

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. В. Горенюк

**Системний аналіз
оптимального руху електромобіля
з асинхронним електроприводом**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2023

УДК 531.31:621.86

М74

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від «28» вересня 2023 р.)

Рецензенти:

В.К. Титюк, доктор технічних наук, професор (КНУ)

А.П. Чорний, доктор технічних наук, професор (КрНТУ)

Мокін, Б. І.

М74 Системний аналіз оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом: монографія / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. В. Горенюк – Вінниця: ВНТУ, 2023. – 114 с.

ISBN 978-966-641-946-3

В монографії представлені результати системного дослідження руху електромобіля з тяговим асинхронним електроприводом горизонтальним відрізком дороги, на спуск та на підйом, оптимального за критерієм мінімуму витрат енергії силової акумуляторної батареї, а також руху на поворотах дороги, оптимального за модифікованими критеріями стійкості.

Розрахована на інженерів, науковців та студентів закладів вищої освіти, яким в процесі синтезу законів оптимального руху електромобіля з тяговим асинхронним електроприводом необхідно застосовувати методологію системного аналізу.

УДК 531.31:621.86

ISBN 978-966-641-946-3

© Б. Мокін, О. Мокін, В. Горенюк, 2023

Зміст

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПРАЦЬ, ПРИСВЯЧЕНИХ ВИБРАНОМУ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	8
1.1 Огляд публікацій, присвячених оцінюванню стану та перспективам розвитку електромобілебудування у світі та в Україні.....	8
1.2 Аналіз наукових праць, присвячених оцінюванню характеристик живлення електроприводів електромобілів та аналізу їх систем керування і комп'ютерного моделювання	22
1.3 Аналіз наукових праць, присвячених синтезу математичних моделей, що описують процеси руху електромобіля.....	33
1.4 Висновки за результатами огляду публікацій і аналізу наукових праць, присвячених вибраному об'єкту дослідження, та вибір предмета і методу дослідження.....	38
РОЗДІЛ 2 РЕАЛІЗАЦІЯ ПЕРШОГО ТА ДРУГОГО ЕТАПІВ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ВИБРАНОВОГО ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ	41
2.1 Мета і постановка задач на першому етапі системного аналізу предмета дослідження.....	41
2.2 Вибір та обґрунтування критеріїв оцінки результатів дослідження	43
2.3 Виділення предмета дослідження із зовнішнього середовища і визначення точок їх взаємодії на другому етапі системного аналізу.....	46
2.4 Вибір базових обмежень	47
РОЗДІЛ 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТРЕТЬОГО ЕТАПУ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ВИБРАНОВОГО ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ У ВИГЛЯДІ СИНТЕЗУ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНИМ ВІДРІЗКОМ ДОРОГИ, НА СПУСКАХ ТА НА ПІДЙОМАХ.....	50
3.1 Приведення базових обмежень та критеріїв оцінки результатів дослідження до безрозмірного вигляду	50
3.2 Синтез математичних моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом горизонтальним відрізком дороги.....	52

3.3 Ідентифікація математичних моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом горизонтальним відрізком дороги.....	57
3.4 Обчислювальний метод для визначення траєкторій оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом горизонтальним відрізком дороги.....	59
3.5 Синтез математичних моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом на спусках і на підйомах	61
РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ ЧЕТВЕРТОГО ЕТАПУ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ВИБРАНОГО ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ	68
4.1 Комп'ютерне моделювання оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом горизонтальним відрізком дороги.....	68
4.2 Комп'ютерне моделювання оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом на спуск та на підйом	77
4.3 Оцінка стійкості електромобіля з асинхронним електроприводом з використанням методу поєднання його кінематичної математичної моделі з динамічною.....	84
РОЗДІЛ 5 СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ВОДІЄМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА П'ЯТОМУ ЕТАПІ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ВИБРАНОГО ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	92
5.1 Висновки за результатами чотирьох етапів системного аналізу вибраного предмета дослідження.....	92
5.2 Структура системи підтримки прийняття рішень водієм електромобіля з асинхронним електроприводом	95
5.3 Перспективи впровадження системи підтримки прийняття рішень водієм електромобіля з асинхронним електроприводом	98
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	102

ВСТУП

Як відомо, кількість автомобілів у світі в усіх країнах щоденно і невинно зростає. А тому щоденно і невинно зростає забруднення навколишнього середовища продуктами згорання палива, що використовується в двигунах внутрішнього згорання, якими оснащена переважна більшість автомобілів.

І, як наслідок, атмосфера багатьох світових мегаполісів поступово перетворюється на непридатний для дихання смог, від якого страждають мільйони жителів цих мегаполісів, особливо чутливі з яких уже не можуть навіть покинути свою квартиру і вийти на вулицю без оснащеного фільтром респіратора.

А за межами мегаполісів забруднюючі викиди автомобільних двигунів внутрішнього згорання розносяться вітрами на усе більші площі земельних угідь, від чого зменшується врожайність цих земельних угідь і погіршується якість вирощеної на них сільськогосподарської продукції.

А одночасно зі збільшенням забруднення навколишнього середовища викиди автомобільних двигунів внутрішнього згорання збільшують масу парникових газів, які спричиняють підвищення температури земної атмосфери, що, у свою чергу, призводить до стрімкого танення арктичних та антарктичних льодовиків і підвищення температури та рівня океанів, наступ яких на низинні прибережні території за недовгий історичний відрізок часу позбавить місць проживання та роботи сотні мільйонів жителів Землі, а паралельно збільшуватимуться при цьому і площі пустель, що теж зменшуватиме придатний для життя і господарської діяльності ареал існування людства.

І у певній мірі призупинити цей невинний температурно-наростаючий забруднюючий потік можна лише відмовившись від використання двигунів внутрішнього згорання в колісних транспортних засобах, кількість яких, на чому варто наголосити ще раз, буде лише зростати.

Варто зазначити, що людство уже знайшло панацею від цієї біди у вигляді створення електричної тяги для колісних транспортних засобів усіх типів і класів, яка не створює викидів, що забруднюють атмосферу та підвищують її температуру, у вигляді електричних двигунів постійного та змінного струму

І першими колісними транспортними засобами з електричною тягою стали електровози, що потягнули за собою залізничними коліями десятки тисяч вагонів з різноманітними вантажами, та міські трамваї і тролейбуси, завдяки яким переважна кількість жителів мегаполісів долають відстані у своїх містах транспортними засобами з екологічно чистою тягою у вигляді електроприводів, для живлення яких електричним струмом від стаціонарних джерел його генерації використовуються струмопроводи у вигляді одно- і двопровідних тролей та струмознімачі у вигляді бугелів і штанг.

Але на вантажні та легкові автомобілі електричну тягу не встановлювали ще майже 100 останніх років, тому що бензин і солярка та природній газ, які спалюються у двигунах внутрішнього згорання, коштували дешево, забруднення їх викидами навколишнього середовища ще не викликало занепокоєння, а акумулятори електричної енергії, необхідної для функціонування тягових електроприводів транспортних засобів, що випускались серійно, ще були не в змозі забезпечити переміщення транспортних засобів з електричною тягою, які стали називати електромобілями, на відстань, більшу 100 кілометрів.

Але по мірі того, як удосконалювались автомобільні акумулятори електричної енергії в напрямку збільшення їх електричної ємності та зменшення габаритних розмірів, а також під впливом громадськості, що виявляла занепокоєння в усіх країнах світу з приводу забруднення навколишнього середовища викидами двигунів внутрішнього згорання, усе більше автомобільних фірм почали виробляти та вдосконалювати електромобілі з тяговими електродвигунами як постійного так і змінного струму. А коли за один заряд силової акумуляторної батареї електромобілі почали покривати відстань 500 кілометрів, їх виробництво і реалізація у торговій мережі набули масового характеру.

Однак багато питань стосовно теорії функціонування та режимів експлуатації електромобілів, особливо в напрямку мінімізації витрат електричної енергії силової акумуляторної батареї на подолання максимуму відстані, пройденої електромобілем за визначений термін часу, результати розв'язання яких суттєво відрізняються при використанні тягових електродвигунів постійного та змінного струму, викликають зацікавленість у дослідників і сьогодні. Тож не дивно, що ці питання зацікавили і нас – авторів цієї монографії, із чого випливає, що об'єктом нашого дослідження є процеси, що характеризують рух електромобіля дорогами, прокладеними на місцевості зі змінним ландшафтом.

Але перш ніж конкретизувати мету, предмет і задачі нашого дослідження, спочатку у першому розділі монографії здійснимо огляд наукових публікацій, присвячених тим результатам, які у цьому напрямку уже отримали інші дослідники.

А закінчити цей вступ ми хочемо інформацією про те, що значна частина результатів, викладених в даній монографії, вперше побачила світ у вигляді статей в наукових журналах [98]-[104], [110], [112]-[115], опублікованих її авторами за тематикою досліджень НДЛ «Автоматизованих систем управління в енергетиці і транспорті» Вінницького національного технічного університету, і вперше була узагальнена аспірантом В. В. Горенюком на сторінках його дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, яку він захистив у 2022 році і яку написав під час навчання в аспірантурі під науковим керівництвом професора Б. І. Мокіна та використовуючи при розв’язанні частини задач наукові консультації професора О. Б. Мокіна, що і обумовило наявність у монографії трьох співавторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Wikipedia contributors, "Motor vehicle," Wikipedia, The Free Encyclopedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_vehicle
- [2] International Energy Agency, "Global EV Outlook 2021," [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
- [3] International Energy Agency, "The Electric Vehicles Initiative (EVI)," [Online]. Available: <https://www.iea.org/programmes/electric-vehicles-initiative>
- [4] Trends and developments in electric light-duty vehicles. Electric cars had a record year in 2020, with Europe overtaking China as the biggest market. [Online] Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-and-developments-in-electric-vehicle-markets>
- [5] Global electric vehicle stock by region, 2010-2020. [Online] Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-vehicle-stock-by-region-2010-2020>
- [6] Stated Policies Scenario (STEPS). [Online] Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-model/stated-policies-scenario-steps>
- [7] Sustainable Development Scenario (SDS). [Online] Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-model/sustainable-development-scenario-sds>
- [8] World Energy Outlook. [Online] Available: <https://www.iea.org/topics/world-energy-outlook>
- [9] Energy Technology Perspectives. [Online] Available: <https://www.iea.org/topics/energy-technology-perspectives>
- [10] International Energy Agency (IEA). [Online] Available: <https://www.iea.org/>
- [11] The Paris Agreement, UNFCCC. [Online] Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [12] Global EV stock by mode in the Stated Policies Scenario, 2020-2030 [Online] Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-ev-stock-by-mode-in-the-stated-policies-scenario-2020-2030>
- [13] Global EV stock by mode in the Sustainable Development Scenario, 2020-2030. [Online] Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-ev-stock-by-mode-in-the-sustainable-development-scenario-2020-2030>

[14] Number of electric LDV chargers by scenario, 2020-2030. [Online] Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/number-of-electric-ldv-chargers-by-scenario-2020-2030>

[15] Cumulative installed charging power capacity for electric LDV chargers by scenario, 2020-2030. [Online] Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/cumulative-installed-charging-power-capacity-for-electric-ldv-chargers-by-scenario-2020-2030>

[16] CO₂ equivalents. [Online] Available: <https://www.myclimate.org/information/faq/faq-detail/what-are-co2-equivalents/>

[17] Our World in Data. CO₂ emissions by country. [Online] Available: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>

[18] Well-to-wheel principle. [Online] Available: <https://ecology.fandom.com/wiki/Well-to-wheel>

[19] Global EV outlook 2019. [Online] Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>

[20] Net and avoided well-to-wheel GHG emissions from the global electric vehicle fleet in the Stated Policies Scenario, 2020-2030. [Online] Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/net-and-avoided-well-to-wheel-ghg-emissions-from-the-global-electric-vehicle-fleet-in-the-stated-policies-scenario-2020-2030>

[21] Net and avoided well-to-wheel GHG emissions from the global EV fleet in the Sustainable Development Scenario, 2020-2030. [Online] Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/net-and-avoided-well-to-wheel-ghg-emissions-from-the-global-ev-fleet-in-the-sustainable-development-scenario-2020-2030>

[22] Electric car use by country. [Online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country

[23] Tesla, Inc. [Online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla,_Inc

[24] Electric car. [Online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car

[25] Tesla Model 3. Official site. [Online] Available: <https://www.tesla.com/model3>

[26] Tesla Model 3 owner's manual. [Online] Available: https://www.tesla.com/sites/default/files/model_3_owners_manual_north_america_en.pdf

[27] Tesla model 3 [Online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_3

[28] Технічні характеристики Tesla model 3 [Онлайн] Режим доступу:

https://evcompare.io/ru/cars/tesla/tesla_model_3_long_range_awd_performance/

[29] Електромобіль Tesla Model 3 [Онлайн] Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_3

[30] Nissan Leaf. Офіційний сайт. [Онлайн] Режим доступу: <https://www.nissan.ua/vehicles/new-vehicles/leaf.html>

[31] Nissan Leaf e+ brochure. [Online] Available: https://www.howardsgroup.co.uk/assets/media/nissan_leaf_brochure13062017-131035.pdf

[32] Технічні характеристики Nissan Leaf e+. [Онлайн] Режим доступу: https://evcompare.io/ru/cars/nissan/nissan_leaf_2010-2012/

[33] Electric vehicle database: Nissan Leaf e+. [Online] Available: <https://ev-database.org/car/1144/Nissan-Leaf-eplus>

[34] Toyota RAV4 EV. Official site. [Online] Available: <https://www.toyota.com/rav4ev/>

[35] Електромобіль Toyota RAV4 EV II. [Онлайн] Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_RAV4_EV

[36] Toyota RAV4 EV II technical specifications. [Online] Available: <https://techinfo.toyota.com/techInfoPortal/staticcontent/en/techinfo/html/prelogin/docs/rav4evdismant2nd.pdf>

[37] Toyota RAV4 EV II owner's manual. [Online] Available: <https://cdn.group.renault.com/ren/ie/transversal-assets/brochures/zoe-brochure-may.pdf.asset.pdf/43e5e9dc28.pdf>

[38] Технічні характеристики Toyota RAV4 EV II. [Онлайн] Режим доступу: https://evcompare.io/ru/cars/toyota/toyota_rav4_ev_2012-2014/

[39] Audi e-tron 55 quattro. Офіційний сайт. [Онлайн] Режим доступу: <https://www.audi.ua/ua/e-tron/e-tron/about>

[40] Electric vehicle database: Audi e-tron 55 quattro. [Online] Available: <https://ev-database.org/car/1092/Audi-e-tron-55-quattro>

[41] Audi e-tron 55 quattro technical data. [Online] Available: [http://d3d6mf6ofxeve.cloudfront.net/wieckautodeadline60/files/2020%20Audi%20e-tron%2055%20quattro%20\(265kW\)%20Tech%20Data%20Aue71b2fc896464b519648ae70774f701d.pdf](http://d3d6mf6ofxeve.cloudfront.net/wieckautodeadline60/files/2020%20Audi%20e-tron%2055%20quattro%20(265kW)%20Tech%20Data%20Aue71b2fc896464b519648ae70774f701d.pdf)

[42] Технічні характеристики Audi e-tron 55 quattro. [Онлайн] Режим доступу: https://evcompare.io/ru/cars/audi/audi_e-tron_quattro/

- [43] Mercedes-Benz EQC. Офіційний сайт. [Онлайн] Режим доступу: <https://www.mercedes-benz.ua/passengercars/mercedes-benz-cars/models/eqc/explore/footnote.module.html>
- [44] Mercedes-Benz EQC brochure. [Online] Available: https://images.91wheels.com/assets/brochures/EQC_brochure.pdf
- [45] Mercedes-Benz EQC technical data. [Online] Available: <https://mercedes-benz-media.co.uk/assets/documents/original/37290-EQCMY8015update11201222v1221220online.pdf>
- [46] Технічні характеристики Mercedes-Benz EQC. [Онлайн] Режим доступу: https://evcompare.io/ru/cars/mercedes/mercedes_eqc_2019/
- [47] Електромобілі в Україні [Онлайн] Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Електромобіль>
- [48] Електромобіль ЗАЗ-968 Електро. [Онлайн] Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%90%D0%97-968>
- [49] Електромобіль ЗАЗ 110206 «Таврія-Гібрид». [Онлайн] Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%90%D0%97-110260>
- [50] Електромобіль ЗАЗ Ланос Пікап Електро. [Онлайн] Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%90%D0%97_Lanos_Cargo
- [51] Електромобіль Synchronous. [Онлайн] Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Synchronous>
- [52] Легендарний ЗАЗ і футурстичний "Синхронус" - ТОП-5 українських електромобілів. [Онлайн] Режим доступу: <https://electrocars.ua/%D0%BB%D0%B5%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D0%B7%D0%B0%D0%B7-%D1%96-%D1%84%D1%83%D1%82%D1%83%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9-%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80/>
- [53] UkrAutoprom. За рік український ринок електромобілів зріс на 19 відсотків. [Онлайн] Режим доступу: <https://ukrautoprom.com.ua/za-rik-ukrayinskyj-rynok-elektromobiliv-zris-na-19-vidsotkiv>
- [54] РБК-Україна. Стало відомо, як зросла кількість електромобілів в Україні станом на 1 грудня. [Онлайн] Режим доступу: <https://www.rbc.ua/ukr/auto/kk-1638476280.html>

[55] Стан та перспективи розвитку ринку електрокарів в Україні. ЕЛЕКТРОКАРИ. [Онлайн] Режим доступу: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/%D0%90%D0%92%D0%A2%D0%9E%D0%9C_%D0%A2%D0%A0%D0%90%D0%9D%D0%A1%D0%9F/%D0%95%D0%90%D0%A2/2020R/%D0%90%D0%A2_%D0%95%D0%90%D0%A2_ELEKTROKARY.pdf

[56] ЕКОНОМІЧНЕ ОБІРУНТУВАННЯ РОЗВИТКУ ІНФРАСТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ. Енергонезалежний автотранспорт. [Онлайн] Режим доступу: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/%D0%90%D0%92%D0%A2%D0%9E%D0%9C_%D0%A2%D0%A0%D0%90%D0%9D%D0%A1%D0%9F/%D0%95%D0%90%D0%A2/2021/robotu_zaproshehuh/%D0%90%D0%A2_%D0%95%D0%90%D0%A2_ENERGONEZALEZHNIJ_AVTOTRANSPORT.pdf

[57] Nissan, Tesla та Chevrolet: 10 найпопулярніших електромобілів у 2021 році. [Онлайн] Режим доступу: <https://life.fakty.com.ua/ua/avto/nissan-tesla-ta-chevrolet-10-najpopulyarnishyh-elektromobiliv-u-2021-roczii/>

[58] РБК-Україна. Електромобілів більше – зарядок менше: що відбувається в Україні із зарядною інфраструктурою [Онлайн] Режим доступу: <https://auto.rbc.ua/ukr/show/zaryadnaya-infrastruktura-1637906584.html>

[59] Drive Ukraine 2030 – драйвер перетворень в Україні. [Онлайн] Режим доступу: <https://eu-ua.kmu.gov.ua/novyny/drive-ukraine-2030-drayver-peretvoren-v-ukrayini-volodymyr-omelyan>

[60] Jelena Loncarski, Mats Leijon, Milan Srndovic, Claudio Rossi and Gabriele Grandi. Comparison of Output Current Ripple in Single and Dual Three-Phase Inverters for Electric Vehicle Motor Drives, *Energies* 2015, Vol. 8(5), 3832-3848 pp.; Access mode: <https://doi.org/10.3390/en8053832>

[61] Prasun Mishra. Design and Implementation of Speed Controller with Anti-Windup Scheme for Three Phase Induction Motor Used in Electric Vehicle, *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887) Volume 89 – No 9, March 2014, Access mode: https://www.researchgate.net/publication/262985880_Design_and_Implementation_of_Speed_Controller_with_Anti-Windup_Scheme_for_Three_Phase_Induction_Motor_Used_in_Electric_Vehicle

[62] Saidi Hemza, Nouredine Mansour, Midoun Abdelhamid. Electric Vehicle Speed Control using Three Phase Inverter operated by DSP-based Vector Pulse Width Modulation Technique, *International Journal of Control Systems and Robotics*, Vol. 2, 2017, Access mode: [http://www.ias.org/ias/filedownloads/ijcsr/2017/011-0031\(2017\).pdf](http://www.ias.org/ias/filedownloads/ijcsr/2017/011-0031(2017).pdf)

[63] K. Jaber, A. Fakhfakh and R. Neji. Modeling and Simulation of High Performance Electrical Vehicle Powertrains in VHDL-AMS, *Electrical Vehicle Design and Modeling*, 2011, 25-40 pp., Access mode: https://cdn.intechopen.com/pdfs/19572/InTech-Modeling_and_simulation_of_high_performance_electrical_vehicle_powertrains_in_vhdl_ams.pdf

[64] Erik Schaltz - Electrical Vehicle Design and Modeling, *Electrical Vehicle Design and Modeling*, 2011, 1-24 pp., Access mode: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/55733255/InTech_Electrical_vehicle_design_and_modeling.pdf

[65] J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002, DOI: 10.1109/TIE.2002.801052

[66] Bang-Bang Controller / Wikipedia. Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Bang%E2%80%93bang_control

[67] Laboratory and On Road Emissions Testing of In-Use Passenger Vehicles in India. Access mode: https://theicct.org/sites/default/files/publications/PV-in-use-emissions-testing-India_ICCT-consultant-report_20170329.pdf

[68] VHDL (VHSIC Hardware Description Language) / Wikipedia. Access mode: <https://uk.wikipedia.org/wiki/VHDL>

[69] Hardware Description Languages: VHDL vs Verilog, and Their Functional Uses. Access mode: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-hardware-description-languages-vhdl-vs-verilog-and-their-functional-uses>

[70] ANSYS Simplorer. Системне моделювання. Режим доступу: <https://www.ansys.soften.com.ua/products/electronics/ansys-simplorer.html>

[71] Sanjai Massey. Modeling, simulation and control of hybrid electric vehicle drive while minimizing energy input requirements using optimizing gear ratio, *Open Access Master's Report, Michigan Technological University*, 2016, Access mode: <https://digitalcommons.mtu.edu/etdr/133/>

[72] Hongwei Liu, Chantong Wang, Xin Zhao and Chong Guo. An Adaptive-Equivalent Consumption Minimum Strategy for an Extended-Range Electric Bus Based on Target Driving Cycle Generation, *Energies*, July 2018, Access mode: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/7/1805>

[73] New European Driving Cycle/ Wikipedia. Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle

[74] Alfredo Munoz-Garcia, Thomas A. Lipo, Donald W. Novotny. A New Induction Motor V/f Control Method Capable of High-Performance Regulation at Low Speeds. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 34, NO. 4, JULY/AUGUST 1998

[75] Мокін Б. І., Мокін О.Б. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими електродвигунами постійного струму. Монографія, Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 92 с. Режим доступу: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/444>

[76] Мокін Б. І., Мокін О.Б. Математична модель кривої намагнічування електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням для задач оптимізації. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 1. – С. 45-47. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/8>

[77] Мокін Б.І., Мокін О.Б. Теорія автоматичного керування, методологія та практика оптимізації. Вінниця: ВНТУ, 2013. – 210 с. ISBN 978-966-641-534-2. Сторінка на сайті видавництва: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/155>

[78] Мокін О.Б., Мокін Б.І. Відносні моделі руху електричного транспортного засобу по горизонтальному прямолінійному відрізку колії. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 2. – С. 20-24. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1699>

[79] Мокін О.Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. Декомпозиція задачі оптимального руху гібридного автомобіля [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>.

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

[81] Мокін О.Б., Фолюшняк О.Д., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. Ідентифікація математичних моделей оптимального руху електромобіля горизонтальним відрізком автомагістралі. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – № 1. – С. 107-110. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/990>

[82] Мокін О.Б., Мокін Б.І., Фолюшняк О.Д. Метод параметричної ідентифікації моделі оптимального струму електромобіля. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 89-92. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1436>

[83] Мокін О. Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. Обчислювальний метод для ідентифікації моделей оптимального руху від зупинки до зупинки за заданим часом гібридного автомобіля з непрацюючою системою електропривода. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6. – С.43-51. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1848>

[84] Мокін О.Б., Мокін Б.І., Фолюшняк О.Д. Оптимізація руху електромобіля по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги за критерієм мінімум витрат енергії акумуляторної батареї. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 2. – С. 96-100. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1401>

[85] Мокін О.Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. Система оптимального руху керування електромобілем, що рухається у транспортному потоці. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016). XIII Міжнародна конференція. Тези доповідей Вінниця. 3-6 жовтня 2016 року. – Вінниця: ВНТУ. ПП «ПП. «Едельвейс», 2016р. – С. 150-152.

[86] Мокін О.Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А., Метод та система оптимального керування електромобілем, що рухається у міському транспортному потоці. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 4. – С. 41 - 46. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1946>

[87] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, Математичні моделі характеристики намагнічування електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням та їх порівняльний аналіз. Кременчук: Вісник КрДПУ, 2005, Вип.3.

[88] Мокін О.Б., Мокін Б.І. Лобатюк В.А. Модифікація методу ідентифікації моделей оптимального руху гібридного автомобіля з непрацюючою системою електропривода для випадку, коли, досягнувши кінцевого пункту, автомобіль продовжує рух. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 1. – С. 65-73. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1878>

[89] Мокін О.Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А., Кубрак О.П. Оптимізація руху гібридного автомобіля з непрацюючим двигуном внутрішнього згоряння. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 5. – С. 69-77. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1829>

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

[91] Мокін О.Б., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. Оптимізація руху гібридного автомобіля з одночасно працюючими на спільний вал двигуном внутрішнього згоряння та системою електропривода. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 33 - 37. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1897>

[92] Мокін О.Б., Фолюшняк О.Д., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. Оптимізація руху завантаженого електромобіля з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 1. – С. 56 -60. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1124>

[93] Мокін О.Б., Фолюшняк О.Д., Мокін Б.І., Лобатюк В.А. Оптимізація руху незавантаженого електромобіля з тяговим електродвигуном постійного струму послідовного збудження по горизонтальному прямолінійному відрізку дороги. Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 2. – С. 48 -51. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1103>

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

[95] В. А. Лобатюк, О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, Математичні моделі оптимального руху електромобілів з електроприводом постійного струму. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2019. ISBN 978-966-641-761-2. Сторінка на сайті видавництва: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/521>

[96] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, Методологія та організація наукових досліджень. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2015.

[97] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, О.М. Кривоніс. Системний аналіз процесу переміщення вантажів у вертикальній площині. *Монографія*. Вінниця: ВНТУ, 2022, 96 с. ISBN 978-966-641-914-2. Сторінка на сайті видавництва: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/728>

[98] Мокін, О. Б., & Мокін, Б. І. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОБМЕЖЕНЬ НА ЛІНІЙНУ ТА КУТОВУ ШВИДКОСТІ ДВОХОСЬОВОГО АВТОМОБІЛЯ ПІД ЧАС РУХУ ПО ЗАКРУГЛЕННЮ ДОРОГИ. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2010, вип. 1, с. 64–67. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1727>

[99] О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, Д. А. Шокар'єв. До питання про характеристики частотно-регульованого електропривода з короткозамкненим асинхронним електродвигуном. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2015, №2, 35-39 с. Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/808>

[100] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В.В. Горенюк. До питання оптимізації руху електромобіля з асинхронним електроприводом. Вісник Вінницького політехнічного інституту, №3, С.32-38, 2019. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-144-3-32-39>

[101] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В.В. Горенюк. Метод ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом. Вісник Вінницького політехнічного інституту, №1, С.32-38, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-148-1-32-38>

[102] В. В. Горенюк, СИНТЕЗ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПО СХИЛАХ І ПІДЙОМАХ ДОРОГИ, Вісник ВПІ, вип. 2, с. 37–44, Квіт 2021. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-155-2-37-44>

[103] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. В. Горенюк, МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНИМ ВІДРІЗКОМ ДОРОГИ, Вісник ВПІ, вип. 5, с. 26–33, Лис 2020. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-152-5-26-33>.

[104] В. В. Горенюк, МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА СХИЛАХ І ПІДЙОМАХ ДОРОГИ, Вісник ВПІ, вип. 5, с. 43–49, Жовт. 21. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-43-49>

[105] Schofield, B., Hagglund, T., & Rantzer, A. Vehicle dynamics control and controller allocation for rollover prevention. 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp. 149-154, DOI: <https://doi.org/10.1109/CACSD-CCA-ISIC.2006.4776639>.

[106] Reński, A. Investigation of the Influence of the Centre of Gravity Position on the Course of Vehicle Rollover. 24th Enhanced Safety of Vehicles Conference, Gothenburg, 8-11 June 2015. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/279449206>

[107] Long, V.H., Phong, D.V. Cornering Path of the Vehicle in Case of Sliding. TECHNISCHE MECHANIK, Manuskripteingang, Band 28, Heft 3-4, 356-362. Retrieved from <https://journals.ub.ovgu.de/index.php/techmech/article/view/855>

[108] Lu, D., Ma, Y., Yin, H., Deng, Z., Qi, J. Development and validation of Electronic Stability Control System algorithm based on Tire Force Observation. Applied Sciences, 10(23), 8741. <https://doi.org/10.3390/app10238741>

[109] Jin, H., Li, S. Research on Stability Control Based on the Wheel Speed Difference for the AT Vehicles. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2015, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2015/251207>

[110] Мокін, О. Б., Мокін, Б. І. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВОВІСНОГО АВТОМОБІЛЯ В ЗАДАЧІ КЕРУВАННЯ ЙОГО РУХОМ ЗА ВІДСУТНОСТІ ОБ'ЇЗДІВ І ОБГОНІВ. Наукові праці ВНТУ, 2009, вип. 4, Отримано з <https://core.ac.uk/download/pdf/52160604.pdf>

[111] Павловський, М.А. Теоретична механіка. Київ: Техніка, 2002, 512 с.

[112] V. Horeniuk, Integration of kinematic and dynamic mathematical models of a two-axle electric car in the problem of estimating its stability on turns, SR, no. 5, pp. 23-29, Oct. 2021.DOI: <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2021.002145>

[113] Мокін, О. Б., Фолюшняк, О. Д. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ В ПРОСТОРИ ЛІНГВІСТИЧНИХ ЗМІННИХ УМОВ НЕПЕРЕВЕРТАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА ПОВОРОТІ ДОРОГИ. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2012. Вип.1, с. 85–88. Отримано з <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1161>

[114] О.Б. Мокін, В.В. Горенюк, «СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ВОДІЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ», НТКП ВНТУ, Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації (2022). Отримано з <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2022/paper/view/14902/12672>

[115] В.В. Горенюк, Б.І. Мокін, О.Б. Мокін. Перспективи реалізації системи підтримки прийняття рішень для водія електромобіля. Вісник ВПІ, вип. 3, с. 31–35, Черв 2022. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-162-3-31-35>

[116] Texas Instruments. HEV/EV Traction Inverter Design Guide Using Isolated IGBT and SiC Gate Drivers. Application Report. SLUA963A – November 2019 – Revised June 2020. Available: https://www.ti.com/lit/an/slua963a/slua963a.pdf?ts=1653198250507&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

[117] Bosch. Inertial measurement unit. Available: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/sensors/inertial-measurement-unit/>

Наукове видання

**Мокін Борис Іванович
Мокін Олександр Борисович
Горенюк Вадим Вікторович**

**Системний аналіз
оптимального руху електромобіля
з асинхронним електроприводом**

Монографія

Оригінал-макет підготовлено в *PBB ВНТУ*

Підписано до друку 10.10.2023 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. др. арк. 6,58.
Наклад 20 пр. Зам. № В2023-08.

Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114
press.vntu.edu.ua
email: irvc.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.