРІННЯМ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ БАТАРЕЇ

А.І. Папінко, *ст. викладач, канд. екон наук*

М.В. Буряк, *доц., канд. техн. наук*

Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль

У контексті глобальних зусиль зі зниження викидів вуглецю гібридні електричні транспортні засоби посідають ключове місце, виступаючи ефективним перехідним рішенням між традиційними автомобілями з двигунами внутрішнього згорання та повністю електричним транспортом. Їхня ефективність і динаміка значною мірою залежать від співпраці ДВЗ та високовольтної акумуляторної батареї. У гібридах ВВБ не призначена для забезпечення великого запасу ходу, але її функція полягає в іншому, вона миттєво надає пікову потужність для прискорення та активно приймає енергію під час рекуперативного гальмування. Саме електрична складова забезпечує гібриду високу чутливість, швидкий відгук на педаль акселератора та оптимальну роботу в міському циклі.

Незважаючи на досконалість гібридної системи, вона підпорядковується фундаментальним фізико-хімічним обмеженням, головним з яких є неминучий процес старіння ВВБ. Цей процес, відомий як деградація, проявляється не лише у зниженні загальної енергетичної ємності, але, що є критичнішим для динаміки, у значному збільшенні внутрішнього опору батареї – так званому "зниженні потужності". Зростання внутрішнього опору створює бар'єр для ефективного протікання струму, безпосередньо обмежуючи як максимальну потужність, яку батарея може віддати електричному двигуну під час прискорення, так і швидкість, з якою вона може прийняти енергію при рекуперації.

Таке обмеження струмових характеристик ВВБ має відчутні наслідки для експлуатаційних показників гібридного автомобіля. У міру старіння батареї можна спостерігати погіршення динаміки, особливо під час різких маневрів або обгонів, оскільки електрична система не може забезпечити очікуване пікове прискорення. Крім того, знижується ефективність рекуперації, що змушує систему управління частіше використовувати механічні гальма та частіше запускати ДВЗ для підтримки оптимального рівня заряду, що, зрештою, призводить до зростання витрати пального та зниження загальної економічності, нівелюючи одну з головних переваг гібридної технології.

Експлуатаційна спроможність гібридного автомобіля критично залежить від здатності його високовольтної батареї своєчасно забезпечувати великі електричні струми для підтримки двигуна та ефективного відновлення енергії. З часом батарея неминуче піддається процесу деградації, що проявляється у двох основних обставинах. Перша, це втрата ємності, і полягає вона у зменшенні загального запасу накопиченої енергії, переважно через втрату активного літію та формування пасивуючого шару твердого електроліту на аноді. Хоча зниження ємності впливає на загальну паливну ефективність, для динамічних характеристик набагато важливішим є друга обставина, а саме зниження потужності. Воно прямо пов'язане зі значним збільшенням внутрішнього опору батареї, який стає головним обмежувачем її продуктивності.

Зростання внутрішнього опору обумовлене низкою складних електрохімічних процесів, що відбуваються всередині елементів. З часом шар пасивуючого електроліту потовщується та ущільнюється, ефективно уповільнюючи переміщення іонів літію між електродами. До цього додається погіршення контактного опору та можлива корозія струмоміначів, а також зниження іонної провідності електроліту, особливо під впливом

температурних коливань. Усі ці фактори діють спільно, вони обмежують максимальну швидкість обміну енергією, незалежно від того, скільки літію залишається в активному матеріалі. Таким чином, навіть якщо батарея має достатню ємність, її здатність до швидкої віддачі або прийому струму значно падає. Напруга на клеммах батареї (V_t) під час розряду зменшується через внутрішній опір згідно з фундаментальним рівнянням:

$$V_t = V_{oc} - I \cdot R_{int} \quad (1)$$

де V_{oc} — напруга розімкнутого кола, I — струм навантаження, а R_{int} — внутрішній опір. Зі зростанням R_{int} падіння напруги стає більш значним при тому ж струмі, обмежуючи роботу інвертора та електродвигуна.

Специфіка використання гібридних автомобілів, прискорює цю деградацію потужності. На відміну від електромобілів, гібрид постійно працює у режимі високих і частих пікових струмів під час кожного прискорення чи рекуперації. Інтенсивні струмові навантаження призводять до значного теплового та механічного стресу. Окрім того, система управління батареєю зазвичай підтримують стан заряду у вузькому, середньому діапазоні близько, 20–70%, що також сприяє процесам деградації. Основною каталітичною причиною прискореного старіння є температурний режим, високі струми, особливо в умовах неоптимального охолодження, викликають підвищення внутрішньої температури елементів, що основою для небажаних хімічних реакцій.

Прямий фізичний зв'язок між старінням і динамікою стає очевидним, якщо розглянути вплив внутрішнього опору на максимальну доступну електричну потужність (P_{max}). Відповідно до базових електричних принципів, пікова потужність, яку батарея може віддати, обернено пропорційна опору. Згідно з теорією передачі максимальної потужності, це можна виразити як:

$$P_{max} = \frac{V_{oc}^2}{4R_{int}} \quad (2)$$

Ця залежність означає, що навіть помірне зростання R_{int} призводить до значного зниження P_{max} , безпосередньо впливаючи на динаміку. Крім того, збільшення опору посилює теплові втрати (P_{loss}), які створюються як внутрішнє тепло за формулою:

$$P_{loss} = I^2 \cdot R_{int} \quad (3)$$

Збільшення R_{int} призводить до більшого тепловиділення, що створює додаткове тепло обмеження, змушуючи систему управління ще більше обмежувати струм для захисту батареї. Як наслідок, старіння батареї через зростання внутрішнього опору безпосередньо призводить до зниження здатності електричної частини гібридної системи забезпечувати необхідну динаміку.

Зростання внутрішнього опору, трансформується у прямі динамічні та економічні обмеження. Перш за все, деградація батареї проявляється у зниженні потужності прискорення. У гібридній системі електричний двигун слугує головним джерелом миттєвого додаткового крутного моменту, необхідного для швидкого відгуку під час маневрів. Однак, оскільки максимальна доступна електрична потужність (P_{max}) обернено пропорційна внутрішньому опору, старіння батареї неминуче зменшує ці динамічні характеристики. З фізичної точки зору, максимальний струм розряду, який батарея може безпечно видати ($I_{max,dis}$), обмежений допустимим мінімальним рівнем напруги на клеммах (V_{min}) для інвертора, згідно з залежністю:

$$I_{max,dis} = \frac{V_{oc} - V_{min}}{R_{int}} \quad (4)$$

де V_{oc} — напруга розімкнутого кола, а V_{min} — мінімально допустима робоча напруга. Зі зростанням внутрішнього опору ця величина значно зменшується, що призводить до

помітного погіршення відчуття динаміки. Системі управління доводиться частіше і швидше підключати двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) на високих обертах для компенсації нестачі електричної потужності, що не тільки погіршує плавність руху, але й може становити ризик під час критичних маневрів, таких як обгін на трасі.

Другим значним обмеженням є зниження ефективності рекуперативного гальмування. Рекуперація це основний елемент паливної ефективності гібрида, вона дозволяє перетворювати кінетичну енергію автомобіля назад в електричну і запасати її у батареї. Проте, високий внутрішній опір обмежує струм, який батарея може поглинути, що призводить до обмеження прийому заряду. Максимальний струм заряду ($I_{max,ch}$), який може бути прийнятий під час рекуперації, обмежується максимально допустимою напругою (V_{max}), щоб уникнути пошкодження елементів, і описується як:

$$I_{max,ch} = \frac{V_{max} - V_{oc}}{R_{int}}$$

Оскільки R_{int} знаходиться у знаменнику, його збільшення призводить до прямого падіння $I_{max,ch}$. Коли батарея не може швидко поглинути всю генеровану енергію, система змушена перенаправляти надлишкову енергію на традиційні гальма. У результаті значна частина енергії, яка мала б бути збережена для подальшого використання, розсіюється у вигляді тепла. Прямим наслідком цього є зниження загальної економічності автомобіля та зменшення пробігу, який гібрид може подолати виключно на електричній тязі, особливо в умовах інтенсивного міського трафіку, де рекуперація найбільш інтенсивна.

Окрім прямого впливу на потужність, старіння батареї вимагає адаптивної зміни логіки роботи системи управління батареєю. Щоб захистити стару батарею від надмірного теплового навантаження та неприпустимих падінь напруги, система стає менш гнучкою, вона вимушена звужувати робочий діапазон стану заряду. Наприклад, якщо нова батарея використовувала діапазон 20-70%, то деградована може бути обмежена діапазоном 30-60%. Це означає, що ДВЗ повинен працювати довше і запускатися частіше, щоб підтримувати батарею у вузькому але безпечному проміжку. Таким чином, деградація ВВБ призводить до збільшення навантаження на ДВЗ та додаткового зносу його компонентів, що є непрямим, але суттєвим експлуатаційним обмеженням. Отже, проблеми старіння батареї трансформуються в комплексний негативний вплив на керування, динаміку та економічність усієї гібридної силової установки.

Список використаних джерел

1. Huang, F., Sumida, Y., Nomura, A., Matsumura, H., Kamiya, Y., Daisho, Y., & Morita, K. (2012). Analysis of Adverse Effects on Vehicle Performance Due to Hybrid Vehicle Battery Deterioration. *World Electric Vehicle Journal*, 5(2), 307-314. <https://doi.org/10.3390/wevj5020307>
2. Grandjean, T. R. B., Groenewald, J., McGordon, A., Widanage, W. D., & Marco, J. (2018). Accelerated Internal Resistance Measurements of Lithium-Ion Cells to Support Future End-of-Life Strategies for Electric Vehicles. *Batteries*, 4(4), 49. <https://doi.org/10.3390/batteries4040049>
3. Smith, K., Earleywine, M., Wood, E., Neubauer, J. et al., "Comparison of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Battery Life Across Geographies and Drive Cycles," SAE Technical Paper 2012-01-0666, 2012, <https://doi.org/10.4271/2012-01-0666>.
4. Thomas, J., Huff, S., West, B., and Chambon, P., "Fuel Consumption Sensitivity of Conventional and Hybrid Electric Light-Duty Gasoline Vehicles to Driving Style," *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 10(3), 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-01-9379>.
5. Аулін В.В., Кульова Д.О., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Оцінювання ризиків несхоронних перевезень нафтопродуктів автомобільним транспортом. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2024. Вип. 10(41), ч.ІІ, С. 205-213. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.205-213](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.205-213)
6. Кульова Д.О., Магопєць С.О., Лівіцький О.М. Безпека дорожнього руху в Україні: оцінювання ризиків і перспективи цифровізації. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2025. Вип. 11(42), ч.ІІ. С. 298-312. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.278-285](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.278-285)