

**О. І. Гула**

*Національний університет "Львівська політехніка"*

### **СТРУКТУРА ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГІБРИДНИХ РЕКУПЕРАТИВНИХ ПРИВОДІВ МІСЬКИХ АВТОБУСІВ**

*В роботі проаналізовано основні компоновальні схеми гібридних рекуперативних приводів, моделі вже існуючих автобусів згідно цих схем, а також можливі типи буферних накопичувачів енергії, їх переваги та недоліки. У висновку запропоновано концепцію гібридного рекуперативного приводу міського автобуса українського виробництва.*

*Ключові слова:* гібридний рекуперативний привід, послідовна схема, паралельна схема, літій-іонні акумулятори, суперконденсатори, рекуперация енергії.

*Рис. 2. Літ. 5.*

**О. И. Гула**

### **СТРУКТУРА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНЫХ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ПРИВОДОВ ГОРОДСКИХ АВТОБУСОВ**

*В работе проанализированы основные компоновочные схемы гибридных рекуперативных приводов, модели уже существующих автобусов согласно этих схем, а также возможные типы буферных накопителей энергии, их преимущества и недостатки. В заключении предложена концепция гибридного рекуперативного привода городского автобуса украинского производства.*

*Ключевые слова:* гибридный рекуперативный привод, последовательная схема, параллельная схема, литий-ионные аккумуляторы, суперконденсаторы, рекуперация энергии.

**O. Hula**

### **STRUCTURE AND COMPARATIVE ANALYSIS OF HYBRID RECUPERATIVE DRIVES OF CITY BUSES**

*The following article compares serial and parallel hybrid buses drive train. Road transport today is responsible for a significant and growing share of global emissions of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC. Advanced environmental regulations requires huge improving of road transport including city buses.*

*Hybridization of city buses fleet is one of the most available ways to decrease environmental pollution at the centre of major cities today. Nowadays both serial and parallel hybrid city buses are available on the market*

*The choice of energy storage system is also an important question. Currently most widespread energy storage system are Li-ion batteries and supercapacitors. Both of it has their advantages and disadvantages, that is why hybrid Li-ion-supercapacitors energy storage system gaining popularity.*

*Keywords:* hybrid recuperative drive, serial hybrid, parallel hybrid, li-ion batteries, supercapacitores.

**Постановка проблеми.** В сучасних умовах ефективного функціонування транспортного сектору вимагає постійного розвитку технологій. Створення транспорту з високою енергетичною ефективністю та мінімальним викидом шкідливих речовин у атмосферу є надзвичайно актуальним з огляду на існуючі проблеми екології та забезпеченості енергетичними ресурсами. Транспортний сектор використовує близько 25% світових енергетичних ресурсів і несе відповідальність за приблизно такий же розмір забруднення атмосфери. Зокрема це стосується і таких транспортних засобів як автобуси для здійснення міських перевезень.

На даний момент парк більшості українських автоперевізників складається з таких автобусів як Еталон, Богдан, Паз та ін. Останнім часом на ринку з'явилась значна кількість вживаних автобусів виробництва ЄС, в яких вже закінчився термін експлуатації у країнах Євросоюзу. Це автобуси таких виробників як Mercedes, MAN, Setra, Van Hool. Використання даних автобусів, на жаль, не відповідає світовим тенденціям щодо покращення екологічних показників міського автотранспорту.

Одним з найбільш економічно доцільних рішень на даний момент є використання на міських маршрутах автобусів з гібридним рекуперативним приводом. У міському циклі руху автобуса, особливо в великих містах, при різко змінному характері навантажень, частих зупинках, багатократних гальмуваннях, двигун автобуса працює далеко не в оптимальному режимі. Значна частина палива спалюється даремно, викиди в атмосферу чадного газу, двоокису вуглецю та інших шкідливих речовин і твердих частинок перевищують екологічні норми роботи транспортних засобів. Використання автобусів з гібридним рекуперативним приводом дозволяє суттєво підвищити енергетичну ефективність роботи автобуса, що, в свою чергу, дозволяє

понижити в 2-10 разів рівні викидів шкідливих речовин (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC і ін.) забезпечити економію палива в межах 20-50% в залежності від енергоефективності використання двигуна внутрішнього згорання та тягового електродвигуна, а також від типових циклів руху на даному маршруті.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження гібридного приводу в даний час є дуже актуальними, тому з'являється багато статей з даної тематики. Особливо цікавими є статті китайських вчених, які приділили багато уваги цій темі, оскільки проблеми забруднення повітря у китайських мегаполісах є такими, що потребують негайного вирішення.

**Мета статті.** Метою огляду і аналізу тенденцій розвитку міських гібридних автобусів є формулювання концепції гібридного рекуперативного приводу міського автобуса українського виробництва з використанням вітчизняних комплектуючих.

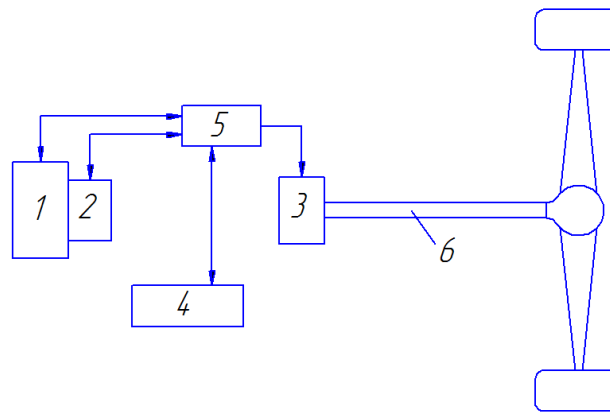
**Основні результати досліджень.** В основі міського автобуса з гібридним рекуперативним приводом лежить використання комбінованої енергоустановки. Вона полягає у використанні традиційного двигуна внутрішнього згорання або електрохімічного генератора на основі паливних елементів та буферного накопичувача електроенергії. Міські автобуси з гібридним рекуперативним приводом можуть бути створені за двома варіантами використання енергопотоків – послідовна схема та паралельна схема.

Варіанти послідовної схеми гібридного приводу наведені на рис.1. Застосування послідовної схеми комбінованої енергетичної установки дозволяє забезпечити роботу ДВЗ на режимі мінімальної витрати палива й викидів шкідливих речовин. Можна здійснити повністю стаціонарний режим роботи двигуна, що дозволить вмикати та вимикати двигун при необхідності. Тяговий електропривід у даній схемі повинен забезпечувати весь діапазон зміни потужності, необхідної для даних умов руху.

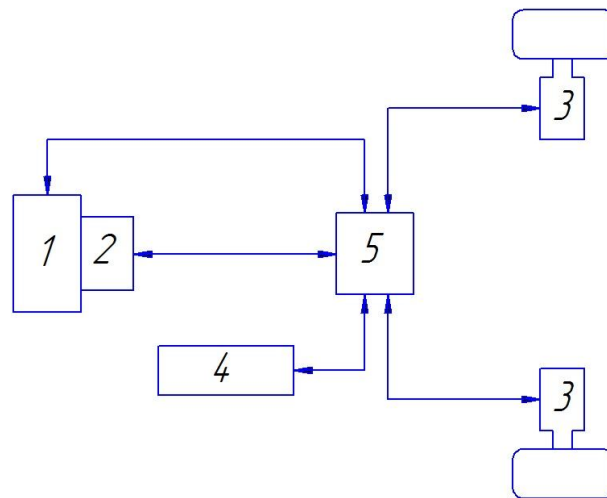
У послідовній схемі кінематичні зв'язки між ДВЗ і ведучими колесами принципово виключаються. Оскільки при цьому ДВЗ не може передавати момент до ведучих коліс, то потужність, яка передається в буферний накопичувач, повинна бути не менша, ніж середня потужність, необхідна для руху автобуса, а потужність й електромагнітний момент тягового електропривода повинні дорівнювати максимальній потужності й максимальному моменту рушіїв. Виключення із привода КП, зчеплення й карданного вала дозволяє істотно знизити обертові маси й загальну масу силового устаткування. Зниження моменту інерції впливає на процес нерівномірно-поступального руху машини. Значний вплив на момент інерції обертових мас робить передавальне число передачі. Оскільки коефіцієнт врахування обертових мас пов'язаний з передаточним числом КП квадратичною залежністю, то зі зменшенням передаточного числа суттєво знижуються умовна маса машини й необхідна для розгону потужність. З'являється можливість вільного компоунування: не пов'язані з колесами ДВЗ і мотор-генератор можуть розміщатися там, де це найбільше зручно.

Відсутність кінематичного зв'язку ДВЗ із ведучими колесами дозволяє по-новому підійти до проектування ДВЗ і мотор-генератора. У зв'язку із цим з'являється можливість створення вільнопоршневих (без колінчатого вала й кривошипно-шатунного механізму) ДВЗ і мотор-генераторів з лінійним переміщенням ротора.

Послідовна кінематична схема гібридних машин дозволяє застосовувати нові конструкторські рішення, нові компоунування. Послідовна схема дає можливість виключити диференціал, що затрудняє побудову якісної системи керування й погіршує керованість й прохідність автобуса. З'являється можливість виключення механічних редукторів, що зв'язують як ДВЗ із мотор-генератором, так і тяговий електропривід з ведучими колесами. У гібридному автобусі із мотор-колесами загальне зниження маси за рахунок виключення механічних вузлів, навіть із врахуванням додатково встановлюваних мотор-генератора й буферного накопичувача, може бути значним. Воно приводить до зменшення необхідної потужності ДВЗ і до додаткової економії палива. Економія, що досягається при цьому, може перекидати втрати, пов'язані з подвійним перетворенням енергії. Однак така схема використовується на автобусах середнього класу.



а

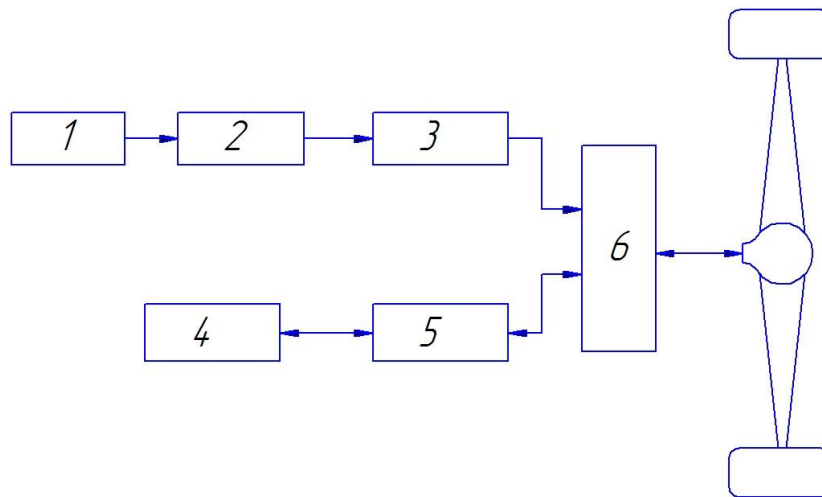


б

Рис. 1. Послідовна кінематична схема: а) з центральним тяговим електродвигуном; б) з мотор-колесами 1 - ДВЗ; 2 – мотор-генератор; 3 – тяговий електродвигун; 4 – акумуляторна батарея; 5 – система керування; 6 – карданна передача

Прикладами міських автобусів з послідовною схемою гібридного приводу є Mercedes-Benz Citaro G BlueTec Hybrid, Skoda N12 Hybrid, VDL Citea SLF-120/ hybrid, MAN Lion's City Hybrid, Van Hool A330 FuelCell Hybrid. Останній автобус використовує в якості джерела енергії електрохімічний генератор на основі водневих паливних елементів, що забезпечує нульовий рівень викидів у атмосферу. Варто також зазначити, що корпорацією Богдан був створений прототип гібридного автобуса А70522, однак у серійне виробництво він наразі не впроваджений.

У паралельній схемі як електропривід може використовуватися мотор-генератор, з'єднаний з колінчатим валом ДВЗ, що дозволяє вимкати ДВЗ при нетривалій зупинці автобуса і наступному пуску ДВЗ по команді водія почати рух. Принципова схема паралельного гібридного приводу зображена на рис. 2.



**Рис. 2. Паралельна кінематична схема 1 – ДВЗ; 2 – зчеплення; 3 – коробка передач; 4 – акумуляторна батарея; 5 – тяговий електродвигун; 6 – планетарний механізм розподілу потоку потужності**

Мотор-генератор доцільно використовувати не тільки для швидкого пуску ДВЗ, але й для створення електротяги при рушанні автобуса з місця. Причина цього очевидна: ДВЗ має високу паливну ефективність і малий рівень викидів шкідливих речовин лише в обмеженому діапазоні частот обертання, тому доцільно відбирати від нього потужність тільки після того, як машина вже набере деяку мінімальну швидкість. Мотор-генератор дозволяє "згладжувати" пульсації моменту, що розвиває ДВЗ (що сприятливо позначається на зниженні вібрацій), і збільшувати ресурс вузлів трансмісії.

До недавнього часу паралельна схема не була розповсюдженою на великих міських автобусах, оскільки вона не забезпечує такої свободи у питанні компонування автобуса, а використовувалась переважно на легкових автомобілях. Однак в останні роки набуває популярності і використовується виробниками значно частіше. Найновішими прикладами міських автобусів з такою схемою є Solaris Urbino 12 Hybrid, Solaris Urbino 18 Hybrid, Volvo 7900 Hybrid. Переключення виробників у бік паралельної схеми можна пояснити тим фактом, що вона дозволяє досягти дещо кращої енергоефективності шляхом оптимізації керування потоками енергії від двигуна та буферного накопичувача, оскільки при послідовній схемі втрати при подвійному перетворенні енергії є досить значними.

Компромісним варіантом також є вибір буферних накопичувачів енергії. Серед виробників гібридних автобусів найбільш поширеними є літій-іонні батареї (Solaris Urbino 12 Hybrid, Mercedes-Benz Citaro G BlueTec Hybrid), нікель-металгідридні (New Flyer DE40LF) та суперконденсатори (Skoda H12 Hybrid, Volvo 7900 Hybrid).

Сучасні Li-іон акумулятори мають високі питомі характеристики: 100-180 Втгод/кг і 250-400 Втгод/л. Робоча напруга - 3,5-3,7 В. Якщо ще кілька років тому розробники вважали досяжною ємність Li-іон акумуляторів не вище за декілька ампер-годин, то зараз більшість причин, що обмежують збільшення ємності, подолана, і багато виробників почали випускати акумулятори ємністю в сотні ампер-годин.

Сучасні малогабаритні акумулятори працездатні при струмах розряду до 2 З, потужніші - до 10-20 З. Інтервал робочих температур: від -20 до +60°C. Проте багато виробників вже розробили акумулятори, працездатні при -40°C. Можливе розширення температурного інтервалу в область вищих температур.

Саморозряд Li-іон акумуляторів складає 4-6 % за перший місяць, потім - істотно менше: за 12 місяців акумулятори втрачають 10-20% накопиченої ємності. Втрати ємності у Li-іон акумуляторів у декілька разів менше, ніж у нікель-кадмієвих акумуляторів, як при 20 °С, так і при 40 °С. Ресурс -500-1000 циклів.

Суперконденсатори мають дуже велику енергоемність і є батареєю конденсаторних елементів, розміщених у герметичному корпусі. Енергоемність нового джерела струму від 1 до 100 кДж при щільності енергії 0,5–2,5 Дж/см<sup>3</sup> залежно від застосування й конструктивного виконання. Номінальна напруга заряду батареї може бути в межах від одиниць до сотень вольтів шляхом послідовного набору необхідної кількості елементів. Ємність елементів перекидає

діапазон від 1 до 2000 Ф при мінімальній величині внутрішнього опору близько 0,001 Ом. Цих унікальних характеристик можна досягти тільки за допомогою нанотехнологій. Ємність сучасних суперконденсаторів і батарей на їх основі вже становить від одиниць до 10000 Ф. Вони мають ультратонкий подвійний електричний шар товщиною всього  $d \approx 1$  нм і гігантську площу розподілених у їх об'ємі дисперсних електродів. Як електродні матеріали в СК використовують пористі наноструктуровані речовини із внутрішньою поверхнею до 1000...3000 м/м. Переваги цього джерела енергії: значно менший час, необхідний на перезарядження, і на декілька порядків більша кількість циклів заряду-розряду.

Загальний рівень густини енергії літій-іонових акумуляторів високий, а густина їхньої потужності мала, тоді як у суперконденсаторів, навпаки, густина енергії мала, а густина потужності велика. Тому зараз можливе використання гібридного рішення – до літій-іонного акумулятора паралельно під'єднують суперконденсатор.

**Висновки.** Створення гібридного міського автобуса дозволить Україні бути готовою до впровадження у майбутньому на її території норм щодо викиду шкідливих речовин Євро-5 та наступних норм за рахунок оновлення транспортного парку за рахунок автобусів національного виробника, що в свою чергу сприятиме розвитку української економіки. На даний момент багато комплектуючих для гібридного автобуса в Україні не виробляється. Проте вже зараз харківським заводом "Електротяжмаш" створений тяговий асинхронний двигун АД903У1, який за своїми тяговими характеристиками підходить для використання на гібридному автобусі великого класу. В подальшому це може стимулювати українських виробників виготовляти накопичувачі енергії та системи керування.

Подальше вивчення даної тематики передбачає створення комп'ютерної моделі розрахунку енергетичного балансу руху гібридного автобуса та її оптимізації для конкретної моделі їздового циклу.

1. Rob de Jong, Max Ahman, Rogier Jacobs, Elisa Dumitrescu: Hybrid Electric Vehicles: And overview of current technology and its application in developing and transitional countries, UNEP, September 2009.
2. G.J. Offer, D.Howey, M. Contestabile, R. Clague, N.P. Brandon: Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system; Department Earth Science Engineering, Imperial College London, SW7 2AZ, United Kingdom, September 2009.
3. Frank Rinderknecht, Hans-Georg Herzog: Adaptation and optimization of a linear generator for a hybrid vehicle concept. EVS-25, Shenzhen, China, Nov. 5-9, 2010.
4. Yajuan Yang, Han Zhao and Hao Jiang: Drive Train Design and Modeling of a Parallel Diesel Hybrid Electric Bus Based on AVL/Cruise. EVS-25, Shenzhen, China, Nov. 5-9, 2010
5. Sigall, J. "Analysis of Alternative Fuel Technologies for New York City Transit Buses." New York City Transit Riders Council, Feb. 2000.

Стаття надійшла до редакції 25.06.2014.

Рецензент:

Крайник Л. В. – д.т.н., завідувач кафедри "Автомобілебудування" Національного університету "Львівська політехніка".