

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЇ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ГІБРИДНОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА ОСНОВІ ДИНАМІЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Т. D. Begosh; M.A. Rebeza

THE ENERGY MANAGEMENT STRATEGY OPTIMIZATION OF A HYBRID ELECTRIC VEHICLE BASED ON DYNAMIC PROGRAMMING

Гібридні електричні транспортні засоби (HEV) є перспективним рішенням для зниження споживання палива та викидів CO₂ у транспортному секторі. Ефективність HEV критично залежить від стратегії енергоменеджменту (EMS), яка керує розподілом потужності між двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електричною силовою установкою. Оптимізація EMS дозволяє досягти зниження витрати палива на 20-40% порівняно з традиційними транспортними засобами.

Метою дослідження є розробка та впровадження оптимальної стратегії енергоменеджменту для паралельного гібридного електромобіля з використанням методу динамічного програмування та порівняльний аналіз різних підходів до управління енергопотокami. В якості об'єкту дослідження виступає паралельна архітектура гібридної силової установки, що включає дві незалежні системи тяги (рис. 1):

- електрична тяга – два синхронні електродвигуни на передній осі, з'єднані з колесами через фіксоване передавальне відношення;
- гібридна тяга – бензиновий ДВЗ, інтегрований стартер-генератор (ISG), зчеплення, 6-ступінчаста автоматична трансмісія, диференціал на задній осі;
- накопичувач енергії – літій-іонна батарея.

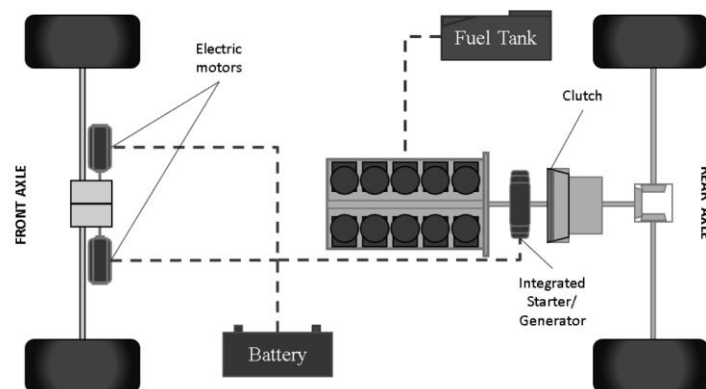


Рисунок 1. Архітектура паралельної гібридної силової установки

Основні технічні характеристики силової установки наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики силової установки гібриду

Параметр	Значення
Номінальна ємність батареї	30 А·год
Номінальна/максимальна напруга батареї	355/450 В
Тривалий/піковий крутний момент електромотора	145/350 Н·м
Тривала/пікова потужність електромотора	64/140 кВт
Максимальний крутний момент ДВЗ	533 Н·м
Максимальна потужність ДВЗ	449 кВт
Сумарна максимальна потужність (тривала/пікова)	577/729 кВт

Задача оптимального управління енергопотоками формулюється як мінімізація функції витрат палива:

$$J = \sum(t = 0 \text{ to } t_F)[\dot{m}f(t) \cdot \Delta t] \rightarrow \min, \quad (1)$$

де: $\dot{m}f(t)$ – миттєва витрата палива; t_F – час завершення їздового циклу, Δt – крок дискретизації.

З обмеженнями на стан заряду батареї:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}, \quad (2)$$

$$SOC(t_F) = SOC(0) \pm \Delta SOC, \quad (3)$$

де: SOC – рівень заряду акумуляторної батареї, в момент часу t , ΔSOC – допустиме відхилення кінцевого заряду (зазвичай $\pm 2\text{-}5\%$).

Для розв'язання задачі глобальної оптимізації застосовано метод динамічного програмування (DP), який базується на принципі оптимальності Беллмана. На відміну від евристичних та субоптимальних підходів, метод DP дозволяє знайти глобально оптимальне рішення для всього їздового циклу з урахуванням усіх нелінійностей моделі компонентів силової установки. Алгоритм DP працює шляхом зворотної рекурсії у часі, визначаючи оптимальну траєкторію управління для кожного можливого стану системи. Змінними стану є SOC батареї та швидкість транспортного засобу, керуючими змінними – розподіл крутного моменту між ДВЗ та електромоторами, вибір передачі, статус зчеплення.

Ієрархічна архітектура системи управління HEV представлена на рис. 2. Супервізорний контролер (HCU) отримує запит водія та керує компонентними контролерами (ДВЗ, електромоторів, батареї, трансмісії, гальм) згідно з реалізованою стратегією EMS.

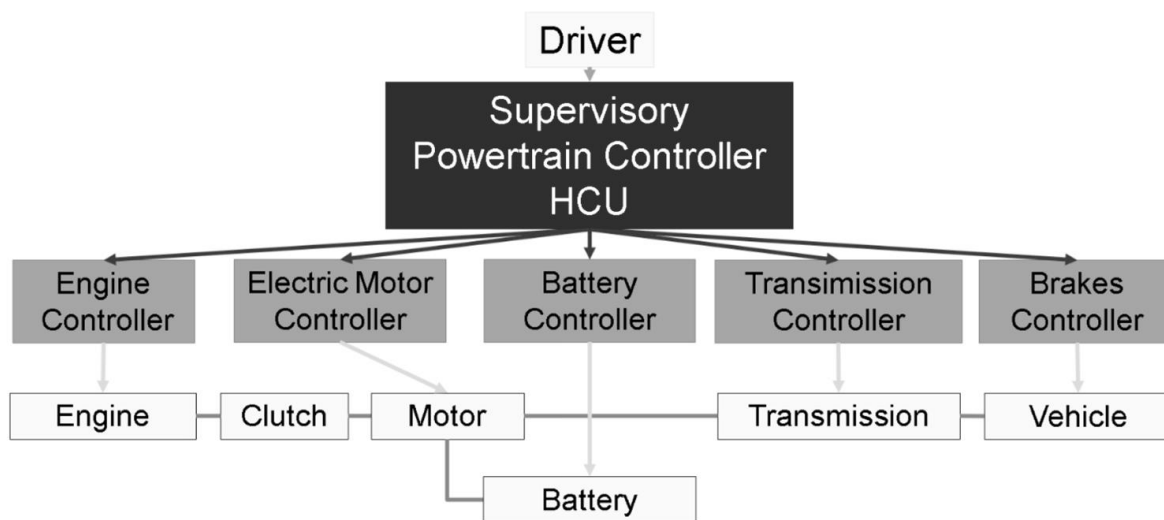


Рисунок 1. Архітектура системи управління гібридного автомобіля

Для вибору оптимальної стратегії енергоменеджменту проведено детальний аналіз ефективності різних стратегій на стандартних їздових циклах і отримано наступні результати:

– Евристичні контролери (rule-based) – найпростіші у реалізації та найшвидші у виконанні, проте показують витрату палива на 15-25% вищу за оптимальну через відсутність використання теорії оптимального управління. Потребують значних зусиль на калібрування порогових значень;

– Субоптимальні контролери (ECMS, MPC) – забезпечують локальну оптимізацію в кожен момент часу, що дає відхилення від глобального оптимуму на 5-12%. ECMS потребує точного визначення фактора еквівалентності, MPC - точної моделі прогнозування швидкості;

– Оптимальний контролер на основі DP – забезпечує глобальний оптимум витрати палива, проте вимагає знання повного їздового циклу наперед, що робить його непридатним для реалізації в реальному часі. Використовується як еталон (benchmark) для оцінки ефективності інших стратегій;

– Інтеграція інформації про майбутні дорожні умови (V2I, V2V комунікації, електронний горизонт) дозволяє субоптимальним контролерам наблизитися до показників DP, зменшуючи відхилення до 2-5%.

Таким чином метод динамічного програмування є оптимальним і показує потенціал зниження витрати палива на 28-35% порівняно з еквівалентним традиційним автомобілем на циклі WLTP.

Висновок. Проведено порівняльний аналіз ефективності різних класів стратегій енергоменеджменту, що дозволяє обґрунтовано обирати підхід залежно від вимог до продуктивності та обчислювальних ресурсів. Метод динамічного програмування забезпечує найкращі показники паливної економічності та може використовуватися для калібрування і валідації контролерів в реальному часі, а також для оцінки впливу системи прогнозування дорожніх умов на ефективність гібридних транспортних засобів.

Література

1. Aulin, V., Rogovskii, I., Lyashuk, O., Titova, L., Hrynkiv, A., Mironov, D., Volianskyi, M., Rogatynskyi, R., Solomka, O., Lysenko, S. (2024). Comprehensive assessment of technical condition of vehicles during operation based on Harrington's desirability function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (127)), 37–46.
2. Aulin V, Liashuk O, Mironov D, Staliński P, Rutkowski M, Lysenko S. Management-Oriented Assessment of Transport Service Quality Using Logistics Monitoring System and Harrington's Desirability Function in Support of SDG 9. *Sustainability*. 2025; 17(17):7837.
3. Hawkins, Troy & Gausen, Ola & Strømman, Anders. (2012). Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—A review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 17. 997-1014. 10.1007/s11367-012-0440-9.
4. Lifecycle assessment and environmental impacts of hybrid electric vehicles fuelled by bioethanol and biogas, (2025), Laene Oliveira Soares, Jose Ricardo Sodre, Ronney Arismel Mancebo Bolo. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 216, July 2025, 115652.

УДК 621.891

Н.Ю. Безкидняк, А.М. Колоденний

(Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя)

ОБГРУНТУВАННЯ СИЛОВИХ ТА КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОРІЗКИ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН

N.Yu. Bezkidnyak, A.M. Kolodenny

SUBSTANTIATION OF FORCE AND KINEMATIC PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF CUTTING AUTOMOTIVE TIRES

На сучасному етапі розвитку промислового виробництва постає проблема раціонального використання наявних енергетичних і сировинних ресурсів. Щодо,