

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. А. Лобатюк, О. Б. Мокін, Б. І. Мокін**

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ  
ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ  
З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ  
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2019

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/521>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 519.87:[6293.03:62-83]

Л68

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 18.10.2018 р.)

Рецензенти:

О. М. Сінчук, доктор технічних наук, професор

В. В. Біліченко, доктор технічних наук, професор

**Лобатюк, В. А.**

Л68 Математичні моделі оптимального руху електромобілів з електроприводом постійного струму : монографія / В. А. Лобатюк, О. Б. Мокін, Б. І. Мокін. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 136 с.

ISBN 978-966-641-761-2

В монографії представлено розроблені авторами математичні моделі оптимального руху електромобілів з електроприводом постійного струму як дорогою, прокладеною на горизонтальній площині, так і на спусках та підйомах, за умов, що критерієм оптимізації є мінімум витрат електроенергії силової акумуляторної батареї.

Монографія розрахована на інженерно-технічних працівників СТО та студентів і аспірантів ЗВО, що спеціалізуються на розв'язанні задач математичного моделювання та оптимізації режимів роботи електромобілів.

УДК 519.87:[6293.03:62-83]

ISBN 978-966-641-761-2

© В. Лобатюк, О. Мокін, Б. Мокін, 2019

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ МОНОГРАФІЇ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	10
1.1 Аналіз перспектив витіснення автомобілів з двигунами внутрішнього згорання електромобілями.....	10
1.2 Аналіз сучасного стану електромобілебудування і характеристика електромобілів, що випускаються за кордоном та в Україні.....	13
1.3 Аналіз публікацій з теорії електромобілів та їх електроприводів .....	20
1.4 Доведення переваг використання в системах електропривода вантажних електромобілів електродвигунів постійного струму з послідовним збудженням .....	25
1.5 Висновки за матеріалами першого розділу та постановка задач дослідження .....	28
РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....	30
2.1 Базові математичні моделі динаміки електромобіля та їх приведення до безрозмірного вигляду .....	30
2.2 Синтез математичних моделей оптимального руху завантаженого електромобіля з електроприводом постійного струму .....	36
2.3 Ідентифікація математичних моделей оптимального руху завантаженого електромобіля з електроприводом постійного струму .....	42
2.4 Розроблення обчислювального методу для побудови траєкторій оптимального руху завантаженого електромобіля з електроприводом постійного струму .....	44
2.5 Синтез математичних моделей оптимального руху незавантаженого електромобіля з електроприводом постійного струму .....	51

2.6 Ідентифікація математичних моделей оптимального руху незавантаженого електромобіля з електроприводом постійного струму .....	57
2.7 Розроблення обчислювального методу для побудови траєкторій оптимального руху незавантаженого електромобіля з електроприводом постійного струму .....	58
2.8 Висновки за матеріалами другого розділу .....	62
<b>РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ГІБРИДНОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ВИКЛЮЧЕНОЮ СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....</b>	
<b>64</b>	
3.1 Порівняльна характеристика електромобілів та гібридних електромобілів з двигунами внутрішнього згорання .....	64
3.2 Декомпозиція задачі синтезу математичних моделей оптимального руху гібридного електромобіля .....	67
3.3 Базові математичні моделі динаміки гібридного електромобіля та їх приведення до безрозмірного вигляду .....	68
3.4 Синтез математичних моделей оптимального руху гібридного електромобіля з виключеною системою електропривода .....	75
3.5 Ідентифікація математичних моделей оптимального руху гібридного електромобіля з виключеною системою електропривода .....	79
3.6 Розроблення обчислювального методу для побудови траєкторій оптимального руху гібридного електромобіля з виключеною системою електропривода .....	81
3.7 Висновки за матеріалами третього розділу .....	96
<b>РОЗДІЛ 4 СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ГІБРИДНОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ В РЕЖИМІ ОДНОЧАСНОЇ РОБОТИ НА СПІЛЬНИЙ ВАЛ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТА ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ .....</b>	
<b>98</b>	
4.1 Характеристика умов, за яких в гібридному електромобілі на спільний вал повинні працювати одночасно і електропривод і двигун внутрішнього згорання .....	98

4.2 Синтез математичних моделей оптимального руху гібридного електромобіля з одночасною роботою-системи електропривода і двигуна внутрішнього згорання тягової установки.....	99
4.3 Ідентифікація математичних моделей та розробка обчислювального методу для побудови траєкторій оптимального руху гібридного електромобіля з одночасно включеними системою електропривода і двигуном внутрішнього згорання .....	103
4.4 Висновки за матеріалами четвертого розділу .....	105
<b>РОЗДІЛ 5 ІМІТАЦІЙНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЯК КЛАСИЧНОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ТАК І ГІБРИДНОГО .....</b>	<b>106</b>
5.1 Ідеологія імітаційного моделювання режимів оптимального руху електромобіля .....	106
5.2 Імітаційні моделі для оцінювання адекватності моделей оптимального руху електромобіля у горизонтальній площині, на спуск та на підйом .....	106
5.3 Імітаційна модель для оцінювання адекватності моделей оптимального руху гібридного електромобіля з виключеною системою електропривода .....	112
5.4 Імітаційна модель для оцінювання адекватності моделей оптимального руху на підйом завантаженого гібридного електромобіля з одночасною роботою на спільний вал системи електропривода та двигуна внутрішнього згорання.....	114
5.5 Моделювання процесів зміни струму якоря тягового електродвигуна та швидкості руху електромобіля, оптимальних за критерієм мінімуму витрат електроенергії акумуляторної батареї, з метою оцінки адекватності синтезованих моделей .....	115
5.6 Висновок за матеріалами п'ятого розділу .....	120
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>121</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>123</b>

## ВСТУП

У зв'язку зі зменшенням світових запасів нафти та боротьбою за енергонезалежність країн і намаганням зменшити негативний вплив автотранспорту на навколишнє природне середовище, автовиробники з кожним днем усе більше приділяють увагу розробці та удосконаленню електромобілів, тяговими установками в яких є системи електропривода, що живляться від акумуляторних батарей. Але нині електромобілі випускаються лише легкові, для створення сили тяги в яких достатньо задіяти асинхронні електродвигуни і для створення магнітного поля в яких достатньо малогабаритних конденсаторів. Однак коли дійде черга до створення вантажних електромобілів, то доведеться, очевидно, в якості тягових установок застосовувати електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням, котрі мають і тягові характеристики, кращі ніж асинхронні електродвигуни, і не потребують встановлення конденсаторів, котрі при значних потужностях асинхронних електродвигунів потребують місця на борту, не меншого від того, що займають силові акумулятори. Але і для тягових електроприводів на основі електродвигунів постійного струму, як і для тягових електроприводів на основі асинхронних електродвигунів, важливим аспектом їх режимів роботи є мінімізація витрат електроенергії акумуляторної батареї, адже чим менше електроенергії витратить електропривід електромобіля на подолання кожного кілометра дороги, тим далі може заїхати цей електромобіль після останньої підзарядки акумуляторної батареї.

Тому ідея оптимізації режимів роботи тягових установок електромобілів з електроприводом постійного струму, для реалізації якої необхідно попередньо розробити математичні моделі оптимального руху електромобіля та розробити обчислювальні методи для їх ідентифікації і реалізації є не лише актуальною, але і нагальною, оскільки уже почали випускатись електробуси з електричною тягою, створюваною електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням, і, фактично, тролейбуси, тяга в яких створюється теж електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням, також є підкласом електромобілів з тією лише різницею, що тяговий електропривод в них отримує електроенергію не від акумуляторної батареї, а від контактної електромережі.

А з огляду на те, що нині наряду з класичними електромобілями почали масово випускатись і гібридні електромобілі, тягові установки

яких окрім систем електропривода доповнені ще й двигунами внутрішнього згорання, то розв'язання задач синтезу моделей оптимального руху варто розповсюдити і на цей підклас електромобілів, що дозволить отримати моделі оптимального руху при усіх можливих варіантах компоновки силової установки електромобіля. Саме в такій постановці і розв'язувались задачі дослідження за цією тематикою, які проводились і продовжують проводитись на кафедрі «Відновлювальна енергетика та транспортні електричні системи і комплекси» Вінницького національного технічного університету. І цілком очевидно, що метою цього дослідження було збільшення запасів ходу електромобілів за рахунок мінімізації витрат електроенергії акумуляторних батарей, необхідної для забезпечення раціональних режимів роботи систем тягового електропривода цих електромобілів на кожному кілометрі дороги.

Для досягнення такої мети на різних етапах дослідження необхідно було розв'язати такі задачі:

- здійснити аналіз наукових робіт, присвячених теорії електромобілів та їх електроприводів, і дослідити та оцінити стан та характеристики сучасного електромобілебудування;

- показати, що при розробленні тягових установок вантажних електромобілів перевагу слід надавати системам електропривода постійного струму з електродвигунами послідовного збудження;

- здійснити синтез математичних моделей оптимального руху горизонтальною ділянкою дороги, на спуск і на підйом від зупинки до зупинки та розробити обчислювальні методи для ідентифікації цих моделей і побудови траєкторій оптимального руху електромобіля з електроприводом постійного струму за критерієм мінімуму витрат електроенергії акумулятора;

- здійснити синтез моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом постійного струму у міському транспортному потоці за критерієм мінімуму витрат енергії джерела живлення та розробити методи їх ідентифікації;

- здійснити синтез математичних моделей оптимального руху та розробити обчислювальні методи для побудови траєкторій оптимального руху гібридного електромобіля з одночасно включеними на спільний вал системою електропривода та двигуна внутрішнього згорання за критеріями мінімуму витрат енергії акумулятора, що живить систему електропривода, та мінімуму витрат пального для двигуна внутрішнього згорання;



– синтезувати систему керування електроприводом та двигуном внутрішнього згорання для реалізації моделей оптимального руху гібридного електромобіля;

– розробити імітаційну модель для перевірки синтезованих математичних моделей на адекватність;

– показати, що результати оптимізації, отримані для класичного електромобіля, можуть бути застосованими і для побудови траєкторій оптимального руху тролейбусів, які, хоч і отримують енергію з контактної електромережі, але теж, фактично, є підкласом електромобілів.

Тож об'єктом в нашому дослідженні є процеси в тяговій установці електромобіля при усіх можливих режимах її роботи, а предметом дослідження виступають математичні моделі оптимального руху електромобіля та методи їх ідентифікації і реалізації.

А в результаті дослідження було:

– доведено, що для систем тягового електропривода вантажних електромобілів необхідно використовувати електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням;

– вперше синтезовано математичні моделі оптимального руху електромобіля з системою тягового електропривода на основі електродвигунів постійного струму з послідовним збудженням за критерієм мінімуму витрат електроенергії силової акумуляторної батареї під час руху дорогою, що має горизонтальні ділянки, а також ділянки спуску і підйому;

– вперше здійснено синтез закону та системи керування оптимальним рухом електромобіля, що рухається у міському транспортному потоці зі змінною швидкістю, обумовленою знаками світлофорів та впливом транспортних засобів, що рухаються попереду, що дозволяє за будь якої швидкості автомобіля сформувати такий струм у якорі тягового електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням, який мінімізуватиме витрати енергії силового акумулятора;

– здійснено декомпозицію задачі оптимізації руху електромобіля, систему тягового електропривода якого доповнено двигуном внутрішнього згорання, що переводить цей електромобіль в підклас гібридних, за умови, що гібридний електромобіль рухається дорогою, яка крім горизонтальних ділянок містить спуски та підйоми, чим охоплюються всі можливі випадки організації руху гібридного електромобіля за оптимальними законами;

– запропоновано обчислювальні методи для ідентифікації моделей оптимального руху від зупинки до зупинки за заданий час гібридного



електромобіля з непрацюючою системою електропривода, та здійснено модифікацію цього методу, для випадку, коли досягнувши вказаного кінцевого пункту, гібридний електромобіль продовжує рух, що дозволяє визначати чисельні значення параметрів моделей оптимального руху за короткі проміжки часу;

– розроблені методи та система оптимального керування електромобілем, що рухається як без перешкод горизонтальною ділянкою дороги або на спуск чи підйом, так і у міському транспортному потоці зі змінною швидкістю, обумовленою знаками світлофорів та впливом транспортних засобів, що рухаються попереду, дозволяють при будь-якій швидкості електромобіля сформувати такий струм у якорі тягового електродвигуна постійного струму з послідовним збудженням, який мінімізуватиме витрати електроенергії акумуляторної батареї. А в разі доповнення електротехнічної тягової установки електромобіля двигуном внутрішнього згорання ці методи і система керування дозволяють забезпечити такі режими руху цього гібридного електромобіля, які не лише мінімізують витрати електроенергії силового акумулятора, але мінімізують і витрати пального для двигуна внутрішнього згорання. Оскільки математичні моделі руху електромобіля, оснащеного тяговими електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням, оптимальні за критерієм мінімуму витрат електроенергії силової акумуляторної батареї, легко адаптуються і на такий клас електромобілів, яким є тролейбуси, тяговими електродвигунами яких теж є електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням, з тією лише різницею, що при реалізації цих моделей оптимального руху досягається не мінімум витрат електроенергії силової акумуляторної батареї, а мінімум витрат електроенергії, яку споживає електропривод тролейбуса з контактної електричної мережі, то отримані в роботі результати знайдуть практичне застосування ще задовго до того, як вітчизняне електромобілебудування розпочне випуск вантажних електромобілів.

Основні результати, що викладені в цій монографії, отримані аспірантом В. А. Лобатюком в процесі його роботи над кандидатською дисертацією під час навчання в аспірантурі кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів Вінницького національного технічного університету, яку він виконував під науковим керівництвом професора цієї кафедри Б. І. Мокіна та використовуючи поради і настанови завідувача кафедри, професора О. Б. Мокіна.

## РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ МОНОГРАФІЇ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Аналіз перспектив витіснення автомобілів з двигунами внутрішнього згорання електромобілями

З моменту виникнення автомобілебудування розвивалось у трьох напрямках, пов'язаних з типом двигуна – в напрямку використання в автомобілі бензинового двигуна, в напрямку використання парового двигуна та в напрямку використання електродвигуна. Особлива зацікавленість у використанні в автомобілі в якості тягової установки електродвигуна, як показано в роботі [69], виникла в кінці XIX століття і охопила також початок XX століття. А першими країнами, які розпочали конструювати і виготовляти автомобілі з системою електропривода в якості тягової установки, котрі одразу ж отримали назву електромобілів, були Англія, Франція та США [67]. Тож початком виникнення електромобілебудування можна вважати 1834 рік, в якому Томасом Девенпортом було сконструйовано перший електромобіль з автономним живленням системи тягового електропривода від електричних батарей. Але в перспективі розвитку електромобілів автомобілебудівники повірили лише у 1899 році, коли електромобілем «Jamaïs Contenté», сконструйованим Камілем Женатці, було досягнуто швидкості руху у 100 км/год [67]. Але коротка дистанція автономного ходу перших електромобілів, яка не перевищувала 18 миль, та їх висока початкова вартість, а також швидке поліпшення характеристик двигунів внутрішнього згорання, розроблених в якості тягових установок для транспортних засобів, на фоні дешевизни видобутку нафти і вироблення нафтопродуктів, привели до того, що зацікавленість в розробці електромобілів у автомобілевиробників, в XX столітті різко згасла. Цьому сприяло і те, що автомобілі з двигунами внутрішнього згорання стали значно доступніші за ціною, а їх технічні характеристики стали задовольняти бажання автовласників. Одним з найяскравіших прикладів автомобіля того часу був Ford Model T. За проміжок часу 1908–1927 рр., було випущено 15 мільйонів таких автомобілів [59]. Цей автомобіль було обладнано чотирициліндровим двигуном з об'ємом у 2893 см<sup>3</sup>, а потужність і максимальна швидкість складали, відповідно, 20 к. с. та 72 км/год. Автомобілі з такими характеристиками, які з кожним роком поліпшувались, майже на 70 років домінували на ринку транспортних засобів, призупиняючи процес конструювання та виробництва електромобілів. І відродилась зацікавленість до електромобілів у автовиробників, лише починаючи з 70-х років минулого століття, у зв'язку з енергетичною кризою, обумовленою дефіцитом

нафти, та зацікавленістю всіх країн внести і свій вклад в розв'язання проблем захисту навколишнього середовища, адже саме електромобілі, працюючи з високим коефіцієнтом енергоефективності та вирівнюючи графіки навантаження енергосистем, одночасно забезпечували і нульовий рівень шкідливих викидів, і безшумність в процесі нормальної експлуатації. Проте, навіть в наш час все ще існує два вагомі недоліки, що перешкоджають масштабному розповсюдженню електромобілів – це обмежена дистанція руху та висока початкова вартість [68, 85]. Хоча вага цих недоліків з кожним роком зменшується, оскільки нині високими темпами розвиваються технології у цій сфері, цьому сприяють і політичні рішення органів управління багатьох країн, які бажають досягти енергонезалежності. А тому процес витіснення автомобілів з двигунами внутрішнього згорання електромобілями набуває ознак незворотності. Аби переконатись у цьому, розкриємо більш детально перспективи витіснення автомобілів з двигунами внутрішнього згорання електромобілями і проблеми, які при цьому виникатимуть.

Розділимо ці проблеми на два класи – технічні та еколого-політичні.

Щодо технічних аспектів, то почнемо наш аналіз з викладення основних переваг та недоліків електромобілів у порівнянні з транспортними засобами, що використовують в якості тягових установок двигуни внутрішнього згорання, які називатимемо звичайними автомобілями.

З технічної точки зору електромобілі порівняно зі звичайними автомобілями мають переваги, оскільки:

- середнє значення ККД електродвигуна складає 75–97 % [13], у той час, як середнє значення ККД двигуна внутрішнього згорання лише 25–46 % [57];

- електротехнічний комплекс електромобіля має більш просту конструкцію у порівнянні зі звичайним автомобілем, адже відпадає необхідність в перемиканні передач [91,92];

- електромобіль має більш плавний хід, адже для зміни швидкості використовує не дискретну коробку передач, а частоту обертання вала електродвигуна, яка змінюється плавно;

- за рахунок електромагнітного (рекуперативного) гальмування забезпечується підвищений термін використання деталей механічних гальм;

- може мати спрощену конструкцію повного приводу за рахунок використання мотор-коліс [100].

Що ж до основних переваг електромобілів з еколого-політичної точки зору, то:

– електромобіль є транспортним засобом з нульовим рівнем викиду забруднюючих речовин, що дозволяє використовувати їх в населених пунктах, не забруднюючи повітря і не отруюючи міське населення свинцем та іншими шкідливими викидами, характерними для звичайних автомобілів [69];

– практично повна відсутність шуму при роботі електромобіля дозволяє суттєво зменшити шумове навантаження на слух людей, що проживають поряд з автомобільними дорогами;

– завдяки відсутності паливної суміші в паливному баку та в трубопроводах суттєво меншою є вірогідність вибухів та пожеж в електромобілях при ДТП з їх участю;

– електромобілі при їх масовому застосуванні сприятимуть вирішенню проблеми з використанням надлишку електроенергії в електричних мережах в нічний час, адже саме в цей час можна здійснювати зарядку акумуляторних батарей;

– використання електромобілів є одним із факторів забезпечення енергонезалежності країни від нафтових монополій та країн нафтовиробників [109].

А що до недоліків електромобілів у порівнянні зі звичайними автомобілями, то з технічної точки зору вони такі:

– менша енергетична ємність акумуляторної батареї у порівнянні з ємністю баків з бензиновим чи дизельним паливом;

– більш тривалий час зарядки акумуляторної батареї у порівнянні з часом, що витрачається на заправку паливом звичайного автомобіля [105];

– обмежений пробіг більшості електромобілів на одному циклі зарядки акумуляторної батареї, що пов'язано з вагою встановлених акумуляторів та їх типом;

– для обігрівання салону в електромобілі необхідно виділяти частину енергії акумуляторної батареї, що призводить до зменшення пробігу електромобіля на одному циклі заряду батареї;

– наявність струмів саморозряду, які при недостатньому контролі за станом ізоляції електричних проводів можуть привести до загорання мастильних матеріалів та електромобіля в цілому.

Ну а основним недоліком електромобілів з еколого-політичної точки зору є проблема виробництва та утилізації акумуляторних батарей, які можуть містити шкідливі та отруйні компоненти: свинець, літій, кислоти та ін.

Варто звернути увагу також і на те, що з метою збільшення енергонезалежності та поліпшення стану навколишнього середовища, деякі країни вводять певні обмеження та стимули для переходу автовласників до використання електромобілів: наприклад, в Німеччині влада

планує до 2020 року збільшити кількість електромобілів до 1 мільйона шляхом виплат одноразових субсидій при купівлі електромобіля у розмірі 4 тис. євро, звільнення від транспортного податку власників на 10 років та виділення коштів автовиробникам на розвиток нових технологій, виділення коштів на побудову зарядної інфраструктури [76]. А влада Китаю розглядає можливість введення обов'язкових квот для виробників легкових авто. Це дозволить продавати нові електромобілі пропорційно до кількості проданих звичайних автомобілів. Схожі програми зі збільшення кількості електромобілів діють і в багатьох інших країнах, серед яких США, Велика Британія, Японія, Франція та інші.

Окремо заслуговує на увагу інформація про стимулювання ринку електромобілів на території України. Станом на сьогоднішній день: скасовано ввізне мито на електромобілі (раніше воно було на рівні 8 %) відповідно до Закону України: «Про внесення змін до Закону України «Про Митний тариф України щодо ввізного мита на електромобілі», скасовано додатковий імпорتنний збір у розмірі 5 %, звільнено операції з купівлі електромобілів від НДС та інші стимули.

Із викладеного вище випливає, що електромобілебудування нарощуватиме темпи і за ним майбутнє. А основним обмеженням на даний момент є висока початкова вартість акумуляторних батарей, особливо літійових, які мають більш високу енергетичну ємність порівняно з більш дешевими свинцевими. Але технічні рішення проблеми здешевлення вартості виготовлення акумуляторних батарей нарощуються чи не щотижня, а до її остаточного вирішення для якнайскорішого переходу автовласників на електромобілі в економічно розвинених державах широко впроваджується відшкодування державою певної частини вартості електромобіля при його придбанні.

## **1.2 Аналіз сучасного стану електромобілебудування і характеристика електромобілів, що випускаються за кордоном та в Україні**

Вище нами уже показано, що майбутнє в автобудуванні саме за електромобілями. Найбільші компанії-автовиробники уже досить активно працюють над розробкою та створенням сучасних електромобілів, які можуть в повній мірі задовольнити більшість автовласників та дати їм можливість поступово пересідати зі звичайних автомобілів з двигунами внутрішнього згорання на екологічно чисті електромобілі.

Щоб охарактеризувати сучасний стан в сфері електромобілебудування, спочатку покажемо, яка кількість електромобілів продавалась за останні роки, і в яких країнах вони найпопулярніші, а після того

уже проаналізуємо скільки електромобілів виробляється та які саме компанії-автовиробники їх створюють. Ці дані нами занесені у таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Кількість проданих електромобілів та частина від усього ринку [106, 107]

Роки Країна	Кількість проданих авто за рік, тис шт.		Частина від усього ринку автопродажу, %	
	2015 р.	2014 р.	2015 р.	2014 р.
США	410	291	0,66	0,72
Китай	258	83	0,84	0,23
Японія	126	108		1,06
Нідерланди	88	45	9,74	3,87
Норвегія	84	43	22,39	13,84
Франція	74	44	1,2	0,7
Великобританія	54	24	1,1	0,59

З таблиці 1.1 легко бачити, що в усіх перерахованих вище країнах в 2015 році порівняно з 2014 роком кількість проданих електромобілів суттєво збільшилась.

Проведемо аналіз основних характеристик електромобілів, які є найбільш популярними серійними електромобілями, а також розглянемо і електромобілі, що виробляються чи плануються до випуску в Україні.

Найбільш популярною маркою електромобіля в час написання монографії був електромобіль Tesla Model S. В таблиці 1.2 наведені основні характеристики цього електромобіля [105].

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики електромобіля Tesla Model S

Технічна характеристика	Значення
Маса авто, кг	2108
Тип АБ	Літій-іонна
Запас руху, км	426
Об'єм АБ, кВт год	85
Ресурс АБ, років/тис. км	7 / 160
Маса АБ, кг	450
Запас ходу від годинної зарядки від побутової мережі 220 В, км	50
Час повної зарядки на станції Tesla Supercharger, год	0,5
Тип двигуна	Трифазний, асинхронний
Максимальна швидкість, км/год	209
Потужність, к. с.	416



На рисунку 1.1 представлено зовнішній вигляд цього електромобіля. Варто зазначити що на даний момент цей електромобіль має найкращі показники по запасу ходу та розгону. Крім того компанія виробник активно будує автозарядні станції у місцях їх продажу. Цей електромобіль на час написання цієї монографії офіційно в Україні ще не продавався.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд електромобіля Tesla Model S

Наступним електромобілем, вартим уваги є електромобіль BMW і3, який є одним із найлегших серійних електромобілів, технічні характеристики якого представлені в таблиці 1.3 [104], а зовнішній вигляд цього електромобіля представлено на рисунку 1.2.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики електромобіля BMW і3.

Технічна характеристика	Значення
Маса авто, кг	1195
Тип АБ	Літій-іонна
Запас руху, км	128
Об'єм АБ, кВт год	22
Маса АБ, кг	150
Час повної зарядки від побутової мережі, год	8
Тип двигуна	Синхронний
Максимальна швидкість, км/год	150
Потужність, к. с.	170





Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд електромобіля BMW i3

Далі представлено електромобіль від такого потужного автовиробника як Хонда. Технічні характеристики електромобіля Honda Fit EV представлені в таблиці 1.4 [83], а зовнішній вигляд представлено на рисунку 1.3. Основною перевагою цього електромобіля є швидкість зарядки, яка здійснюється від нуля до максимального значення всього лише за 3 години.

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики електромобіля Honda Fit EV

Технічна характеристика	Значення
Маса авто, кг	1460
Тип АБ	Літій-іонна
Запас руху, км	122–198
Об'єм АБ, кВт год	20
Маса АБ, кг	150
Час повної зарядки від побутової мережі 220В, год	3
Тип двигуна	Синхронний, з постійним магнітом
Максимальна швидкість, км/год	130
Потужність, к. с.	123



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд електромобіля Honda Fit EV

Далі розглянемо представника американського автовиробника електромобіль Chevrolet Bolt EV, який був представлений на виставці Consumer Electronics Show в січні 2016 року і зовні нагадує звичайний паркетник, хоча по вазі він набагато легший за представників транспортних засобів з двигунами внутрішнього згорання. Технічні характеристики електромобіля Chevrolet Bolt EV представлені в таблиці 1.5 [72], а зовнішній вигляд представлено на рисунку 1.4.

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики електромобіля Chevrolet Bolt EV

Технічна характеристика	Значення
Маса авто, кг	1624
Тип АБ	Літій-іонна
Запас руху, км	300–320
Об'єм АБ, кВт год	60
Маса АБ, кг	435
Час повної зарядки від побутової мережі 220 В, год	9
Тип двигуна	Синхронний
Максимальна швидкість, км/год	145
Потужність, к. с.	204





Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд електромобіля Chevrolet Bolt EV

Останній із закордонних електромобілів, який ми розглянемо, є представником Німецької компанії Volkswagen, який побудований на базі моделі, що має найбільший ринок продаж у світі. Технічні характеристики електромобіля Volkswagen e-golf представлені в таблиці 1.6 [108], а зовнішній вигляд представлено на рисунку 1.5.

Таблиця 1.6 – Технічні характеристики електромобіля Volkswagen e-golf

Технічна характеристика	Значення
Маса авто, кг	1400
Тип АБ	Літій-іонна
Запас руху, км	190
Об'єм АБ, кВт год	24,2
Маса АБ, кг	320
Час повної зарядки від побутової мережі 220В, год	13
Тип двигуна	Синхронний
Максимальна швидкість, км/год	140
Потужність, к. с.	115

А для порівняння розглянемо електромобілі, що пропонуються українськими виробниками, з яких на час написання монографії можна виділити два типи. Перший – на базі ЗАЗ Ланос Пикап Dream motors. Все що відомо про нього – це те, що він має бути з запасом руху 250 км на одній зарядці, та що час до повної зарядки повинен не перевищувати 8 год. [74].



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд електромобіля Volkswagen e-golf

А другий тип – це нова повністю українська розробка – електромобіль Synchronous, що був представлений в Князівстві Монако 6 квітня 2016 року. Виробником є компанія Electric Marathon International. Дизайном займалася київська студія Prustrast, а асинхронний двигун має назву «Славянка». На даху цього електромобіля розміщені сонячні панелі. Технічні характеристики цього електромобіля представлені в таблиці 1.7 [103], а зовнішній вигляд представлено на рисунку 1.6.

Таблиця 1.7 – Технічні характеристики електромобіля Synchronous [78]

Технічна характеристика	Значення
Тип АБ	Літій-іонна
Запас руху, км	130–160
Тип двигуна	Асинхронний
Максимальна швидкість, км/год	60–70



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд електромобіля Synchronous

Підсумовуючи висловлене вище, можемо констатувати, що:

- світові компанії-автовиробники повністю перейшли на дорожчі, проте більш енергоємні, акумуляторні батареї;
- більшість електромобілів має запас ходу на одній зарядці в середньому 150 км, при цьому Chevrolet Bolt EV та Tesla s мають запас ходу на одній зарядці більше 300 км;
- максимальна швидкість в більшості електромобілів знаходиться в околі 150 км.

### **1.3 Аналіз публікацій з теорії електромобілів та їх електроприводів**

Оскільки ми уже показали, що електромобілі є перспективною альтернативою для звичайних автомобілів [69], то набуває актуальності аналіз публікацій з теорії створення електромобілів та дослідження режимів роботи їх систем тягового електропривода. Аналізуючи, ми будемо акцентувати увагу на структурі електромеханічного комплексу; синтезі математичних моделей динаміки електромобілів та математичних моделей їх систем тягового електропривода; джерелах енергії на основі акумуляторних батарей [102] та процесах їх зарядки [63] і вибору найкращого типу [64]; оптимізації процесів, що виникають в системах електропривода при різних режимах роботи електротехнічного комплексу та енергозабезпечення; створенні методів оптимізації руху та обчислювальних методів для побудови траєкторій оптимального руху електромобілів і тягових характеристик електроприводів, а також комп'ютерному моделюванні режимів електротехнічних комплексів електромобілів з використанням запропонованих математичних моделей [62, 63, 65, 78, 89].

Оцінка можливості використання тягових електродвигунів постійного струму послідовного збудження в електромобілях з регулятором швидкості обертання, а також оцінка тягових характеристик при різних режимах розглядається в роботі [62], в якій використано імітаційну модель електромобіля в платформі Matlab-Simulink; при цьому усі компоненти системи приводу, яка складається з двигуна, батареї, контролера електродвигуна і контролера батареї, були змодельовані з використанням їх математичних моделей. Всі результати моделювання виведені на графіки і проаналізовані. Умови крутного моменту і швидкості під час створення тягового зусилля і регенерації використані для визначення витрат енергії, продуктивності і ефективності електропривода. Результати саме цього дослідження у першу чергу підтве-



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров Е. Е. Электропривод системы топливоподачи дизеля 6 ТД / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Тематичний випуск 10. – Харків : ХНТУ, – 2001. – С. 218–219.
2. Андреев В. П. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
3. Артеменко А. Н. Характеристика методов диагностики и определения параметров машин постоянного тока // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2008. – Вип. 3/2008 (50), ч. 2. – С. 117–120.
4. Білухін Д. С. Функціональна схема уніфікованого регулятора напруги генераторів управління електрорухомого складу постійного струму // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ : Техніка. – 2006. – Випуск 66. – С. 150–152.
5. Бронштейн И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва : Наука, 1967. – 608 с.
6. Будников В. Н. Цифровой контроллер для управления тяговым двигателем электромотоцикла в условиях двухзонного режима функционирования / В. Н. Будников, О. Н. Синчук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХП», 2008. – Вип. 30. – С. 362–364.
7. Гнатюк А. В. Електробус на суперконденсаторах для міських перевезень / А. В. Гнатюк, Щ. В. Аргун, О. В. Бикова, О. В. Підгора // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – Харків : ХНАДУ, 2016. – Вип. 72. – С. 29–34.
8. Головач І. Р. Модель автомобільної генераторної установки з електронним регулятором напруги / І. Р. Головач, А. В. Маляр // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ : Техніка, 2006. – Випуск 66. – С. 199–200.
9. Далека В. Х. Аналіз режиму рекуперації електричної енергії на міському електротранспорті як складової ресурсозбереження // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХП», 2008. – Вип. 30. – С. 516–517.

10. Дрючин В. Г. Синтез регуляторов электропривода постоянного тока на базе интегрирующих фильтров / В. Г. Дрючин, Ю. П. Самчелеев, И. С. Шевченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – Вип. 30. – С. 248–250.

11. Карплюк Л. Ф. Вибір параметрів контуру обмеження пробуксовувань у тяговому механізмі / Л. Ф. Карплюк, О. Ю. Лозинський, В. І. Мороз // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Тематичний випуск 10. – Харків : ХНТУ, 2001. – С. 240–243.

12. Кибардин В. В. Робастное управление двигателем постоянного тока / В. В. Кибардин, А. А. Буралков, А. С. Тарлецкий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – Вип. 30. – С. 141.

13. Кислицын А. Л. Электрические машины постоянного тока : учебное пособие / А. Л. Кислицын. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 122 с.

14. Коцегуб П. Х. Выбор параметров и исследование астатических цифровых систем подчиненного регулирования скорости с наблюдателями состояния / П. Х. Коцегуб, Ю. В. Губарь, О. И. Толочко, В. Ю. Мариничев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : тематичний випуск 10. – Харків: ХНТУ, 2001. – С. 55–57.

15. Кутовой Ю. Н. К вопросу сравнения динамических режимов тяговых электроприводов с двигателями последовательного и независимого возбуждения / Ю. Н. Кутовой, П. М. Касторный // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : тематичний випуск 10. – Харків : ХНТУ, 2001. – С. 247–248.

16. Лозинський О. Ю. Системний підхід до задачі оптимізації електроприводів постійного струму / О. Ю. Лозинський, Б. Г. Бойчук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : тематичний випуск 10. – Харків : ХНТУ, 2001. – С. 143–144.

17. Мокін Б. І. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими електродвигу-



нами постійного струму : монографія / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 92 с.

18. Мокін Б. І. Математична модель кривої намагнічування електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням для задач оптимізації / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 1. – С. 45–47.

19. Мокін Б. І. Теорія автоматичного керування, методологія та практика оптимізації / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 210 с.

20. Мокін О. Б. Відносні моделі руху електричного транспортного засобу по горизонтальному прямолінійному відрізку колії / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 2. – С. 20–24.

21. Мокін О. Б. Декомпозиція задачі оптимального руху гібридного автомобіля / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк [Електронний ресурс] // XLV Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2016). Секція відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів : електронне наукове видання матеріалів конференції, м. Вінниця, 2016. – Режим доступу: <http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2016/paper/view/396/203>.

22. Мокін О. Б. Декомпозиція задачі оптимізації руху транспортного засобу з комбінованим приводом системи [Електронний ресурс] / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк, О. П. Кубрак // Наукові праці ВНТУ : електронне фахове видання. – 2015. – № 3. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/9/9>.

23. Мокін О. Б. Ідентифікація математичних моделей оптимального руху електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі / О. Б. Мокін, О. Д. Фолюшняк, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 1. – С. 107–110.

24. Мокін О. Б. Метод параметричної ідентифікації моделі оптимального струму електромобіля / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, О. Д. Фолюшняк / Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 89–92.

25. Мокін О. Б. Обчислювальний метод для ідентифікації моделей оптимального руху від зупинки до зупинки за заданий час гібридного автомобіля з непрацюючою системою електропривода / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6. – С. 43–51.

26. Мокін О. Б. Оптимізація руху електромобіля по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги за критерієм мінімум витрат енергії акумуляторної батареї / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, О. Д. Фолушняк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 2. – С. 96–100.

27. Мокін О. Б. Система оптимального руху керування електромобілем, що рухається у транспортному потоці / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016) : тези доповідей XIII Міжнародної конференції. – Вінниця : ВНТУ, ПП «Едельвейс», 2016. – С. 150–152.

28. Мокін О. Б. Метод та система оптимального керування електромобілем, що рухається у міському транспортному потоці / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 4. – С. 41–46.

29. Мокін О. Б. Моделі оптимального руху гібридного автомобіля у фазі створення тяги лише електроприводом / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк [Електронний ресурс] // XLV Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки. Секція відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів : електронне наукове видання матеріалів конференції, м. Вінниця, 2016. – Режим доступу: <http://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2016/paper/view/397/204>.

30. Мокін О. Б. Модифікація методу ідентифікації моделей оптимального руху гібридного автомобіля з непрацюючою системою електропривода для випадку, коли, досягнувши кінцевого пункту, автомобіль продовжує рух / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 1. – С. 65–73.

31. Мокін О. Б. Оптимізація руху гібридного автомобіля з непрацюючим двигуном внутрішнього згоряння / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк, О. П. Кубрак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 5. – С. 69–77.

32. Мокін О. Б. Оптимізація руху гібридного автомобіля з непрацюючою системою електропривода / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк, О. П. Кубрак [Електронний ресурс] // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2015. – № 4. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/453/451>.

33. Мокін О. Б. Оптимізація руху гібридного автомобіля з одночасно працюючими на спільний вал двигуном внутрішнього згорання та системою електропривода / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 33–37.

34. Мокін О. Б. Оптимізація руху завантаженого електромобіля з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги / О. Б. Мокін, О. Д. Фолюшняк, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 1. – С. 56–60.

35. Мокін О. Б. Оптимізація руху незавантаженого електромобіля з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги / О. Б. Мокін, О. Д. Фолюшняк, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 2. – С. 48–51.

36. Мокін О. Б. Синтез закону керування оптимальним рухом електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі [Електронний ресурс] / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, О. Д. Фолюшняк, В. А. Лобатюк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2014. – № 1. – С. 1–7. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/392/390>.

37. Мусаев З. Н. Применение одномашинной системы в бортовой сети электрооборудования / З. Н. Мусаев, С. А. Ханахмедова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2008. – Вип. 3/2008 (50), ч. 2. – С. 91–93.

38. Мхитарян А. М. Аэродинамика / А. М. Мхитарян. – Москва : Машиностроение, 1970. – 289 с.

39. Орловский И. А. Разработка моделей на нейронных сетях серийного двигателя постоянного тока по экспериментальным данным /

И. А. Орловский, И. В. Блохин, А. С. Смирнов // Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КДУ, 2010. – Вип. 3/2010 (62), ч. 1. – С. 153–156.

40. Павловський А. М. Теоретична механіка / М. А. Павловський. – Київ : Техніка, 2002. – 512 с.

41. Петров Ю. П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю. П. Петров. – Москва, Ленинград : Энергия, 1965. – 220 с.

42. Полилов Е. В. Энергосбережение и оптимизация потерь в позиционных электроприводах / Е. В. Полилов, А. Б. Зеленов, В. П. Яблонь, Д. И. Морозов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44), ч. 2. – С. 82–87.

43. Полищук П. И. Защита элементов контура преобразования электрической энергии в тяговых электрических приводах переменного тока / П. И. Полищук, И. О. Синчук, В. О. Черная // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХП», 2008. – Вип. 30. – С. 368–370.

44. Сахно В. П. Використання гібридної силової установки послідовного типу на міських автобусах / В. П. Сахно, О. М. Тімков, А. П. Луцик // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – Харків : ХНАДУ, 2016. – Вип. 74. – С. 41–44.

45. Синчук И. О. Анализ аномальных ситуаций в асинхронных тяговых электроприводах рудничных контактных электровозов / И. О. Синчук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : рб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХП», 2008. – Вип. 30. – С. 365–367.

46. Синчук О. Н. К вопросу оценки возможностей и эффективности различных видов электрического торможения промышленных электровозов / О. Н. Синчук, И. О. Синчук, С. Н. Якимец, О. С. Ключка // Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КДУ, 2010. – Вип. 4/2010 (63), ч. 2. – С. 41–44.

47. Синчук О. Н. Оценка электромагнитной совместимости тягового электропривода с импульсными преобразователями напряжения и контактной сети / О. Н. Синчук, И. О. Синчук, Д. Ю. Лозовой, А. В. Хараджян // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету : наукові праці КДПУ. – Кременчук : КДПУ, 2006. – Вип. 3/2006 (38), ч. 1. – С. 83–86.

48. Синчук О. Н. Сети Петри как аппарат для исследования аварийных режимов в тяговых электротехнических комплексах / О. Н. Синчук, В. О. Черная // Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КДУ, 2010. – Вип. 3/2010 (62), ч. 1. – С. 128–131.

49. Сінчук О. М. Поліпшення електромагнітної сумісності тягового електропривода постійного струму/ О. М. Сінчук, І. О. Сінчук, А. О. Чернишов, Д. Ю. Лозовий // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2007. – Вип. 4/2007 (45), ч. 1. – С. 62–66.

50. Сінчук О. М. Розробка алгоритму оптимального енергозберігаючого керування тягового електропривода транспортного засобу / О. М. Сінчук, Л. Б. Литвинський, К. І. Федорченко // Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КДУ, 2010. – Вип. 4/2010 (63), ч. 3. – С. 126–30.

51. Сінчук О. М. Тяговий електропривод постійного струму з покращеною електромагнітною сумісністю з мережею живлення / О. М. Сінчук, І. О. Сінчук, Д. Ю. Лозовий, О. В. Пасько // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ : Техніка. – 2006. – Випуск 66. – С. 260–262.

52. Слипченко Н. И. Определение оптимальной дальности пробега электромобиля с учетом его основных параметров / Н. И. Слипченко, В. А. Письменецкий, М. Ю. Гуртовой, В. О. Махлова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4, № 4 (64).

53. Соловьев В. А. Системы управления движением судна на основе нечеткой логики / В. А. Соловьев, И. В. Зайченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – Вип. 30. – С. 570–571.

54. Сулим А. А. Исследование процессов в системе динамического нагружения машины постоянного тока с электромеханическим накопителем в якорной цепи / А. А. Сулим, А. И. Ломоносов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2008. – Вип. 3/2008 (50) ч. 2. – С. 105–112.

55. Толочко О. И. Повышение точности цифрового интегрирования при реализации оптимальных алгоритмов управления позиционным приводом / О. И. Толочко, П. Х. Коцегуб, П. И. Розкаряка // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ : Техніка. – 2006. – Випуск 66. – С. 66–68.

56. Цепковский Ю. А. Адаптивный нейро фаззи регулятор скорости для двигателя постоянного тока на базе FPGA / Ю. А. Цепковский, А. Телеш // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – Вип. 30. – С. 564–567.

57. Шароглазов Б. А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов : учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания» / Б. А. Шароглазов, М. Ф. Фарафонов, В. В. Клементьев // Челябинск : Изд. ЮУрГУ, 2004. – 344 с.

58. Шевченко А. И. Улучшение динамики энергетической установки большегрузных автомобилей в режиме торможение / А. И. Шевченко, К. Е. Синев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : тематичний вип. 10. – Харків : ХНТУ, – 2001. – С. 207–209.

59. Шугуров Л. Жестянка Лиззи / Л. Шугуров // Моделист-Конструктор : журнал. – 1976. – № 12. – 29 с.

60. Юрченко О. Н. Синергетическая электромеханическая система с инерционным накопителем энергии для специализированных колесных видов транспорта / О. Н. Юрченко, В. Н. Будников, Н. А. Пинчук, О. А. Удовенко // Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КДУ, 2010. – Вип. 4/2010 (63), ч. 2. – С. 41–44.



61. Aden S. A survey of mathematics-based equivalent-circuit and electrochemical battery models for hybrid and electric vehicle simulation / S. Aden, D. Thanh-Son, J. McPhee // *Journal of Power Sources*. – 2014, 15 June. – V. 256. – P. 410–423.
62. Ajmia B. Optimal Control of Electric Vehicle Power Chain / B. Ajmia, S. Tounsi // *J. Automation & Systems Engineering*. – 2014. – No. 8-4. – P. 207–229.
63. Bambang K. Design and Development of Small Electric Vehicle Using MATLAB/SIMULINK / K. Bambang, M. Soebagio, P. Hery // *International Journal of Computer Applications*. – 2011, June. – V. 24, No.6. – P. 19–23.
64. Barréa A. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications / A. Barréa, B. Deguilhemb, S. Grolleaub, M. Gérardb // *Journal of Power Sources*. – 2013, November. – V. 241, No. 1. – P. 680–689.
65. Bitar Z. Modeling and Simulation of Series DC Motors in Electric Car / Z. Bitar, Al J. S. Samih, I. Khami // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 50. – P. 460–470.
66. Butler K. A Matlab-based Modeling and Simulation Package for Electric and Hybrid Electric Vehicle Design / K. L. Butler, M. Ehsani, P. Kamath // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 1999, Nov. – No. 48(6). – P. 1770–1778.
67. Caiying Shen A. Comprehensive Overview of Hybrid Electric Vehicles. / Caiying Shen, Peng Shan, Tao Gao // *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Vehicular Technology*. – Volume 2011, Article ID 571683, 7 p.
68. Chan C. C. Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling / Chan C. C., Bouscayrol Alain, Chen Keyu // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2010, Feb. – V. 59, Is. 2. – P. 589–598.
69. Chan C. C. Modern Electric Vehicle Technology / Chan C. C., Chau K. T. // *Oxford University Press Inc., New York*. – 2001. – 280 p.
70. Chan C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles // *Proceedings of the IEEE*. – 2002. – V. 90, Is. 2. – P. 247–275.
71. Chau K. T. Overview of power management in hybrid electric vehicle. *Energy Convers Manag* / Chau K. T., Wong Y. S. // *Energy Conver-*



sion and Management 43 (2002). Department of Electrical and Electronic Engineering, – The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, – P. 1953–1968.

72. Chevrolet Bolt ev. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.chevrolet.com/bolt-ev-electric-vehicle.html>.

73. Dao Thanh-Son Mathematics-Based Modeling of a Series-Hybrid Electric Vehicle / Dao Thanh-Son, Seaman Aden, McPhee John // 5th Asian Conference on Multibody Dynamics 2010 August 23–26, 2010, Kyoto, Japan.

74. DREAM motors. Доступний український електромобіль [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://na-starte.com/project/ukrainska-mriya>.

75. Esmailzadeh E. Dynamic modelling and analysis of a four motorized wheels electric vehicle / Esmailzadeh E., Vossoughi G., Goodarzi A. // Vehicle System Dynamics. – 2001. – V. 35, No. 3. – P. 163–194.

76. Farhan A. Sale modeling and control solutions for electric vehicles // European Scientific Journal. – 2013, May. – V. 9, No.15. – P. 221–240.

77. Fazal U. Syed Derivation and Experimental Validation of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle Model / Ming L. Kuang, John Czabay, Hao Ying // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2006, Nov. – V. 55, Is. 6. – P. 1731–1747.

78. Ferencey V. Mathematical modelling of the motion dynamics in the longitudinal direction of the electric vehicle / Viktor F., Omachelova V. // Cybernetics & Informatics (K&I), – 2016. – No. 2–5. – P. 1–6.

79. German gov't approves EV and plug-in hybrid incentives [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://europe.autonews.com/article/20160518/ANE/160519874/german-govt-approves-ev-and-plug-in-hybrid-incentives>.

80. Golbuff S. Optimization of a plug-in hybrid electric vehicle / Golbuff S. // Georgia Institute of Technology, 2006. – 91 p.

81. Gua W. B. The use of computer simulation in the evaluation of electric vehicle batteries / Gua W. B., Wanga C. Y., Liaw B. Y. // Journal of Power Sources. – 1998, 1 September. – V. 75, Is. 1. – P. 151–169.

82. Hedaya A. Control of DC Motor Using Different Control Strategies / Hedaya Alasooly // Power Control and Optimization: Proceedings of

the 3rd Global Conference on Power Control and Optimization. AIP Conference Proceedings, Volume 1239. AIP Conference Proceedings, V. 1239, Issue 1. – P. 111–119.

83. Honda Fit 2014 [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://automobiles.honda.com/fit-ev/specifications.aspx>.

84. Hori Yoichi Future Vehicle Driven by Electricity and Control – Research on Four-Wheel-Motored / Yoichi Hori // IEEE transactions on industrial electronics. – 2004, October. – V. 51, No. 5. – P. 954–962.

85. Husain I. Design, modeling and simulation of an electric vehicle system / Husain I, Islam M. S. // SAE Technical Paper No. 1999-01-1149;– 1999.

86. Kisilychnyk O. Concept of inverse dynamics problems for cascade speed control of direct current motors with field weakening / Kisilychnyk O., Pushkar M., Ostroverkhov M. // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДУ, 2010. – Вип. 3/2010 (62), ч. 1. – С. 11–14.

87. Larminie J. Electric Vehicle Technology Explained / Larminie J., Lowry J. – England : John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 283 p.

88. Lee W. Modelling and simulation of vehicle electric power system / Lee W., Choi D., Sunwoo M. // Journal of Power Sources. – 2002, 15 June. – V. 109, Is. 1. – P. 58–66.

89. Livint G. Control of Hybrid Electrical Vehicles / Livint G., Horga V., Rațoi M., Albu M. // Engineering. Vehicle Engineering. Electric Vehicles – Modelling and Simulations / edited by Soylu S. – 2011 September. – 66 p.

90. Markel T. ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling / Markel T., Brooker A., Hendricks T., Johnson V., Kelly K., Kramer B., Wipke K. // Journal of Power Sources. – 2002. – No. 110(2). P. 255–266.

91. Markel T. Plug-In Hybrid Electric Vehicle Energy Storage System Design / Markel T., Simpson A. // Presented at Advanced Automotive Battery Conference Baltimore, Maryland – May 17–19, 2006.

92. Miller John M. Hybrid Electric Vehicle Propulsion System Architectures of the e-CVT Type / Miller John M. // IEEE transactions on power electronics. – 2006, May. – V. 21, № 3

93. McDonald D. Electric Vehicle Drive Simulation with MATLAB/Simulink / D. McDonald // Paper presented at the Proceedings of the 2012 North-Central Section Conference, Ohio Northern University.

94. Mohd TA. T. Mathematical Modelling and Simulation of an Electric Vehicle using matlab-simulink / Mohd TA. T., Hassan M. K., Aziz WMK. A. // Conference: International Conference on Automotive Innovation and Green Energy Vehicle (AiGEV 2014), – August 26–27, 2014 Kuantan, Pahang, Malaysia. – P. 1–10.

95. Molnar J. Automatic measurement system in automobile based on internet / Molnar J., Bucko R., Bucko M. // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДУ, 2010. – Вип. 4/2010 (63), ч. 2. – С. 166–198.

96. Noga M. Application of the internal combustion engine as a range-extender for electric vehicles / Noga M. // Combustion Engines. – 2013. – No. 154(3). – P. 781–786.

97. Plug in Hybrid Electric Vehicle Control Strategy: Comparison between EV and Charge-Depleting Options / Sharer Phillip B., Rousseau Aymeric, Karbowski Dominik, Pagerit Sylvain // Argonne National Laboratory 2008 SAE International.

98. Poursamad A. Design of genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles / Poursamad A., Montazeri M. // Control Engineering Practice. – 2008, July. – V. 16, Is. 7. – P. 861–873.

99. Rousseau A. Plug-in Hybrid Electric Vehicle Control Strategy Parameter Optimization / Rousseau A., Pagerit S., Wenzhong Gao D. // Journal of Asian electric vehicles. – 2008. December. – V. 6, No. 2. – P. 1125–1133.

100. Sanjaka G. Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles / Sanjaka G., Wirasingha A. E. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2011, January. – V. 60, Is. 1. – P. 111–122.

101. Schaltz E. Electrical Vehicle Design and Modeling /. [Електронний ресурс] Electric Vehicles – Modelling and Simulations (2011), Seref Soylu (Ed.). – Режим доступу: <http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations/electrical-vehicle-design-and-modeling>.

102. Shengbo E. L. An electrochemistry-based impedance model for lithium-ion batteries / Shengbo E. L., Wanga B., Penga H., Hua X. // Journal of Power Sources. – 2014, 15 July. – V. 258. – P. 9–18.
103. Synchronous [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://synchronous-motors.com/>.
104. Technical data of BMW i3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/i/i3/2016/showroom/technical\\_data](http://www.bmw.com/com/en/newvehicles/i/i3/2016/showroom/technical_data).
105. Tesla Model S [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://www.tesla.com/models>.
106. Top 6 Plug-In Vehicle Adopting Countries – 2014 [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.hybridcars.com/top-6-plug-in-vehicle-adopting-countries-2014/>.
107. Top Six Plug-in Vehicle Adopting Countries – 2015 [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.hybridcars.com/top-six-plug-in-vehicle-adopting-countries-2015/>.
108. Volkswagen e-Golf [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://www.vw.com/models/e-golf/>.
109. Wenzhong D. Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles / Wenzhong D., Mi C., Emadi A. // University of Michigan Library. – 2007, April. – No. 4. – P. 729–745.
110. Yee-Pien Y. Optimal Design and Control of a Wheel Motor for Electric Passenger Cars/Yee-Pien Y., Su Chuang D. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2007, January. – V. 43, Is. 1. – P. 51–61.
111. Mokin O., Mokin B., Lobatyuk V., Sagymbekova A., Zyska T., Burlibay A., Orshubekov N. The synthesis of optimum current obtained by mathematical models for an electrically propelled truck drive electromotor [Synteza optymalnego prądu silnika elektrycznego wózka pojazdu ciężarowego za pomocą modeli matematycznych] DOI:10.15199/48.2017.03.18

*Наукове видання*

**Лобатюк Віталій Анатолійович**

**Мокін Олександр Борисович**

**Мокін Борис Іванович**

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ  
ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ  
З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено В. Лобатюком

Підписано до друку 29.03.2019 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 7,85.

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2019-08

Вінницький національний технічний університет,

ІРВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 65-18-06.

**press.vntu.edu.ua**; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.

21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/521>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>