

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ТА ЕНЕРГЕТИЧНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

УДК 621.314

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

А.К. Шидловський, акад. НАН України, **В.Б. Павлов**, докт. техн. наук, **В.Є. Павленко**, **Д.О. Малахатка**

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна
e-mail: mobil@ied.org.ua

Розглянуто питання енергетичної ефективності комбінованих систем енергоживлення і на основі моделювання проведено порівняльний аналіз паралельної та послідовної систем при експлуатації електромобілів у європейському міському циклі UDC, який на цей час застосовується в Євросоюзі для оцінки економічності використання транспортних засобів у міській зоні. Бібл. 3, рис. 10, таблиця.

Ключові слова: електромобіль, комбінована система, моделювання, міський цикл руху, паливна економічність.

Аналіз світових тенденцій розвитку транспортних засобів показує, що головним завданням сучасного автомобілебудування на сьогоднішній день є вирішення екологічних проблем і проблеми зростання цін на традиційні види палива.

Одним з ефективних рішень щодо підвищення економії палива і зниження рівня викиду шкідливих речовин є застосування комбінованої (гібридної) енергетичної системи – гібридного приводу. Під гібридною енергоустановкою прийнято розуміти наявність на транспортному засобі двох або декількох джерел енергії – двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) і накопичувача енергії. Як показує практика, найбільш економічно і технічно доцільними є дизель-електричні енергоустановки.

Зазначимо, що розробниками сучасних комплектів тягового електрообладнання для транспорту з комбінованими енергоустановками використовуються кілька типових структурних підходів. Відповідно, системи тягового приводу для гібридних транспортних засобів (ГТЗ) за своєю конструкцією поділяються на послідовні, паралельні та комбіновані [3].

Послідовна кінематична схема гібридної енергетичної установки (рис. 1) виключає механічний зв'язок коліс з первинним джерелом енергії (наприклад, двигуна внутрішнього згорання). Двигун є джерелом енергії для генератора, який у свою чергу живить електродвигуни приводу коліс. Між генератором і електродвигуном (електродвигунами) приводу розташований накопичувач енергії (батарея акумуляторів або суперконденсаторів). Накопичувач акумулює надлишки виробленої генератором електроенергії, отримує енергію рекуперації при гальмуванні, забезпечує пікові навантаження на колесах. Схема дає змогу стабілізувати режим роботи первинного двигуна в області максимальної паливної ефективності й мінімальних викидів, виключити конструктивні елементи механічної передачі: коробки передач, вали, редуктори і т.п. Електрична схема також досить проста, може бути застосована як з ДВЗ, так і з альтернативними джерелами енергії (паливними елементами і т.п.).

Паралельна схема (рис. 2) забезпечує передачу енергії на колеса як від джерела механічної енергії (ДВЗ), так і паралельно від електродвигуна. При цьому накопичувач енергії працює так, як у послідовній схемі. Електродвигун компенсує нерівномірності роботи ДВЗ і недостатній момент, забезпечуючи плавність ходу і економію палива за рахунок енергії на-



Рис. 1

копичувача, отриманої при рекуперативному гальмуванні. При малих обертах можливий рух транспортного засобу тільки від електродвигуна з приєднанням до роботи ДВС при досягненні достатньої швидкості руху. Схема має відносно високий ККД і хороші масогабаритні показники, відносно недорога (застосовується електроустаткування тільки на частину повної потужності). Послідовна схема найбільш ефективна при русі транспортного засобу в режимі зі змінними навантаженнями. Використання паралельної схеми виправдано для транспортних засобів, що працюють на маршрутах з середньою і більш низькою інтенсивністю руху (у порівнянні з послідовною схемою). Паралельна схема може бути застосована тільки з двигунами з обертовим валом (ДВЗ) і не підходить для альтернативних джерел енергії.

Комбінована схема поєднує в собі переваги послідовної та паралельної схем за рахунок спеціального пристрою узгодження роботи ДВЗ і електродвигуна (наприклад, несиметричний планетарний диференціал). Пристрій узгодження дає змогу перерозподіляти потоки потужності між двома джерелами енергії (тепловий двигун і електричний накопичувач) і двома каналами передачі енергії на колеса (механічним і електромеханічним) і передавати потужність між ними в будь-якому напрямку. У такій схемі можлива робота як від одного джерела енергії (ДВЗ або накопичувач електроенергії), так і від двох одразу (ДВЗ і накопичувач), а обертання передається на колеса як механічним, так і електричним двигуном або тільки одним (будь-яким) з них.

Кожна з розглянутих структур має позитивні й негативні якісні показники, що впливають на доцільність застосування тієї чи іншої схеми. До них відносяться складність системи, ККД електричної частини, кількість шкідливих викидів, простота управління, вартість і т.д. Одним з важливих показників ефективності є рівень витрат органічного палива.

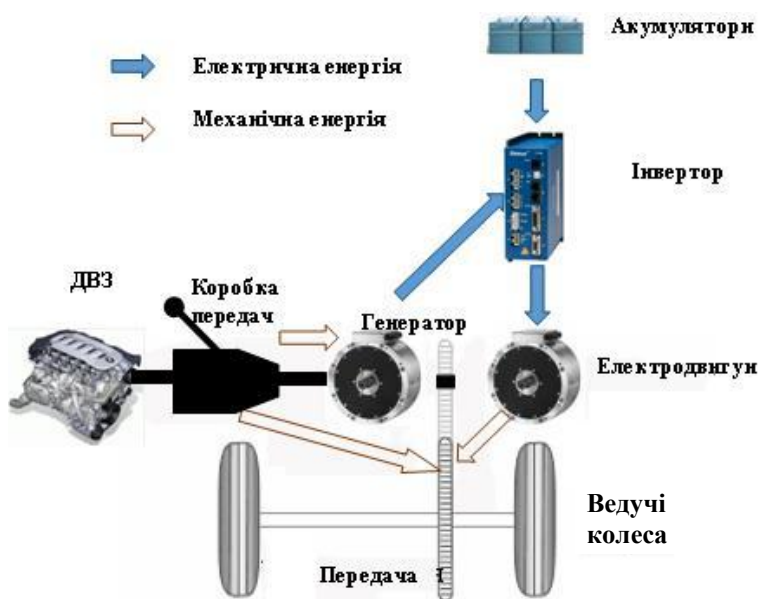


Рис. 2

Величина витрат палива при використанні розглянутих систем може бути визначальною при розгляді питання про застосування ГТЗ.

У роботі на основі моделювання проведено порівняльний аналіз паралельної і послідовної структур гібридних систем при експлуатації електромобілів в європейському міському циклі UDC (Urban Driving Cycle) (рис. 3), який на сьогоднішній день прийнятий в Євросоюзі для оцінки економічності використання транспортних засобів у місті.

Було розроблено імітаційні моделі паралельної і послідовної

гібридних трансмісій. Як силова установка використовувався дизельний двигун потужністю 150 к.с., маса автомобіля 1,7 т, яка не змінюється під час руху. У варіанті з паралельною схемою була застосована чотириступінчаста коробка передач [1].

Для реалізації моделі в середовищі Matlab Simulink були застосовані стандартні блоки бібліотек Simscape і Simpowersystems, які дали змогу змоделювати

електромагнітні процеси, які протікають у системі приводу автомобіля, і побудувати еквівалентні механічні передачі. Крім того, були розроблені власні блоки, що описують роботу ДВЗ, системи управління коробкою передач, системи управління тяговим електродвигуном, рекуперативного гальмування, системи стабілізації вихідної напруги тягового генератора.

Як зразок для порівняння спочатку було побудовано імітаційну модель транспортного засобу з механічною трансмісією (рис. 4).

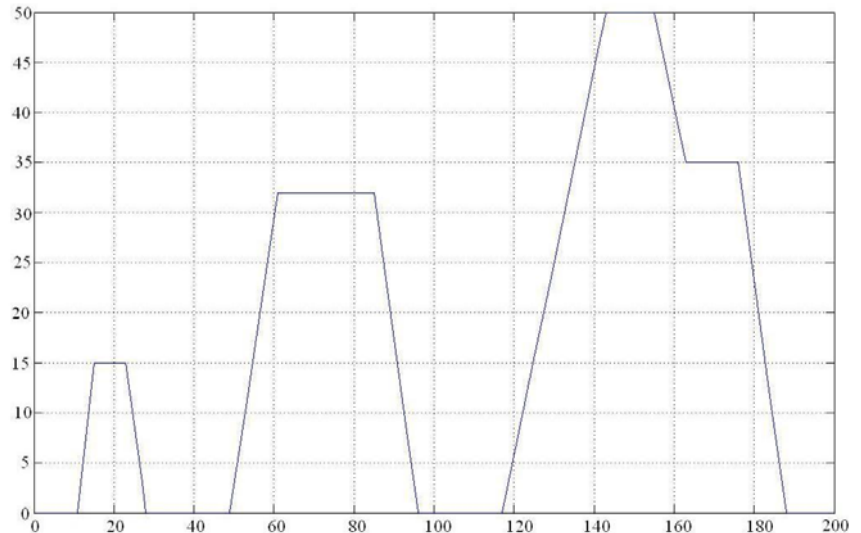


Рис. 3

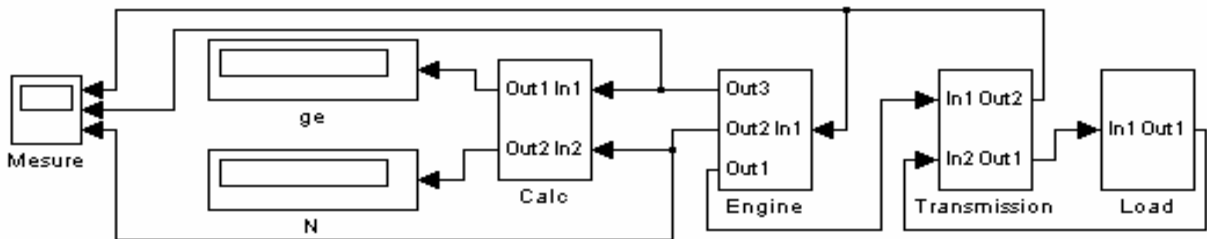


Рис. 4

На рис. 5 показано блок Engine, що моделює роботу ДВЗ. На вхід In 1 цього блока подається сигнал значення частоти обертання колінчастого вала (рад/с), отриманий з блока Transmission. Після підстановки даних значень у вираз залежності крутного моменту від частоти обертання колінчастого вала, описаного поліномом четвертого порядку (Polynomial),

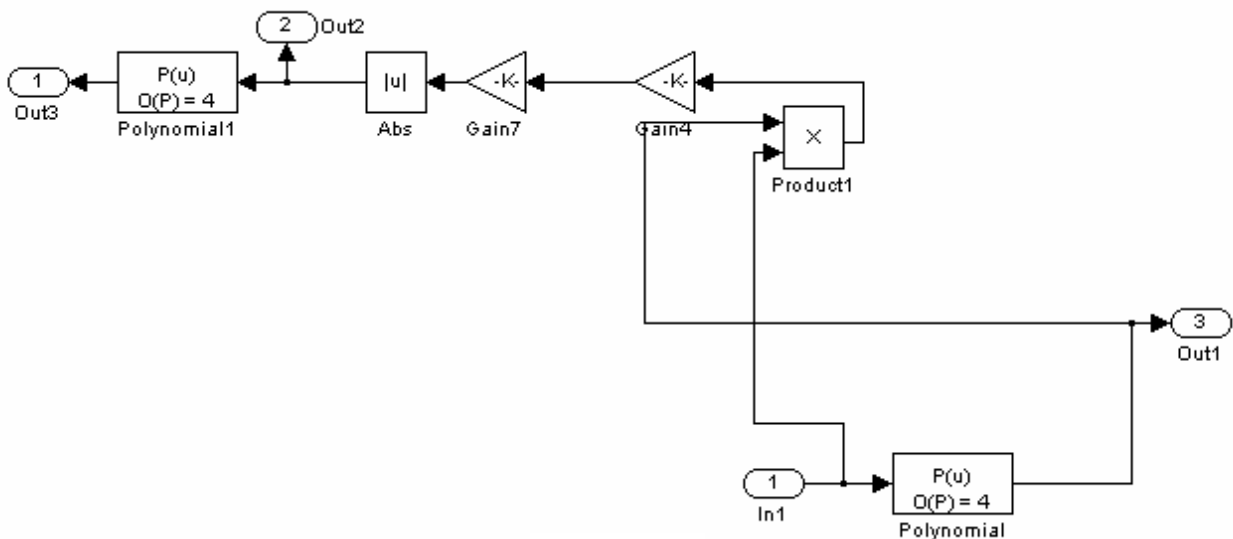


Рис. 5

який сформований на основі результатів стендових випробувань, отримуємо діючі значення крутного моменту (Н). Через порт Out1 значення крутного моменту ДВЗ повертаються до блоків, з яких надійшли значення частоти обертання колінчастого вала. Значення потужності (кВт) визначаються як множення моменту на частоту обертання, після чого, наведені до одиниць виміру в кінських силах, подаються через вихід Out 2 на блоки Measure і Calc.

Підставляючи їх у поліном четвертого порядку Polynomial 1, на підставі значень потужності отримуємо значення питомої витрати палива (г/к.с.-год), які через вихід Out 3 подаються на блоки Measure і Calc.

Блок Transmission, показаний на рис. 6, моделює роботу механічної частини трансмісії. Його побудовано з використанням стандартних компонентів бібліотеки Simscape/SimDriveline, елементи якої дають змогу моделювати процеси, що протікають у механічних передачах, включаючи взаємні перетворення частот обертання валів і крутних моментів, що передаються цими валами. За допомогою спеціальних блоків (Inertia, Driveline Environment, Initial Condition, Simple Gear) враховуються такі параметри: передавальне число зубчастої передачі, ККД передачі, момент інерції будь-якої ділянки передачі, коефіцієнти пружності та демпфірування елементів з можливим буксуванням.

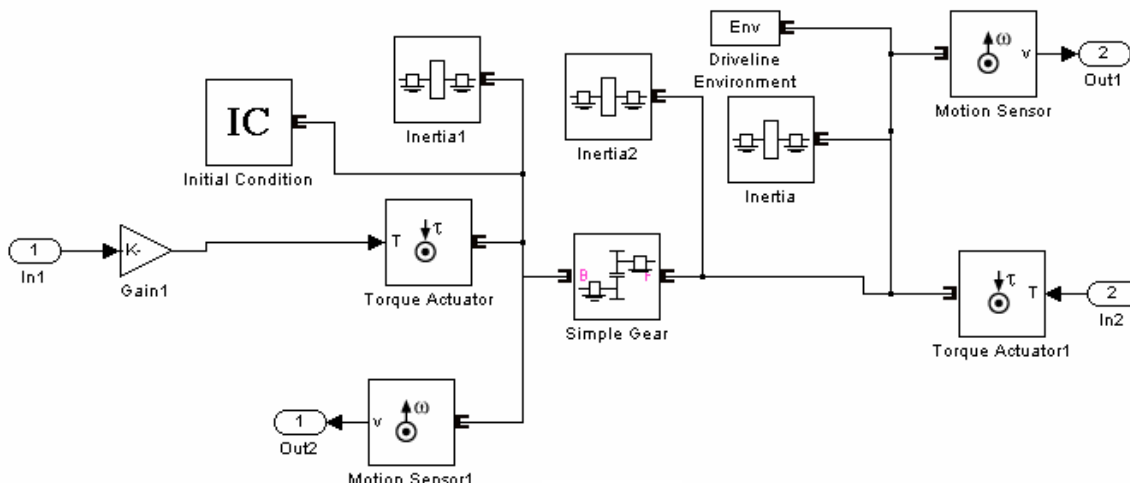


Рис. 6

На рис. 7 представлено блок Load, який задає момент опору руху транспортного засобу. Він є реалізацією формули моменту опору руху в середовищі Simulink. Залежність моменту опору від швидкості руху транспортного засобу реалізується за допомогою зворотного зв'язку з блоком Transmission за частотою обертання колеса. Сума моментів опору, що залежать і не залежать від швидкості руху машини, через порт Out 1 передається на блок Transmission.

Блок Calc розраховує середні значення потужності й питомої витрати палива і передає їх у відповідні вікна. Блок Measure формує графіки коливань частоти обертання колінчастого вала ДВС, його потужності й питомої витрати палива.

Таким чином, у цьому поданні математичної моделі реалізовано зворотні зв'язки, необхідні для розрахунків шуканих параметрів роботи ДВЗ.

Варіант послідовної гібридної трансмісії з генератором постійного струму і ТЕД постійного струму

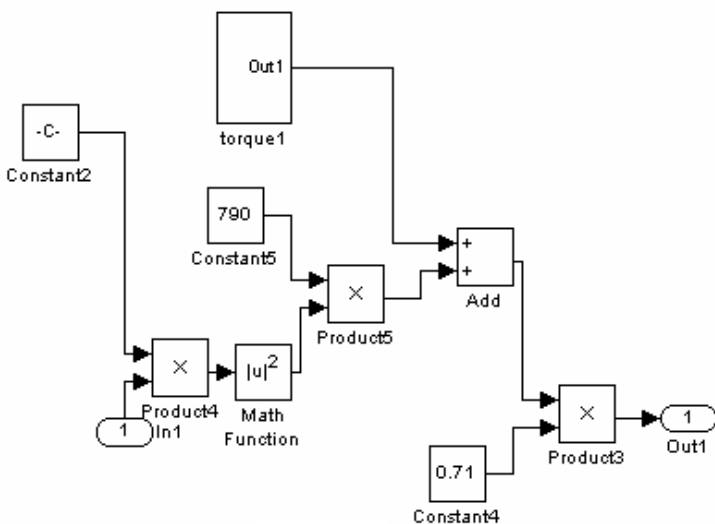


Рис. 7

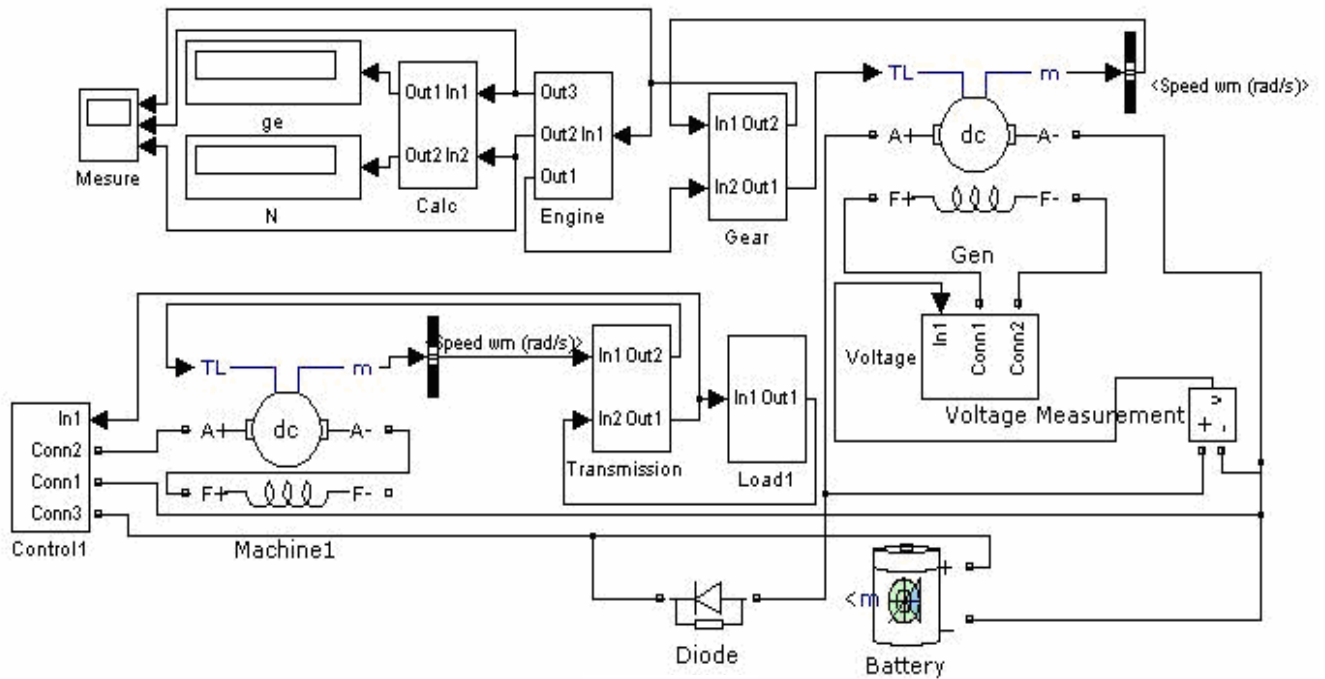


Рис. 8

послідовного збудження представлено на рис. 8. Тут показано, що крім блоків генератора (Gen) і ТЕД (Machine), які, по суті, є стандартним блоком DC Machine, додано декілька спеціальних блоків.

Блок Gear – моделює роботу редуктора, що передає крутний момент від ДВЗ до генератора постійного струму, і служить для узгодження частот обертання різних машин. По суті, це той же блок Transmission, але з більш простою механічною передачею.

Блок Voltage – моделює роботу системи стабілізації вихідної напруги генератора, побудованої на базі широтно-імпульсного регулятора.

Блок Control – моделює роботу системи управління ТЕД, побудованої на базі ШПР. Крім того, розглянутий блок дає змогу здійснювати стабілізацію швидкості руху машини, отримуючи дані від датчика частоти обертання колеса, розташованого в блоці Transmission.

У моделі паралельного гібриду (рис. 9) є тільки одна електрична машина, яка залежно від режиму руху транспортного засобу працює в генераторному або тяговому режимах. У блок Transmission було додано підсумовуючий редуктор, який побудовано за допомогою моделі механічного диференціалу і тому називається Transmission 1 [2].

Графіки процесів зміни обертів, потужності й питомої витрати палива ДВЗ представлено на рис. 10. З графіків видно, що коливання представлених параметрів у процесі руху транспортного засобу з електромеханічною трансмісією значно нижче, ніж з механічною. Трансмісія з комбінованою системою енергоживлення практично усу-

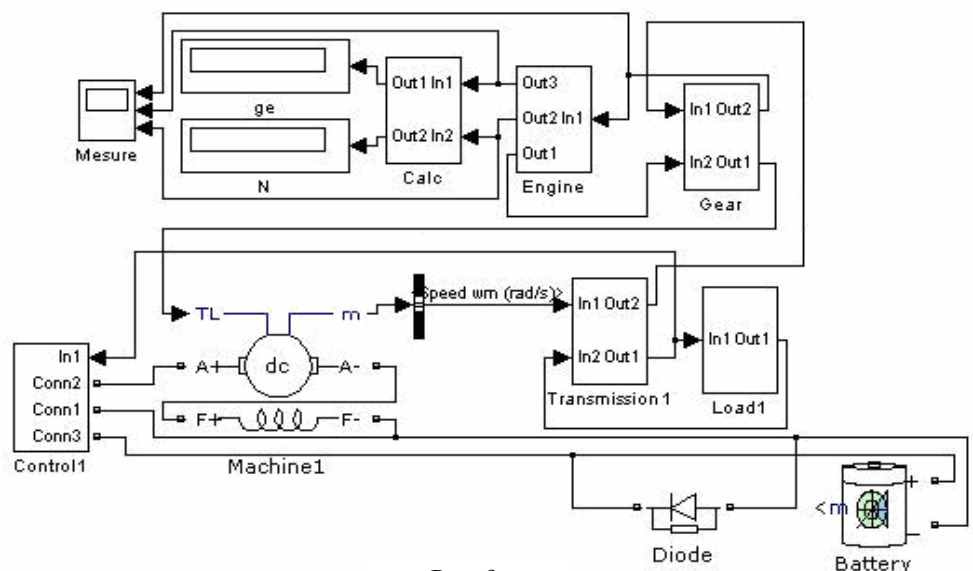


Рис. 9

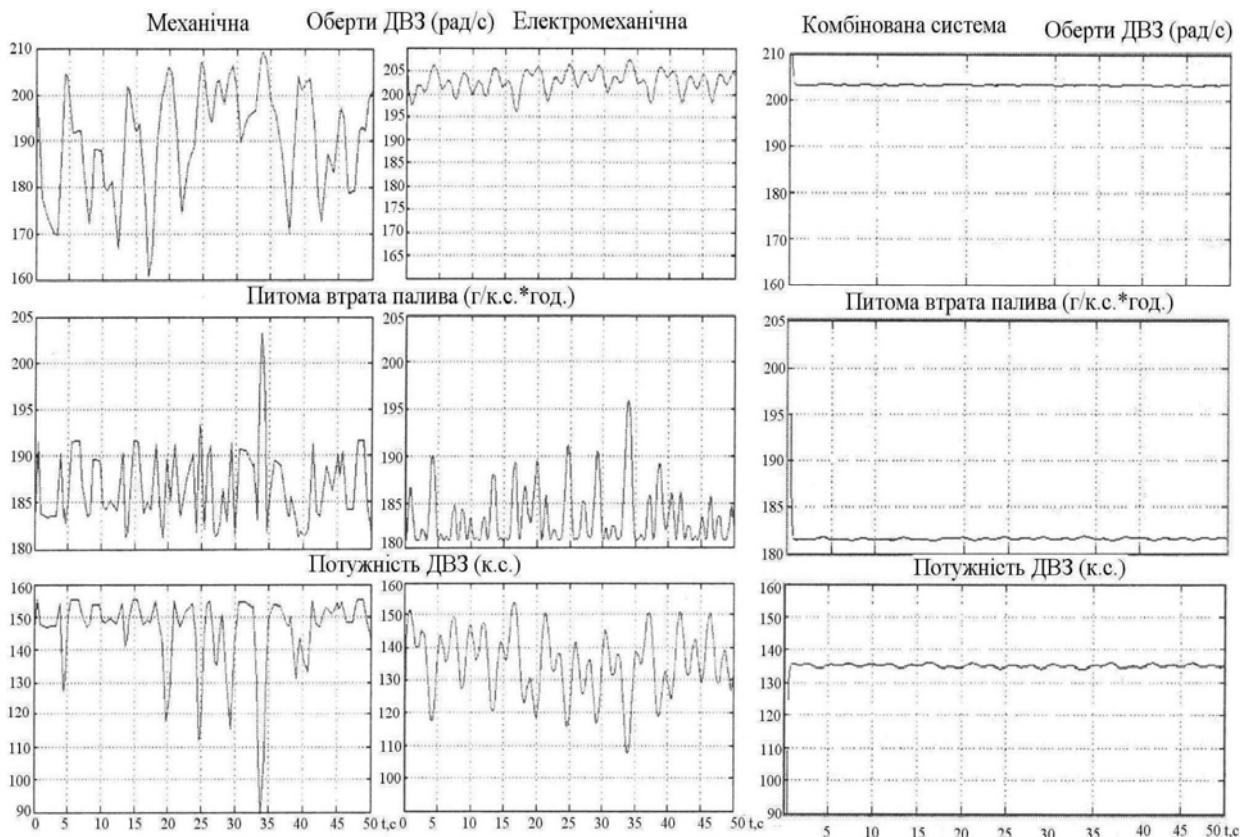


Рис. 10

ває коливання розглянутих параметрів, що тягне за собою зниження споживання органічного палива, поліпшення динамічних і ергономічних показників транспортного засобу.

У таблиці наведено дані миттєвої питомої витрати палива гібридних систем приводу автомобіля в міському циклі, які отримано в результаті моделювання. Враховуючи більш звичне уявлення даних витрат у літрах на кілометри, необхідно було здійснити відповідний перехід. Дані про питому витрату палива імпортувалися в Matlab у розроблену процедуру Converter, яка підсумувала миттєві значення витрати палива із заданою частотою, після чого отримане значення маси палива переводилося в обсяг і поділялося на відстань.

Трансмісія	A	B	C	D
Механічна	214	35	7,5	12,5
Послідовна	195	26	5,1	8,8
Паралельна	203	31	6,3	10,6

У таблиці: *A* – питома витрата пального (г/к.с.-год); *B* – середня потужність, розвинена ДВЗ (к.с.); *C* – годинна витрата пального (кг/год); *D* – витрати пального за пробігом (л/100 км).

З таблиці видно, що при такому режимі експлуатації послідовна схема гібридного приводу автомобіля споживає менше палива для виконання тієї ж роботи. Такий ефект був досягнутий завдяки тому, що при послідовній схемі ДВЗ працює при стабілізованих обертах з мінімальною питомою витратою палива, а при повному заряд батареї відключається зовсім.

Запропоновані результати моделювання підтверджуються експериментальними даними американських дослідників, які запустили на міські та приміські маршрути Нью-Джерсі автобуси з паралельною і послідовною гібридними трансмісіями. У своїх дослідженнях вони відзначають, що застосування послідовного приводу дало зменшення споживання палива на 25 %, тоді як паралельного – всього на 12 % [3].

1. Павлов В.Б., Третяк М.В. Моделювання електромеханічної трансмісії тягово-транспортного засобу сільськогосподарського призначення // Техн. електродинаміка, Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2012. – Ч. 1. – С. 140–143.
2. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Моделювання режимів роботи статичних синхронних компенсаторів реактивної потужності та фазоповоротних трансформаторних пристроїв для створення гнучких систем передачі змінним струмом // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 38. – С. 18–30.

3. Solero L.L. and Pomilio A. Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles // IEEE Trans. Power Electron. – Sep. 2005. – Vol. 20, No. 5. – P. 1007–1016.

УДК 621.314

А.К. Шидловский, акад. НАН України, **В.Б. Павлов**, докт.техн. наук, **В.Е. Павленко**, **Д.А. Малахатка**

Институт электродинамики НАН України,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

Моделирование и сравнительный анализ гибридных систем питания автономных электротранспортных средств

Рассмотрены вопросы энергетической эффективности комбинированных систем энергоснабжения и на основе моделирования проведен сравнительный анализ параллельной и последовательной систем при эксплуатации электромобилей в европейском городском цикле UDC, который в настоящее время применяется в Евросоюзе для оценки экономичности использования транспортных средств в городской зоне. Библи. 3, рис. 10, таблица.

Ключевые слова: электромобиль, комбинированная система, моделирование, городской цикл движения, топливная экономичность.

A.K. Shidlovskiy, V.B. Pavlov, V.E. Pavlenko, D.O. Malahatka

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Modelling and comparative analysis of hybrid power systems of autonomous electric vehicles

The aspects of energy efficiency of the combined power system as well as simulation-based comparative analysis of parallel and serial systems when operating electric vehicles in city cycle UDC, that commonly used in EU for evaluation of efficiency of the use of vehicles in urban areas, were considered. References 3, figures 10, table.

Key words: electric vehicle, hybrid system, modeling, urban driving cycle, fuel economy.

Надійшла 28.02.2017

Received 28.02.2017

УДК 621.74 : 537.84

**ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ
УНІВЕРСАЛЬНИХ ПЕРЕМІШУВАЧІВ РІДКОГО МЕТАЛУ**

О.І. Бондар, асп., **О.І. Глухенький**, канд. техн. наук, **Ю.М. Гориславец**, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: ugoris@ied.org.ua

Наведено результати моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів у системі "індуктор – рідкий метал" для універсального перемішувача рідкого металу з лінійним індуктором, який за рахунок почергового живлення одно- і багатofазним струмами спроможний створювати відповідно пульсуюче і біжуче магнітні поля. Визначено вплив основних параметрів такого перемішувача, якими є зазор між індуктором і рідким металом, число стрижнів (полюсів) та полюсне ділення індуктора, на ефективність електромагнітного перемішування рідкого металу у ванні плавильної печі. Показано, що у випадку однофазного живлення у ванні виникає двоконтурна вихрова течія рідкого металу, а при багатofазному живленні залежно від полюсного ділення та зазору може формуватися як дво-, так і одноконтурна течія. Надано рекомендації по конструктивному виконанню універсального перемішувача, який почергово створює одно- та двоконтурну течії, що дає змогу ефективно перемішувати рідкий метал у всьому об'ємі ванни печі. Библи. 5, рис. 6.

Ключові слова: електромагнітне перемішування, рідкий метал, індуктор, пульсуюче і біжуче магнітні поля, чисельне моделювання, конструктивні параметри.

У більшості плавильних печей, зокрема в печах для плавлення алюмінію, перемішування рідкого металу здійснюється переважно електромагнітним способом з застосуванням індукторів біжучого магнітного поля [5]. Відома пропозиція виконувати цю операцію за допомогою пульсуючого магнітного поля, яке створюється однофазним індуктором [2]. При розташуванні такого індуктора біля бічної стінки печі він створює в ній двоконтурну (в плані)