

## КОНЦЕПЦІЯ ГІБРИДНОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДУ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

*Розглянуто основні принципи побудови гібридних транспортних засобів, їх класифікацію та можливість побудови технологічного електротранспорту на базі гібридних систем.*

**Ключові слова:** комбінований транспортний засіб, гібридний привод, автономний технологічний електротранспорт

### Постановка проблеми

Саму ідею гібридного приводу навряд чи можна назвати новою. Дійсно, поєднання класичного електроприводу з живленням від бортової акумуляторної батареї з іншим незалежним енергомодулем (здебільшого типу „двигун внутрішнього згоряння – редуктор”) є продуктивним як мінімум з точки зору збільшення міжзарядного пробігу транспортного засобу. У певний період розвитку автономного електротранспорту, зокрема і електромобілів, такий підхід мав як своїх прихильників, так і відвертих супротивників, оскільки переваги „гібридів” за збільшенням пробігу нівелювались наявністю двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ), який руйнував головний позитив електромобіля – екологічність. Врешті решт із суперечливого трикутника „чистий чудо-електромобіль – брудне авто – так собі гібрид” останній вийшов якщо не переможцем, то принаймні створінням, що має право на життя. А на сьогодні, з урахуванням рівня сучасних технологій, це „так собі”, представлено такими досконалими технічними рішеннями, що забезпечили гібридному транспорту одну з провідних позицій у рейтингу екологічно чистих транспортних засобів. І ще один аспект. Базова концепція гібридного приводу зорієнтована на паралельне (одночасне) використання електричної та паливної рушійної компоненти за умови, що ДВЗ працює в стаціонарному, найбільш екологічному режимі з мінімально забрудненими викидами. Це цілком задовольняє вирішенню проблеми міських та міжміських перевезень. Проблема ж внутрішньозаводських транспортних перевезень повинна передбачати розокремлення роботи приводу у гібридному (з ДВЗ) режимі, який здійснюється у міжцехових перевезеннях, і „чисто електричному” режимі для виконання транспортних операцій у закритих приміщеннях.

При цьому неможна забувати, що вирішення транспортних проблем для будь-якої країни є

важливою задачею і не потребує додаткового обговорення, оскільки рівень розвиненості транспортної галузі з одного боку опосередковано визначає економічний потенціал держави, а з другого – безпосередньо сприяє посиленню цього потенціалу, розвитку певних галузей промисловості, їх технологічного рівня, вимагає відповідного наповнення виробництва науковоємними розробками. Загальновідомо, що ці проблеми для України мають надзвичайно велике значення з огляду на відсутність достатніх обсягів власних енергоносіїв та на глобальне погіршення екологічного стану навколишнього середовища (наслідок великої концентрації промислових об’єктів, технологічних аварій, катастроф тощо).

Серед усіх класифікаційно існуючих видів транспорту найбільше занепокоєння викликає саме автомобільний, тобто транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння. Головними причинами цього є, по-перше, те, що понад 70% загального забруднення повітряного середовища обумовлюється, власне, автомобілями, які при цьому є ще й потужним джерелом шумового навантаження та небезпечних канцерогенних викидів (бензпирен, азбестовий пил від стирання гальмівних колодок, тощо). По-друге, невинно зростаючий автомобільний парк є головним споживачем рідких палив – 40% світового нафтовидобутку складає доля, що спалюється у транспортних двигунах внутрішнього згоряння. І це при тому, що запаси нафти, як відомо, обмежені. Тобто, продовжується вичерпування природних ресурсів та подальше забруднення довкілля токсичними викидами.

У світі активно проводяться розробки з каталітичного допалювання відпрацьованих автомобільних газів, створення двигунів, що працюють на водні або органічних газах, та в інших подібних напрямках. Але реальну альтернативу автомобільному транспорту можна реалізувати на основі розширення використання електричного та гібридного транспорту.

**Метою** статті є аналіз сучасних структурних рішень приводу гібридного електротранспорту та обґрунтування доцільності реалізації певних структур на автономному технологічному внутрішньозаводському електротранспорті.

Концептуально гібридний привод будується на основі електроприводу тої чи іншої конфігурації і має органічно вбудований енергомодуль з двигуном внутрішнього згоряння. Така побудова дає можливість забезпечувати рух транспортного засобу як тільки від електричної компоненти приводу (акумуляторна батарея – тяговий електродвигун), так і з використанням повної структури силової установки (акумуляторна батарея – електродвигун – двигун внутрішнього згоряння – генератор).

У загальному випадку можна передбачити такі основні режими роботи гібридного приводу.

*Перший:* початок руху з невеликою швидкістю або під невеликий ухил. Працює електродвигун. Двигун внутрішнього згоряння і генератор не працюють. Акумулятор видає енергію.

*Другий:* власне рух. Планетарний механізм (або інший розподільчий редуктор) один потік потужності (від ДВЗ) направляє через редуктор до ведучих коліс, а другий – до генератора, який виробляє енергію для електродвигуна (свого роду саморегульована трансмісія), що передає через редуктор свою частину крутильного моменту колесам. Акумулятор не розряджається.

*Третій:* розгін з повністю відкритим дроселем ДВЗ. Все відбувається, як у другому режимі, але тепер має бути задіяний акумулятор, що видає додаткову енергію електродвигуну, чий внесок в загальний обертальний момент на колесах помітно зростає. Система керування для досягнення максимальної віддачі постійно регулює співвідношення кожного потоку потужності.

*Четвертий:* гальмування, уповільнення. В результаті використання накопиченої кінетичної енергії починається обертання валу тягового електродвигуна, який в цьому режимі є генератором. Енергія, що виробляється, через перетворювач (регулятор), йде на зарядку акумулятора. Двигун внутрішнього згоряння не працює.

*П'ятий:* зарядка. Коли запас енергії в батареї зменшується, через двигун і генератор (під контролем системи керування) починається подача енергії в акумулятор.

Для успішної реалізації цільового проекту гібридного приводу є сенс розглянути класифікацію гібридних транспортних засобів.

Основною класифікаційною ознакою для цього є сенс використати показник їх „екологічної еволюції” від автомобіля до „чистого” електромобіля. Такий підхід найбільш коректний у випадку найпоширеніших на сьогодні комбінованих

транспортних засобів (КТЗ) з ДВЗ. Тому для більш повного висвітлення питання до основної класифікації включені й інші ТЗ, наприклад, такі, де в якості джерела живлення використовується: комбінація різних типів АБ, одна з яких має високу питому енергомісткість, а інша – низький внутрішній опір і високу питому потужність;

– комбінація АБ і сонячної батареї;

– комбінація батарей метал-повітряних елементів (МПЕ) або паливних елементів (ПЕ) та АБ;

– комбінація АБ і суперконденсаторів (іоністорів);

– комбінація кінетичного акумулятора енергії (КАЕ) і АБ або суперконденсаторів;

– комбінація декількох вищенаведених первинних джерел.

На рис. 2. показана класифікація транспортних засобів, до складу яких входять різні типи первинних джерел енергії. На рисунку прийняті такі позначення: АБ – акумуляторна батарея; С – батарея суперконденсаторів; КАЕ - Г – кінетичний акумулятор енергії з електрогенератором; МПЕ – батарея метал-повітряних елементів; ПЕ – батарея паливних елементів; СБ – сонячна батарея; КТЗ – комбіновані транспортні засоби; Г – електричний генератор; ЕМБ – електромобіль із бустерним пристроєм; КЕМ – комбінований електромобіль; КА – комбінований автомобіль; ЕБА – автомобіль з електричним бустером; А – автомобіль.

Як впливає з наведеної класифікації, транспортний засіб може створюватися з всілякими комбінаціями джерел енергії як електричної, так і теплової. Застосування тих чи інших типів джерел та їхня комбінація залежать від багатьох факторів: призначення транспортного засобу; заданих параметрів руху (довжини пробігу, максимальної швидкості, динамічних показників, крутості підйому, що долається, вантажопідйомності, терміну служби, первинної вартості джерела, експлуатаційних витрат, вимог до екологічності, простоти обслуговування та ін.)

Зазначимо, що напружений графік роботи традиційного автономного технологічного транспорту обумовлює інтенсивний розряд бортового джерела живлення (акумуляторної батареї) як у самому циклі робочої зміни, так і в цілому, тобто впродовж всього строку служби батареї. Така особливість, з одного боку, призводить до скорочення робочого ресурсу акумуляторів, а значить і самого транспорту у межах однієї зміни, а з другого – до значного зменшення таких важливих експлуатаційних показників батареї як її ємність та кількість зарядно-розрядних циклів внаслідок

природної деградації цих технічних показників у перебігу повсякденної експлуатації.

Основними складовими виконання умови суттєвого зменшення споживання бортових енергоресурсів, зокрема і рідкого палива, а також зменшення шкідливих викидів у атмосферу гібридним транспортним засобом є такі фактори: організація оптимального керування перерозподілом потоків енергії за допомогою електронних систем керування; вибір оптимальних параметрів складових компонентів такого транспортного засобу. Тому в першу чергу слід визначитися із стратегією керування такими системами [1-3].

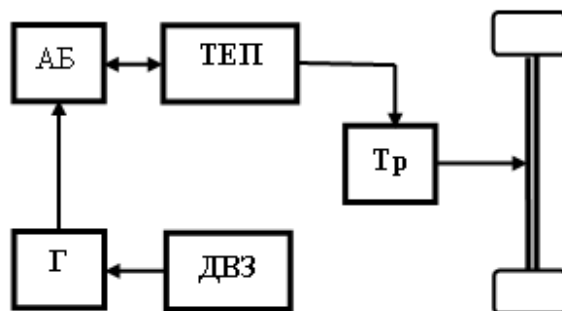
Серед усього розмаїття структур побудови автономних гібридних транспортних засобів [4] можна виділити три основних – послідовну (рис.1,а), паралельну (рис.1,б) та послідовно-паралельну (рис.1,в). Тут  $\Gamma$  – генератор; ТЕП – тяговий електропривод; РП – розподільювач потужності (моменту); Тр – трансмісія.

Для вибору способу керування для кожної структури слід зупинитися на такому показнику, як ступінь зарядженості батареї (СЗБ) – одному з найважливіших при побудові алгоритмів керування гібридним транспортним засобом [5]. Визначити СЗБ прямими вимірами неможливо. Знання величин поточних струму та напруги АБ не дають змоги достеменно визначити СЗБ. Важливе значення має температурний показник АБ, а для деяких лужних акумуляторів – час заряду. Тому сучасні системи керування гібридними приводами включають в себе мікропроцесорні блоки визначення СЗБ, в пам'ять яких заведені таблиці відповідності значень СЗБ показникам температури, поточних струму та напруги, а для деяких АБ – часу заряду. Ці таблиці отримують емпіричним шляхом (як правило на підприємствах-виробниках АБ) за допомогою великої кількості експериментів.

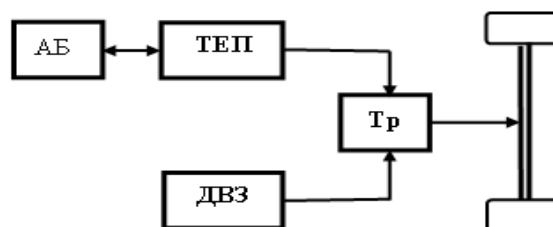
Визначивши поточні значення напруги, струму та температури АБ і порівнявши їх з таблицями відповідності, блок визначення СЗБ виводить його точне значення для подальшого використання у алгоритмі керування.

Найбільш важливим у цьому сенсі є визначення робочого діапазону зміни СЗБ (позначимо літерою D) під час руху. Величини  $D_{max}$  та  $D_{min}$  (максимальне та мінімальне значення СЗБ відповідно) визначаються на основі аналізу залежностей внутрішнього опору АБ в режимах розряду та заряду від СЗБ. Найбільш прийнятним діапазоном  $D_{min} \div D_{max}$  (як показали дослідження багатьох вчених [5, 6]) для послідовної структури побудови КТЗ як з точки зору навантаження АБ у режимі тяги, так і з точки зору максимального споживання енергії у режимі рекуперативного гальмування є діапазон від  $D_{min} = 0,5$  до  $D_{max} = 0,9$  (для кожної конкретної батареї цей

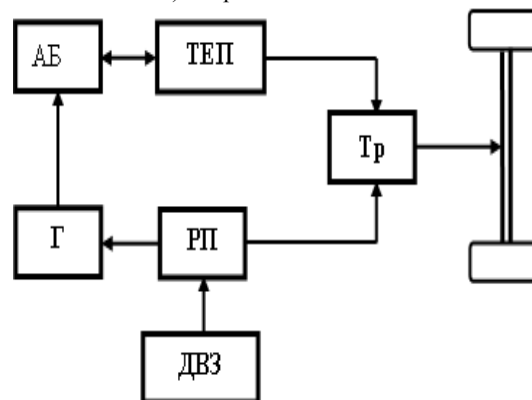
діапазон може дещо відрізнятись, але підхід залишається тим самим).



а). Послідовна схема;



б). Паралельна схема



в). Класифікація транспортних засобів:

Рис.1. Структура побудови автономних гібридних транспортних засобів

Перейдемо безпосередньо до розгляду способів керування гібридним приводом. Оскільки для автономного технологічного транспорту найбільш доцільна послідовна схема побудови приводу, то розглянемо саме її. Існує велика кількість підходів до вирішення задачі керування структурами такого типу.

Найбільш поширеними є, говорячи мовою оригіналу, “Thermostat control strategy (стратегія керування при стабільному тепловому режимі ДВЗ)” та “Power-Follower control strategy (стратегія керування при відслідковуванні потужності)” [7].

Обидва підходи побудовані на контролі стану заряду батареї. Суть першого з них полягає у тому, що коли значення СЗБ стає більшим за  $D_{max}$ , ДВЗ вмикається і рух реалізується у чисто електричному режимі (у міжнародній літературі прийнято називати "ZEV" - "Zero Emission Vehicle" – транспорт з нульовим викидом). Коли значення СЗБ стає меншим за значення  $D_{min}$ , ДВЗ вмикається і енергоустановка ДВЗ-Г виробляє постійну кількість енергії, яка не залежить від поточного навантаження та стану АБ. Перерозподіл енергії між зарядним перетворювачем АБ та ТЕП виконується відповідними блоками системи керування. У цьому випадку ДВЗ працює в оптимальному режимі (тут робоча точка роботи ДВЗ є найоптимальнішою з огляду на економію палива та шкідливі викиди) [8]. Однак зарядний перетворювач та АБ працюють не в оптимальному режимі. Крім того, можливе зниження СЗБ нижче мінімального значення, що призводить до зменшення строку служби АБ.

У другому способі ("Power-Follower control strategy") вихідна потужність ДВЗ-Г визначається циклом руху, а ДВЗ взагалі не вмикається. Крім того, тут відслідковується одне, наперед задане значення СЗБ ( $D_{зад}$ ). Перевагою такого підходу є оптимальний режим роботи АБ та зарядних пристроїв, а головним недоліком – не зовсім оптимальна робота ДВЗ, який мусить постійно "відслідковувати" зміну навантаження.

Найбільш раціональною є комбінація двох цих підходів до керування навіть за умови можливості виникнення режиму, коли  $D < D_{min}$ . Наведено в

таблиці такий спосіб керування в усіх можливих режимах руху гібридного транспортного засобу, оскільки він є оптимальним з точки зору використання і ДВЗ, і силового електрообладнання.

На закінчення позначимо ще одну важливу загальну проблему. Підвищення ефективності транспортних систем енергоживлення опосередковано сприймається як збільшення міжзарядного пробігу і може вирішуватись за декількома напрямками. До основних із них слід віднести поліпшення енергетичних показників компонентів та системи привода в цілому, організацію якомога повнішої утилізації (корисного використання) енергії машини, що гальмується, та впровадження методів і засобів керування, які забезпечують оптимальне (субоптимальне) регулювання енергообмінних процесів на системному рівні.

Для електромеханічних систем з напівпровідниковими перетворювачами ефективність характеризується значною кількістю факторів, з яких кожен окремо або у сукупності з іншими може розглядатись як цільовий критерій оптимізаційної задачі. До таких факторів слід віднести:

- коефіцієнт корисної дії, як найбільш загальний показник ефективності, а на системному рівні й сумісності компонентів, що дану систему складають;

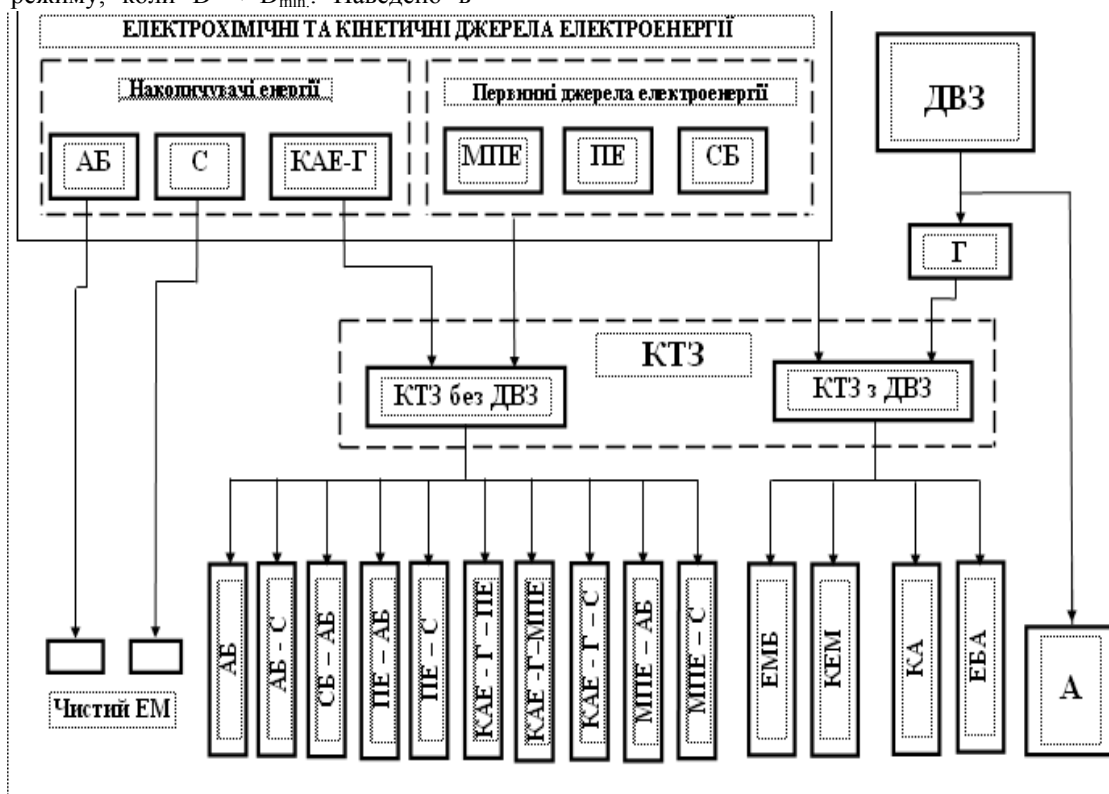


Рис.2. Класифікація транспортних засобів

### Алгоритм керування гібридним приводом послідовної структури побудови

Режим руху	Стан СЗБ	Напрямок передачі енергії
Старт	$D > D_{max}$	АБ → ТЕП; ДВЗ/Г –вимк.
	$D_{max} > D > D_{min}$	ДВЗ/Г + АБ → ТЕП
Прискорення (невелике навантаження)	$D > D_{max}$	АБ → ТЕП; ДВЗ/Г –вимк.
	$D_{max} > D > D_{min}$	ДВЗ/Г → ТЕП+ АБ
Прискорення (велике навантаження)	$D > D_{min}$	ДВЗ/Г + АБ → ТЕП
Рух з невеликою швидкістю	$D > D_{max}$	АБ → ТЕП; ДВЗ/Г –вимк.
	$D_{max} > D > D_{min}$	ДВЗ/Г → ТЕП+ АБ
Рух з великою швидкістю	$D > D_{min}$	ДВЗ/Г + АБ → ТЕП
Негайне гальмування	$D > D_{max}$	Механічні гальма
	$D_{max} > D > D_{min}$	Механічні гальма + рекуперация : ТЕП → АБ
Звичайне гальмування або рух з гори	$D > D_{max}$	Механічні гальма
	$D_{max} > D > D_{min}$	Рекуперация: ТЕП → АБ
Зупинка	$D > D_{max}$	ДВЗ/Г –вимк.
	$D_{max} > D > D_{min}$	ДВЗ/Г → АБ

–масогабаритні показники та рівень схемотехнічних та конструкторсько-технологічних рішень розробки;

– багатofункціональність окремих компонентів та системи в цілому (реверсивність, наявність рекуперативного режиму тощо);

– технічна надійність та строк служби силового і допоміжного електрообладнання;

– технологічність виготовлення, обслуговування та діагностики;

– загальна вартість та вартість експлуатаційних витрат.

Аналіз наведених факторів свідчить про тісний взаємозв'язок можливих критеріальних підходів, причому у ряді випадків таких, що взаємовиключаються. Так, реалізація деяких факторів, що мають за мету підвищення ефективності, може супроводжуватися негативними наслідками: погіршенням масогабаритних показників, збільшенням установленої потужності обладнання, зростанням вартості. Тому багатоскладність зв'язків між показниками ефективності являє вельми складну картину взаємовпливу окремих компонентів та їх параметрів, що суттєво ускладнює аналіз всієї сукупності факторів та вибір оптимального рішення для підвищення ефективності систем енергоживлення складних електромеханічних комплексів з перетворювачами електроенергії.

### Висновки

Поширення гібридних приводів на автономний технологічний електротранспорт є доцільним, а в ряді випадків і безальтернативним. Пошук ефективності транспортних приводів слід пов'язувати з системним ККД, що у найменшому степені суперечить розглянутим вище іншим факторам, оскільки забезпечення відносно великих значень ККД системи привода у довільних режимах її роботи мінімально впливає на наперед задані інші фактори, бо сама фізична сутність ККД передбачає співвідношення похідних показників технічних систем на рівнях, які близькі до оптимальних. Останнє зауваження слід розуміти таким чином, що забезпечення високих значень ККД систем енергоживлення не призведе до відчутного погіршення масогабаритних та надійнісних показників. А за умов вирішення задач підвищення ефективності систем приводів шляхом забезпечення останнім якомога більших значень ККД у довільних режимах тільки засобами (алгоритмами) керування, вартісні показники таких систем суттєво зменшаться у порівнянні з вартістю оптимізаційних заходів, де передбачається розробка і створення нових виробництв і технологій.

### Список літератури

1. Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания: / В.Н. Луканин, М.Г. Шатро, И.В.Алексеев. / Высшая школа. - М: 1995. - Т. 1: Теория рабочих процессов. - 369 с.

2. Сурин Е. И Анализ параметров комбинированой энергетической системы электромобил / Е.И. Сурин. *Машиностроитель*.–2000.–Ч.2.–С.15 – 17.
3. Гулянов Д.И. Особенности расчета гибридного электромобиля / Д.И. Гулянов. *Машиностроитель*.–1999.– Ч.10.–С.19–22.
4. Юрченко О.М. Метод визначення параметрів компонентів систем енергоживлення автономних комбінованих електротранспортних засобів // *Технічна електродинаміка. – Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”*/ О.М. Юрченко – 2006.- Ч. 2. – С. 111-115.
5. M. Ehsani, Y. Gao, A. Emadi, S. Gay. *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design* // CRS Press, Nov., - 2004. – USA.
6. Anderman, Menahem, Fritz Kalhammer, Donald MacArthur. *Advanced Batteries for Electric Vehicle* // *California Air Resources Board, June. – 2000.*
7. D. Assanis, G. Delagrammatikas, R. Fellini, ect. *An Optimization Approach to Hybrid Electric Propulsion System Design* // *The 21-st Worldwide Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition.- Monaco.- 2005.- P. 54-59.*
8. Юрченко О.М. Особливості роботи двигунів внутрішнього згоряння в складі комбінованих енергоустановок гібридних електромобілів:/ О.М. Юрченко. *Збірник наукових праць.- Чернігів: Чернігівський Державний технологічний університет, 2005. - № 25. - С.51 -61.*

Стаття надійшла до редколегії: 20.05.2010

**Рецензент:** к.т.н., доц. С.В. Іносов, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ.