

Вінницький національний технічний університет

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

**ГОРЕНЮК ВАДИМ ВІКТОРОВИЧ**

УДК [629.33-83:519.87](043.5)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**СИНТЕЗ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З  
ТЯГОВИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ ЗМІННОГО СТРУМУ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Галузь знань 14 – «Електрична інженерія»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ В. В. Горенюк

Науковий керівник:

Мокін Борис Іванович,

Заслужений діяч науки і техніки України,

доктор технічних наук, професор

Вінниця - 2022

## АНОТАЦІЯ

*Горенюк В.В.* Синтез моделей оптимального руху електромобілів з тяговими електродвигунами змінного струму. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузь знань 14 – «Електрична інженерія». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2022.

В дисертаційній роботі розв’язана задача зі створення методів синтезу та ідентифікації математичних моделей частотного керування асинхронним електроприводом електромобіля за критерієм мінімуму витрат заряду силової акумуляторної батареї та здійснено інтеграцію до них математичних моделей руху автомобіля по закругленню дороги, синтезованих із балансних рівнянь його кінематики та динаміки, на їх основі розроблено закон керування електромобілем. Впровадження зазначеного закону для електромобілів із електроприводами змінного струму дозволять розширити дистанцію, яку зможе подолати електромобіль на одному заряді силової акумуляторної батареї, а також забезпечить умови для покращення стабільності при проходженні ним поворотів. В результаті дисертаційного дослідження отримані такі результати.

Здійснено огляд наукових праць, присвячених дослідженню електромобілів з тяговими електроприводами змінного струму, законам оптимального руху електромобіля, системам керування електроприводів та стратегій по мінімізації споживання енергії акумуляторних батарей.

Показано, що результати, отримані в дослідженнях ряду вчених, присвячених розв’язанню задачі частотного керування режимами роботи короткозамкнутого асинхронного електродвигуна, оптимального за критерієм мінімуму електричних втрат, вимагають суттєвої корекції, оскільки вони отримані з використанням спрощених математичних моделей електричних машин, які не враховують їх нелінійну магнітну характеристику, що не

відповідає фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин і вимагає стабілізації магнітного потоку в зазорі на рівні, який задається горизонтальним відрізком кривої намагнічування, незалежно від змін частоти струму в обмотці статора.

Вперше запропоновано розв'язувати задачу оптимального за критерієм мінімуму втрат електричної енергії частотного керування режимами роботи короткозамкнутого асинхронного електродвигуна, який є тяговим в системі привода електромобіля, з використанням варіаційного варіанту методу Лагранжа та математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса, яка з високою точністю зв'язує між собою електричний струм в обмотці статора асинхронного двигуна з магнітним потоком, який створюється полем цього струму, а тому відповідає фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин і дозволяє отримати поле екстремалей в координатах відносний час, відносна швидкість руху електромобіля та відносний струм в обмотці статора його приводного електродвигуна.

Удосконалено метод ідентифікації моделей руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізуку дороги, оптимальних за критерієм мінімуму електричних втрат, синтезованих з використанням математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса, яка з високою точністю зв'язує між собою електричний струм в обмотці статора асинхронного двигуна з магнітним потоком, який створюється полем цього струму, а тому відповідає фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин, та з застосуванням варіаційного варіанту методу Лагранжа, що приводить до поля екстремалей в координатах відносний час, відносна швидкість руху електромобіля та відносний струм в обмотці статора його приводного електродвигуна, на першому етапі реалізації якого визначаються константи, котрі мають місце у цих моделях внаслідок використання двічі операції

інтегрування в процесі їх синтезу, на другому етапі реалізації пропонується прямий алгоритм визначення швидкості електромобіля на основі моделі його динаміки, а на третьому етапі синтезується ітераційний алгоритм визначення струму, зв'язаного зі швидкістю електромобіля співвідношенням, отриманим в результаті розв'язання задачі оптимізації методом невизначених множників Лагранжа. А також визначені умови, які накладаються на ітераційний процес ідентифікації моделі оптимального струму, що подається з силової акумуляторної батареї електромобіля через перетворювач постійного струму в змінний в обмотку статора приводного асинхронного електродвигуна, та умови, яким повинен задовольняти процес визначення моментів часу, в які здійснюється процес ідентифікації цієї моделі, від яких залежить точність визначення координат траєкторії оптимального руху електромобіля.

Удосконалено метод синтезу та ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом під час руху дорогою на спуск та на підйом, в якому використано той же підхід, що й запропонований нами під час розроблення методу синтезу та ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відріzkу дороги, але з іншими граничними умовами, з іншою процедурою їх використання для визначення констант, котрі мають місце у цих моделях внаслідок використання двічі операції інтегрування в процесі їх синтезу методом невизначених множників Лагранжа, а також з іншою процедурою реалізації прямого алгоритму визначення швидкості електромобіля на основі моделі його динаміки, яка у випадку руху на спуск та на підйом в якості параметрів містить в собі ще й кут нахилу повздовжньої осі рами електромобіля до горизонтальної площини, який є величиною змінною у просторі, тож для електромобіля, що рухається, є величиною змінною і в часі, а тому вимагає вимірювання відповідним пристроєм. Показано також, що в разі, якщо електромобіль виїжджає на горизонтальну ділянку дороги зі спуску чи підйому без зупинки, то для визначення констант в моделях його оптимального руху горизонтальною ділянкою дороги стають непридатними вирази, що отримані нами раніше для

випадку, коли визначались моделі оптимального руху електромобіля горизонтальною ділянкою дороги від зупинки до зупинки, оскільки змінюються граничні умови, а тому і вирази, за якими визначаються ці константи стають за своєю структурою наближеними до тих, які отримані нами для моделей оптимального руху електромобіля на спуск чи підйом.

Для визначення швидкості руху по закругленню дороги автомобілів як з двигунами внутрішнього згорання так і з електричним приводом, не перевищення якої унеможлиблює їх занос чи перевертання, вперше здійснена інтеграція математичних моделей руху автомобіля по закругленню дороги, синтезованих як на основі балансних рівнянь його кінематики, так і на основі балансних рівнянь його динаміки. Визначено перспектив інтеграції до цієї сукупності математичних моделей автомобіля і ще однієї математичної, що синтезована в просторі лінгвістичних змінних, які характеризують невизначеність стану дорожнього покриття та ступінь зношення шин на різних колесах автомобіля.

Для оцінювання адекватності моделей оптимального руху електромобіля з тяговими електродвигунами змінного струму здійснене імітаційне моделювання руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізку дороги та по відрізку дороги на спуск і підйом, оптимального за критерієм мінімуму електричних втрат, з використанням синтезованих моделей, в основу яких покладено математичну модель кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса та варіаційний варіант методу невизначених множників Лагранжа. Виконано чотири варіанти моделювання процесів руху на відрізку дороги по горизонталі та різного ступеня нахилу відрізку дороги на спуск та на підйом з різними значеннями граничних умов. Проведено аналіз результатів усіх чотирьох варіантів моделювання з використанням синтезованих моделей, на основі якого встановлено, що рух електромобіля як горизонтальним відрізком дороги так і дорогою на спуск чи на підйом в разі, якщо його системою керування буде реалізуватись закон, в основу якого будуть покладені алгоритми,

що базуються на синтезованих моделях, то для покриття електромобілем однієї і тієї ж відстані за один і той же час використовуватиметься мінімальне споживання електричного заряду силової акумуляторної батареї, від якої отримує електроенергію електропривод електромобіля. Отримані результати моделювання та їх аналіз підтверджують теоретичні виклади і ефективність синтезованих математичних моделей оптимального руху електромобіля горизонтальним відрізком дороги.

Запропоновано варіант реалізації системи підтримки прийняття рішень для водія електромобіля під час керування ним, в основу якого покладено синтезовані авторами математичні моделі оптимального руху електромобіля за критерієм мінімізації споживання заряду силової акумуляторної батареї електроприводом змінного струму, а також математичні моделі визначення значень швидкостей під час проходження електромобілем поворотів, не перевищення яких унеможливить його перекидання чи занос. Проведено аналіз сучасних автомобільних систем керування та пошук серед них таких, які доцільно використати для реалізації авторського варіанту в рамках запропонованої концепції, а також можливі способи розширення функціоналу системи шляхом інтеграції додаткових підсистем, які дозволять підвищити ефективність запропонованої системи.

*Ключові слова:* електромобіль, тяговий асинхронний електропривод, рух по горизонталі, рух на спуск і на підйом, рух на поворотах, математична модель, ідентифікація, моделювання, критерій мінімуму витрат енергії силової акумуляторної батареї, оптимізація, система підтримки прийняття рішень.

## ABSTRACT

*Horeniuk V.V.* Synthesis of models of the optimal motion of electric car with traction induction motors. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the Doctor of Philosophy in the direction of preparation 141 – "Electric power, electric engineering, and electromechanics" (14 – "Electrical engineering"). - Vinnytsia national technical university, Vinnytsia, 2021.

In the dissertation work, the problem of the creation of methods of synthesis and identification of mathematical models of frequency control of the induction electric drive of the electric car by a criterion of a minimum of expenses of a charge of the power accumulator battery is solved. The mathematical models of the car's movement on the rounding of the road, synthesized from the balance equations of its kinematics and dynamics, have been integrated into the obtained mathematical models. Based on them, the law of electric car control was developed. The introduction of this law for electric vehicles with the induction electric drive will expand the distance that can be covered by an electric car on a single charge of the battery and will provide conditions to improve stability when cornering. The following results were obtained because of the dissertation research.

Reviewed scientific works devoted to the study of electric cars with traction induction motors, the laws of optimal motion of the electric car, control systems of electric drives, and strategies to minimize the energy consumption of batteries.

It is shown that the results obtained in the research of several scientists devoted to solving the problem of frequency control of the modes of operation of a Squirrel-cage induction motor, optimal for the criterion of minimum electrical losses, require significant correction since they are obtained from simplified mathematical models of electric machines that do not take into account their nonlinear magnetic characteristics, and therefore does not meet the physical conditions of the real functioning of induction machines and requires stabilization

of the magnetic flux in the gap at a level that is specified horizontal magnetization curve regardless of changes in frequency current in the stator winding.

For the first time has been proposed to solve the problem by the optimal criterion for minimizing the losses of electric energy of frequency control of the modes of operation of a Squirrel-cage induction motor, which is traction in electric cars, using a variant of the Lagrange variational method and mathematical model of the magnetization curve in the form of an inverse hyperbolic sinus, which, with high accuracy, binds the electric current in the stator winding of the induction motor with a magnetic flux created by the field of this current, and therefore corresponds to the physical conditions of the real functioning of induction machines, and allows to get the field of extremals in coordinates relative time, a relative velocity of electric vehicle and relative current in winding of a stator of its traction electric motor.

Has been improved the method of motion models the identification of an electric car with a traction induction motor by horizontal road segment, optimal by the criterion of the minimum of electric losses, synthesized using a mathematical model of the magnetization curve in the form of an inverted hyperbolic sine, which with high precision binds the current in the stator winding of an induction motor with a magnetic flux created by the field of this current and therefore corresponds to the physical conditions of the actual operation of induction electric machines, and using Lagrange variational method option that leads to the field extremals in coordinates relative time, relative speed and relative electric current in the drive motor's stator winding. At the first stage of implementation of the proposed method of motion models identification of an electric car with a traction induction drive, the constants that occur in these models due to the use two times of integration operations in the process of their synthesis are determined. In the second stage of implementation, we propose a direct algorithm for determining the velocity of an electric car based on its dynamics model, and in the third stage, synthesized an iterative algorithm for determining the current associated with the velocity of an electric car by the ratio, that obtained because of solving the optimization problem



by the method of indefinite Lagrange multipliers. Has been defined conditions that are imposed on the iterative process of identification of the model of optimal current, supplied from an electric car battery through the DC to AC converter to the stator winding of traction induction motor and the conditions which must satisfy the process of determining the time moments at which the identification process of this model is carried out, on which the accuracy of determining the electric car optimal movement trajectory coordinates depends.

Has been improved method of optimal motion models of an electric car with a traction induction motor during the road on the descent and ascent, which uses the same approach as has been proposed during the development of the synthesis and identification method of optimal motion models of an electric car with traction induction motor along a horizontal section of road, but with another boundary conditions, with a another their using procedure to determine constants which take place in these models due to the use two times of integration operations in the process of their synthesis by the method of indefinite Lagrange multipliers and also with other procedure of realization of direct algorithm of definition of speed of the electric car on the basis of model of its dynamics, which in the case of movement on descent and ascent as parameters also includes the angle of the electric car frame longitudinal axis inclination to the horizontal plane, which one is a variable in space, so for a moving electric car this value is variable in time, and therefore requires measurement by an appropriate device. Also shown that if the electric car started moving along the horizontal section of the road after moving along descent or ascent without stopping, then to determine the constants in the models of its optimal movement of the horizontal section of the road become unsuitable expressions obtained earlier for cases when electric car optimal motion models by the horizontal section of the road between road stops were determined, because the boundary conditions change, and therefore the expressions by which these constants are determined become similar in structure to those obtained for models of optimal electric car movement on descent or ascent.

For determining the speed of cars with internal combustion engines or an electric drive on a road curve, considering that not exceeding that speed makes it impossible to skid or overturn, for the first time has been carried out an integration of the mathematical models of driving of electric car along a curved road synthesized based on the balance equations of both kinematics and dynamics. Has been identified the prospects of integration into this set of mathematical models another one, synthesized in the space of linguistic variables that characterize the uncertainty of the road surface and the degree of tire wear on different wheels of the car.

To assess the adequacy of optimal motion models of an electric car with a traction induction motor performed simulation modeling of driving by the horizontal road section and driving by sections of the road with slopes and rises, optimal by the criterion of minimum electrical losses. Using the models based on a mathematical model of the magnetization curve in the form of inverse hyperbolic sine and a variational variant of the method of indefinite Lagrange multipliers. Four modeling variants of the driving process along the horizontal section of the road as well as the descent and the ascent with different values of model parameters and different values of boundary conditions were performed. An analysis of the results of all four modeling options using synthesized models, based on which it is established that the movement of the electric car on a horizontal section of the road if its control system will implement the law, which will be based on algorithms based on synthesized models to cover the electric car of the same distance for the same time will use the minimum consumption of electric charge of the power accumulator battery from which the electric drive of the electric car receives the electric power. The obtained simulation results and their analysis confirm the theoretical statements and the efficiency of the synthesized mathematical models of the optimal motion of the electric car by the horizontal section of the road.

There has been proposed a way of implementing the decision-making support system for the driver of an electric car while driving it. The system was

based on the synthesized the authors' mathematical models of the electric car's optimal movement by the criterion of the minimum consumption of the electric car power battery charge by its induction motor and based on the mathematical models of determination of speeds values while the electric car cornering not exceeding which makes it impossible to overturn or skid. Has been carried out the analysis of modern electric car systems and search among them those which expedient be used to implement the author's version within their proposed concept as well as possible ways to expand the functionality of the system by integrating additional subsystems that will increase the efficiency of the proposed system.

*Keywords:* electric car, traction induction electric drive, horizontal movement, descent and ascent movement, cornering movement, mathematical model, identification, modeling, criterion of minimum energy consumption of power battery, optimization, decision-making support system.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ***Наукові статті у фахових виданнях:*

[1] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і В. В. Горенюк, «ДО ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ», Вісник ВПІ, вип. 3, с. 32–39, Чер. 2019. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-144-3-32-39>

[2] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і В. В. Горенюк, «МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ», Вісник ВПІ, вип. 1, с. 32–38, Лют. 2020. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-148-1-32-38>

[3] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і В. В. Горенюк, «МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНИМ ВІДРІЗКОМ ДОРОГИ», Вісник ВПІ, вип. 5, с. 26–33, Лис. 2020.

[4] 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>

[5] В. В. Горенюк, «МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА СХИЛАХ І ПІДЙОМАХ ДОРОГИ», Вісник ВПІ, вип. 5, с. 43–49, Жовт. 2021.

[6] 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>

*Апробація результатів дослідження:*

[7] В.В. Горенюк, «ОГЛЯД НАУКОВИХ ПРАЦЬ ПРИСВЯЧЕНИХ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯМ З ТЯГОВИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЗМІННОГО СТРУМУ». XLVIII Науково-технічна конференція факультету

електроенергетики та електромеханіки (2019). Отримано з <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/26864>

[8] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В. В. Горенюк, «ОПТИМІЗАЦІЯ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ». МАТЕРІАЛИ XII МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ “СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ”, 21 – 23 жовтня 2019.

[9] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В.В. Горенюк, «СИМУЛЯЦІЯ МОДЕЛІ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ В ППП МАТЛАВ». Контроль і управління в складних системах (КУСС-2020). Отримано з <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30628>

[10] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В. В. Горенюк, «ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ТЯГОВИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ», НТКП ВНТУ. Факультет електроенергетики та електромеханіки (2020). Отримано з <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/28763>

[11] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В. В. Горенюк, «КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З МЕТОЮ ОЦІНЮВАННЯ АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ», КОНФЕРЕНЦІЇ ВНТУ електронні наукові видання, І Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2021). Отримано з <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2021/paper/view/11764>

[12] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В. В. Горенюк, «МЕТОДОЛОГІЯ ІНТЕГРАЦІЇ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДВОХОСЬОВОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ В ЗАДАЧІ ОЦІНКИ ЙОГО СТІЙКОСТІ НА ПОВОРТАХ», V міжнародно науково-технічна конференція «ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ» (ОКЕУ 2021). Отримано з

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2022/paper/view/14902/12672>

[13] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В. В. Горенюк, «КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА СХИЛАХ І ПІДЙОМАХ ДОРОГИ З МЕТОЮ ОЦІНЮВАННЯ АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ», LI Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2022). Отримано з <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feem/all-feem-2022/paper/view/14588/12329>

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

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	26
1.1 Аналіз перспектив подальшого розвитку електромобілів на фоні автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння.....	26
1.2 Аналіз сучасного стану електромобілебудування і характеристика електромобілів, що випускаються за кордоном та в Україні .....	33
1.3 Аналіз наукових праць, присвячених теорії електромобілів та їх електроприводів .....	46
1.4 Постановка задач дисертаційного дослідження .....	61
1.5 Висновки за матеріалами першого розділу .....	64
РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ВІДРІЗКУ ДОРОГИ .....	66
2.1 Базові математичні моделі динаміки електромобіля та їх приведення до безрозмірного вигляду .....	66
2.2 Синтез математичних моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму на горизонтальну відрізок дороги.....	68
2.3 Ідентифікація математичних моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму горизонтальним відрізком дороги .....	73
2.4 Розробка обчислювального методу для побудови траєкторій оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму горизонтальним відрізком дороги.....	76
2.5 Висновки за матеріалами другого розділу .....	78

РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗМІННОГО СТРУМУ НА СПУСКАХ, ПІДЙОМАХ І ПОВОРТАХ .....	79
3.1 Синтез математичних моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму по схилах і підйомах дороги.....	79
3.2 Інтеграція кінематичної та динамічної математичних моделей двохосьового електромобіля в задачі оцінки його стійкості на поворотах .....	86
3.3 Висновки за матеріалами третього розділу.....	95
РОЗДІЛ 4 ІМІТАЦІЙНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗМІННОГО СТРУМУ ТА СИНТЕЗУ СППР .....	97
4.1 Імітаційні моделі для оцінювання адекватності моделей оптимального руху електромобіля у горизонтальній площині, на спуск та на підйом.....	97
4.2 Реалізація системи підтримки прийняття рішення для водія електромобіля .....	118
4.3 Висновки за матеріалами четвертого розділу .....	124
ВИСНОВКИ.....	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	131
ДОДАТКИ.....	143
Додаток А АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	144
Додаток Б СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА .....	148



## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ЕП – Електропривід

ПГ – Парникові гази

ТЗ – Транспортний засіб

АД – Асинхронний двигун

АБ – Акумуляторна батарея

САБ – Силова акумуляторна батарея

ДВЗ – Двигун внутрішнього згорання

ЕТЗ – Електричний транспортний засіб

СППР – Система підтримки прийняття рішень

## ВСТУП

### **Обґрунтування вибору теми дослідження.**

У світовому автопарку сьогодні основна кількість автомобілів в якості рушія використовують двигуни, що живляться рідким та газоподібним паливом, спалювання якого в двигунах внутрішнього згорання генерує чимало частку світового забруднення, а також використання цього палива робить країни в яких не має запасів нафти та газу економічно залежними від країн постачальників цього ресурсу. Уже на протязі десяти років ці проблеми досить активно розпочали вирішувати в автомобілебудівній та енергетичній промисловості, а також на державних рівнях більшості країн світу, шляхом розвитку електромобілів, їх здешевлення, розвитку інфраструктури зарядних станцій та декарбонізації виробництва електроенергії для їх живлення. Чимало робіт присвячено питанням покращення електромобілів, проте все ще є багато того, що потрібно зробити щоб сприяти та пришвидшувати перехід до більш екологічно чистого виду транспорту.

Значна частка світового автопарку на сьогодні – це легкові автомобілі. Для легкових автомобілів, в яких приводом є електродвигун, в основному використовують двигуни змінного струму синхронного та асинхронного типів. Таким чином, ідея оптимізації роботи системи асинхронного електроприводу електромобіля, основою якої є розробка моделей оптимального руху та розробка обчислювального методу для побудови траєкторій оптимального руху, є актуальною.

Розглядатиметься електромобіль, для руху якого використовується виключно тяговий електропривод змінного струму, що живиться лише від силової акумуляторної батареї через інвертор постійного струму в змінний. Пропонується розв'язувати задачу оптимального за критерієм мінімуму втрат електричної енергії частотного керування режимами роботи короткозамкнутого асинхронного електродвигуна, який є тяговим в системі привода електромобіля, з використанням математичної моделі кривої намагнічування у вигляді

оберненого гіперболічного синуса, яка з високою точністю зв'язує між собою електричний струм в обмотці статора асинхронного двигуна з магнітним потоком, який створюється полем цього струму, а тому відповідає фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин. Та привести результати розв'язання задачі оптимального частотного керування режимами короткозамкнутого асинхронного електродвигуна в умовах його роботи в якості тягового в системі привода електромобіля, які отримані з застосуванням варіаційного варіанту методу Лагранжа та математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса і які приводять до поля екстремалей в координатах відносний час, відносна швидкість руху електромобіля та відносний струм в обмотці статора його приводного електродвигуна.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Основний зміст роботи виконано у ході науково-дослідної роботи: «Синтез та реалізація законів оптимального руху електромобілів з асинхронним електроприводом» в рамках наукової школи «Розроблення математичних моделей процесів, що протікають в складних технічних та організаційних системах, інформаційно-вимірювальних систем та систем автоматичного і автоматизованого керування цими процесами», створеної Заслуженим діячем науки і техніки України, академіком Національної академії педагогічних наук України, доктором технічних наук, професором Мокіним Б. І., в процесі реалізації програм досліджень якої на кафедрі комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів (КЕМСК) Вінницького національного технічного університету та у Національній академії педагогічних наук України де виконано більше 30 держбюджетних та більше 10 госпдоговірних науково-дослідних тем.

### **Мета і завдання дослідження.**

Мета дисертаційного дослідження полягає у збільшенні запасу ходу електромобіля за рахунок оптимізації режимів його електротехнічного комплексу.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі поставлені і розв'язані нижче вказані наукові задачі:

- дослідити та оцінити стан та характеристики сучасного електромобілебудування та електромобілів, здійснити аналіз наукових робіт, присвячених теорії електромобілів та їх електроприводів і визначити множину завдань, які потрібно розв'язати для досягнення мети дисертаційного дослідження за сформульованою темою;

- виконати синтез математичних моделей динаміки електромобіля та привести їх до безрозмірного вигляду;

- здійснити синтез та ідентифікацію математичних моделей оптимального руху електромобіля з тяговим електроприводом змінного струму на горизонтальному відрізку дороги;

- розробити обчислювальний метод для побудови траєкторій оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму на горизонтальному відрізку дороги;

- виконати синтез та ідентифікацію математичних моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму на спусках, підйомах і поворотах;

- розробити обчислювальний метод для побудови траєкторій оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму на спусках, підйомах і поворотах;

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

- провести моделювання процесів руху по горизонталі, на спуск та підйом на основі розробленої імітаційної моделі;

- здійснити аналіз отриманих результатів моделювання руху електромобіля по горизонтальній ділянці, на спуск та підйом за критерієм оптимізації споживання електричного заряду САБ електромобіля тяговим електроприводом змінного струму;

- розробити структуру системи підтримки прийняття рішень водієм електромобіля та оцінити перспективи її реалізації.

**Об'єктом дослідження** є процеси в системі електротехнічного комплексу електромобіля при можливих режимах роботи.

**Предметом дослідження** – математичні моделі оптимізації режимів роботи електротехнічного комплексу електромобіля, методи їх ідентифікації та реалізації.

#### **Методи дослідження.**

Під час досліджень використовувалися методи теорії електропривода для дослідження процесів в системі електропривода електромобіля, методи теоретичної механіки та математичного аналізу для дослідження такого важливого функціонального блоку електротехнічного комплексу електромобіля, яким є його механічна частина, методи аеродинаміки для дослідження впливу навколишнього середовища, методи оптимізації динамічних систем для синтезу моделей оптимального руху електромобіля, методи ідентифікації динамічних систем для ідентифікації синтезованих моделей оптимального руху електромобіля, методи теорії автоматичного керування для синтезу пристрою для реалізації моделей оптимального руху, імітаційне моделювання для оцінки адекватності синтезованих моделей.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

Результати отримані в процесі дисертаційного дослідження несуть нижченаведену наукову новизну:

- уперше здійснено синтез та ідентифікацію моделей руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрітку дороги, оптимізованих за критерієм мінімізації споживання заряду силової акумуляторної батареї електромобіля та синтезованих з використанням

математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса, яка з високою точністю зв'язує між собою електричний струм в обмотці статора асинхронного двигуна з магнітним потоком, який створюється полем цього струму, та з застосуванням варіаційного варіанту методу Лагранжа, що приводить до поля екстремалей в координатах відносний час, відносна швидкість руху електромобіля та відносний струм в обмотці статора його приводного електродвигуна;

- здійснено узагальнення отриманих моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом для умов руху дорогою на спуск та на підйом, в якому використано той же підхід, що й запропонований нами під час розроблення методу синтезу та ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізку дороги, але з іншими граничними умовами, з іншою процедурою їх використання для визначення констант, а також з іншою процедурою реалізації прямого алгоритму визначення швидкості електромобіля на основі моделі його динаміки, яка у випадку руху на спуск та на підйом в якості параметрів містить в собі ще й кут нахилу повздовжньої осі рами електромобіля до горизонтальної площини, який є величиною змінною у просторі;

- здійснено узагальнення отриманих моделей для умов визначення швидкості руху по закругленню дороги автомобілів як з двигунами внутрішнього згорання так і з електричним приводом, не перевищення якої унеможливило їх занос чи перевертання - запропоновані моделі враховують зміну швидкості автомобілів під час руху по закругленню дороги та дозволяють обчислювати зміни в часі значень граничної та критичної швидкостей руху автомобіля по закругленню дороги;

- вперше здійснена інтеграція математичних моделей руху автомобіля по закругленню дороги, синтезованих як на основі балансних рівнянь його кінематики, так і на основі балансних рівнянь його динаміки, та визначено перспективи інтеграції до цієї сукупності математичних моделей автомобіля і ще однієї математичної, що синтезована в просторі лінгвістичних змінних, які

характеризують невизначеність стану дорожнього покриття та ступінь зношення шин на різних колесах автомобіля;

- вперше запропоновано структуру системи підтримки прийняття рішень водієм електромобіля під час руху з використанням синтезованих моделей оптимального руху та визначено перспективи її практичної реалізації.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

Розроблені в дисертації математичні моделі оптимального руху в разі їх реалізації в системі керування електромобілем з тяговим асинхронним електроприводом, що рухається горизонтальним відрізком дороги, на спуск, підйом чи на поворотах, дозволять при будь-якій швидкості руху електромобіля сформуванню такого струму в статорі тягового асинхронного двигуна, який мінімізуватиме споживання заряду силової акумуляторної батареї, тим самим збільшуючи можливий запас ходу електромобіля на одному заряді акумуляторної батареї. Тож отримані в дисертації результати можуть бути практично використані у процесі створення вітчизняного серійного електромобіля.

### **Особистий внесок здобувача.**

Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Роботи із науковими результатами опубліковано як у співавторстві так і одноосібно. У роботі [1] (нумерація згідно додатку Б) проведено аналіз наукових робіт присвячених електромобілям та теорії їх електроприводів на основі якого визначено необхідні напрямки для проведення дослідження. За матеріалами викладених в роботах [2] та [4] виконано аналіз отриманих математичних моделей оптимального руху електромобіля за критерієм мінімізації витрат енергії і розроблено алгоритми та комп'ютерну програму в пакеті прикладних програм MATLAB для моделювання процесів руху електромобіля горизонтальною ділянкою дороги, результати якого опубліковано в роботі [3] і для моделювання процесів руху електромобіля на спуск та на підйом вдосконалено алгоритм та розроблено комп'ютерну програму на мові

Java, результати якого опубліковано в роботі [5]. Для роботи [6] проведено аналіз наукових робіт, що присвячені питанням забезпечення стійкості автомобіля при подоланні ним поворотів, необхідних для розробки математичних моделей стійкості електромобіля які можна інтегрувати до отриманих моделей оптимального його руху за критерієм мінімізації витрат енергії. А також запропоновано спосіб реалізації системи підтримки прийняття рішення для водія електромобіля, в основу якої покладено отримані математичні моделі, із використанням програмних комплексів для смартфонів на базі Android та iOS, систем їх інтеграції до бортових електронних систем сучасних електромобілів та елементів навігації.

### **Апробація матеріалів дисертації.**

Результати та основні наукові положення пройшли апробацію на: XLVIII науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки у м. Вінниця 2019 року, на XII Міжнародні науково-практичній конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» у м. Вінниця у 2019 році, на XV Міжнародні науково-технічній конференції «Контроль і управління в складних системах» у м. Вінниця у 2020 році, на науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ факультету електроенергетики та електромеханіки у 2020 році, на I науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки ВНТУ у 2021, на V Міжнародні науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» у м. Вінниця у 2021 році, на LI науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки ВНТУ у 2022 році та на LI науково-технічній конференції факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації ВНТУ у 2022 році.

### **Публікації.**

Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 14 наукових роботах, із яких 8 є тезами доповідей на науково технічних конференціях опублікованих в базі електронних наукових видань Вінницького національного



технічного університету, 5 опубліковано у наукових журналах, що входять до переліку фахових видань, 1 опубліковано у закордонному науковому журналі, що видається в країні, яка є членом ЄС.

### **Структура та обсяг дисертації.**

Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 150 сторінок, з яких основний зміст викладено на 108 сторінках друкованого тексту, містить 41 рисунок, 14 таблиць. Список використаних джерел складається зі 106 найменувань. Додатки містять акти впровадження результатів роботи та список публікацій.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 1.1 Аналіз перспектив подальшого розвитку електромобілів на фоні автомобілів із двигунами внутрішнього згорання

Невпинне зростання населення спричиняє все більше споживання обмежених ресурсів нашої планети, а також і збільшує кількість відходів які вносять певні зміни в навколишнє середовище. Значну кількість забруднення створює автотранспорт, якого за даними [1] станом на 2018 рік, зареєстровано 1 431 448 тис. одиниць механічних транспортних засобів. І дане число швидко зростає, відповідно зростають викиди забруднюючих речовин. В якості альтернативи автомобілям із двигунами внутрішнього згорання на сьогоднішній день активно розвиваються електричні транспортні засоби.

Становище електротранспорту на світовому рівні присвячені щорічні публікації Global EV Outlook [2] в якій визначається та обговорюється останні події в галузі електромобілів по всьому світі, яка є розробленою за підтримки членів Ініціативи з Електромобілів (EVI – Electric Vehicle Initiative) [3]. У звіті, поєднуючи історичний аналіз разом із прогнозами на 2030 рік, розглядаються ключові сфери, такі як розгортання інфраструктури електромобілів та зарядних станцій, вартість обслуговування, електроспоживання, викиди вуглекислого газу та попит на матеріали для акумуляторних батарей.

Як описано в публікації [2] електромобілі розвиваються доволі швидко. Наприкінці 2020 року світовий парк електромобілів досяг значення 10 мільйонів. І не зважаючи спад продажів автомобілів у світі на 16%, реєстрації електромобілів зросли 41% за 2020 рік. По даним Global EV Outlook, на кінець 2020 року зареєстровано 3 мільйони одиниць нових електромобілів [4].

Серед усіх країн лідером по кількості електромобілів є Китайська Народна Республіка (далі – Китай), за нею слідують Європа та США. На рисунку 1.1

представлено дані у вигляді графіків по кількостям зареєстрованих електромобілів [5]

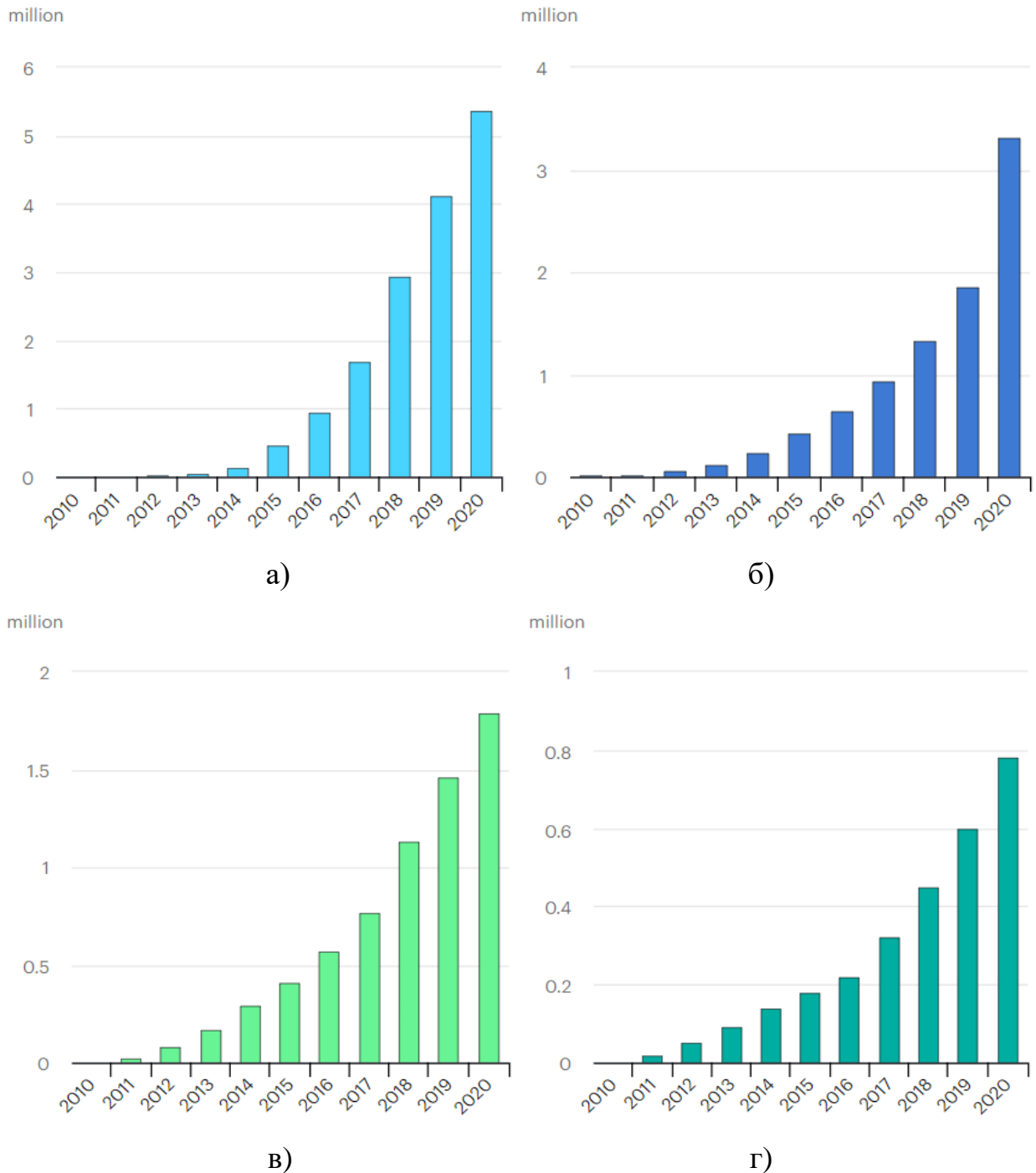


Рисунок 1.1 – Загальна кількість усіх електромобілів (крім 2/3 колісних) за регіонами, 2010-2020 рр. а) Китай, б) Європа, в) Сполучені Штати, г) усі інші країни

Провідні країни в галузі електромобілів застосовують різноманітні заходи, такі як стандарти економії палива в поєднанні з стимулами для автомобілів із низьким та нульовим рівнем викидів, економічні інструменти, які допомагають

подолати розрив у витратах між електричними та звичайними автомобілями та підтримку розгортання інфраструктури зарядних пристроїв. Проводяться удосконалення технологій, котрі в свою чергу значно знижують витрати. Серед яких основними факторами є розвиток хімії акумуляторів та розширення виробничих потужностей підприємств. Інші рішення включають в себе переробку виробничих платформ транспортних засобів з використанням більш простої та інноваційної архітектури дизайну та застосування **big data** для знаходження оптимального розміру акумуляторів. Останні оголошення автовиробників є ініціативними щодо намірів електрифікувати автомобільний ринок. Зазнає важливих змін виробництво акумуляторів, включаючи інвестиції для розширення виробництва. Комунальні послуги, оператори пунктів зарядки, виробники зарядних пристроїв та інші зацікавлені сторони в енергетичному секторі також збільшують інвестиції в інфраструктуру зарядних пристроїв. Цей динамічний розвиток підкріплює позитивний прогноз по збільшенню впровадження електромобілів та інфраструктури зарядних пристроїв.

Станом на 2021 рік у Global EV Outlook 2021 представлено сценарії перспектив розвитку електричної мобільності до 2030 року, які базуються на останніх ринкових даних, політичних чинниках і технологічних перспективах. Їх представлено два: Сценарій заявлених політик – STEPS [6] (англ. Stated Policies Scenario) та Сценарій сталого розвитку – SDS [7] (англ. Sustainable Development Scenario).

STEPS є базовим сценарієм флагманських звітів World Energy Outlook [8] і Energy Technology Perspectives [9] Міжнародного Енергетичного Агентства – IEA (англ. International Energy Agency [10]). Цей сценарій відображає всю існуючу політику, політичні амбіції та цілі, які були законодавчо встановлені або оголошені урядами по всьому світу. Він включає поточні політики та правила, пов'язані з електромобілем, а також очікувані наслідки оголошених розгортань і планів зацікавлених сторін галузі.

Для сценарію SDS основоположним є наступні умови: забезпечення універсального доступу до енергії для всіх до 2030 року; досягти різкого

скорочення викидів забруднюючих речовин в атмосферу; і досягти глобальних кліматичних цілей відповідно до Паризької угоди [11].

За прогнозами, кількість усіх електромобілів (за виключенням 2/3 колісних) з 10 мільйонів із кінця 2020 року збільшиться до значення майже 145 мільйонів одиниць до 2030 за сценарієм STEPS [12], і майже до 230 мільйонів одиниць за сценарієм SDS [13].

Що ж до інфраструктури зарядних пристроїв, то як представлено на графіках рисунку 1.2 [14], [15], число приватних зарядних станцій для легкових автомобілів в 2020 нараховує близько 9.5 млн. одиниць, з яких 7 млн. одиниць є домашніми (40 ГВт встановленої потужності), інші встановлені на робочих місцях (15 ГВт встановленої потужності).

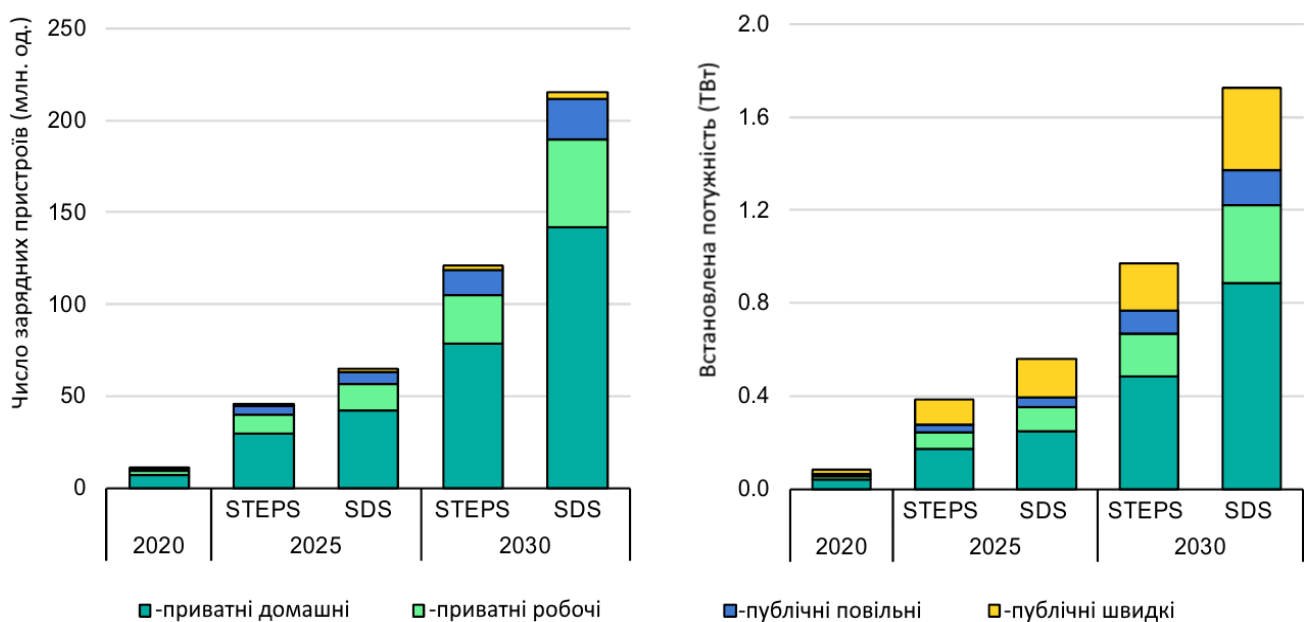


Рисунок 1.2 – Прогнози встановлення електричних зарядних пристроїв для легкових електромобілів та їх сукупна встановлена потужність за сценаріями STEPS та SDS, 2020-2030 рр.

За сценарієм STEPS [6] у 2030 році кількість приватних зарядних пристроїв для легкових електромобілів зросте до 105 млн. од., з них 80 млн. од. домашні і 25 млн. од. встановлені на робочих місцях і загальна встановлена потужність становитиме 670 ГВт які генеруватимуть 235 ТВт·год електроенергії в 2030 році. Кількість зарядних пристроїв публічного використання буде нараховувати 14

млн од. повільних і 2,3 млн. од. швидких. Встановлена потужність повільних зарядних пристроїв становитиме 100 ГВт, швидких – 205 ГВт. Разом вони забезпечуватимуть 95 ТВт·год електроенергії в 2030 році.

У 2030 році за сценарієм SDS [7] кількість приватних зарядних пристроїв домашнього використання становитиме понад 140 мільйонів одиниць (на 80% більше, ніж у STEPS), а для робочого використання становитиме майже 50 млн. од. Разом встановлена потужність становитиме 1,2 ТВт (більш ніж на 80% вище ніж у STEPS) і забезпечуватиме 400 ТВт·год електроенергії у 2030 році. Публічні повільні зарядні пристрої перевищать позначку в 20 мільйонів і публічні швидкі досягнуть майже 4 мільйонів, що відповідатиме 150 ГВт і 360 ГВт встановленої потужності відповідно. Вони забезпечуватимуть 155 ТВт·год електроенергії у 2030 році.

За рахунок використання електромобілів у 2020 році у всьому світі було скорочено викиди парникових газів на понад 50 млн. т. [2] CO<sub>2</sub>-екв. [16] (еквівалентно всім викидам у енергетичному секторі Угорщини в 2019 році [17]). Прогноз на десятиліття полягає в тому, що при зростанні парку електромобілів будуть скорочуватися викиди парникових газів за принципом **well-to-wheel** [18], що характеризує екологічний вплив певного товару чи послуги (в даному випадку електротранспорту та його забезпеченням електроенергією) протягом усього терміну його експлуатації та періоду виробництва, в порівнянні із тими викидами які створюватимуть транспортні засоби із ДВЗ. При цьому відсоток чистого скорочення викидів парникових газів з часом буде збільшуватися. Це пояснюється тим, що очікується, що інтенсивність викидів вуглецю при виробництві електроенергії для електромобілів буде знижуватися швидше, ніж при використанні сумішей рідкого та газоподібного палива для автомобілів з ДВЗ. Оскільки середньостатистичні акумуляторні та плагін-гібридні ЕТЗ, основним енергоносієм яких є джерела електроенергії, які характеризується поточною глобальною середньою інтенсивністю вуглецю [19] (518 грам еквіваленту вуглекислого газу на кіловат-годину [г. CO<sub>2</sub>-екв./кВт·год.]), викидають менше парникових газів, ніж середньостатистичний автомобіль із

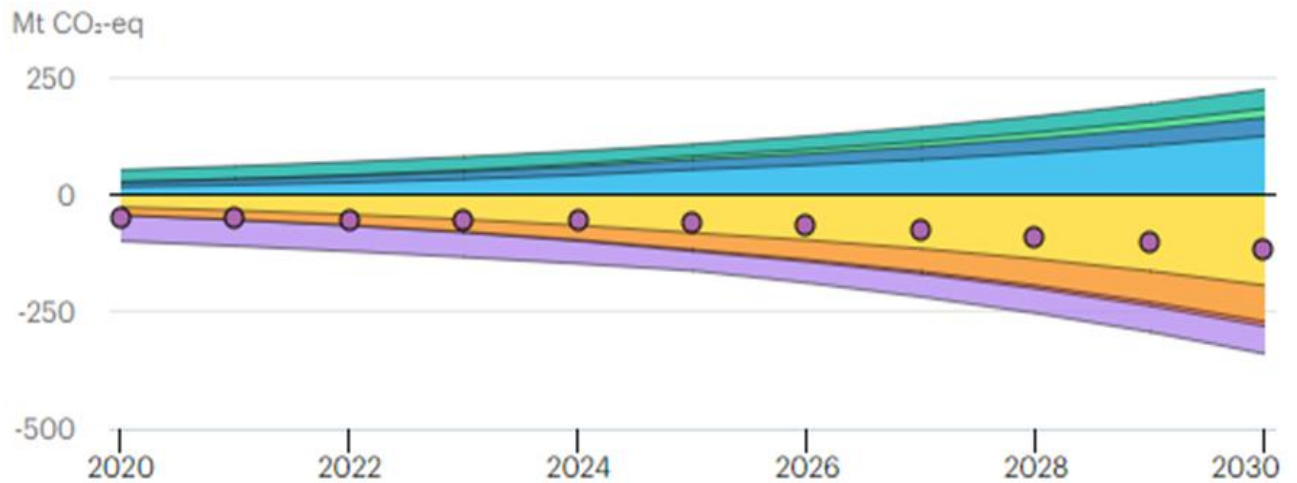
ДВЗ, що використовує бензин в якості джерела енергії протягом свого періоду експлуатації. Але в кінцевому рахунку ступінь викидів CO<sub>2</sub> при експлуатації ЕТЗ залежить від джерел електроенергії, що живитимуть даний вид транспорту, тобто, при використанні вуглецевої сировини в якості джерела енергії, для генерації електричної енергії, використання гібридних транспортних засобів спричинятиме менші викиди парникових газів в порівнянні з акумуляторними електромобілями чи плагін-гібридними. Тому, щоб використати максимальний потенціал зменшення викидів ПГ, розгортання електромобілів має супроводжуватися декарбонізацією виробництва електроенергії.

У прогнозах викиди ПГ за принципом **well-to-wheel** від запасу електромобілів визначаються для кожної країни/регіону на основі кількості електроенергії, спожитої електромобілями, та середньої кількості викидів вуглецю при виробництві електроенергії. Припущення полягає в тому, що середня інтенсивність генерації вуглекислого газу скоротиться на 20% у сценарії STEPS [6] та на 55% у сценарії SDS [7] до 2030 року. Викиди парникових газів, яких можна уникнути, – це ті викиди, які були б, якби прогнозований парк електромобілів замість цього був би транспортними засобами із ДВЗ.

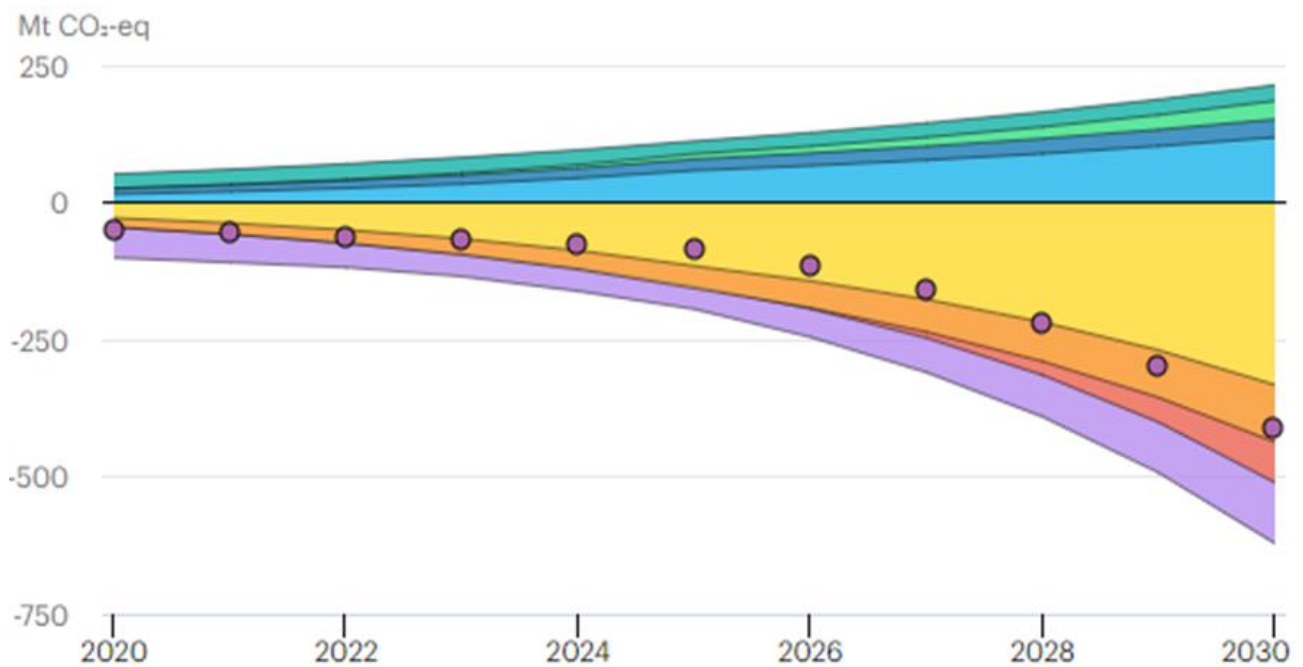
У 2030 році світовий парк електромобілів, у порівнянні із еквівалентним парком автомобілів із ДВЗ, дозволить скоротити викиди ПГ на 1/3 за прогнозом сценарію STEPS [6] і на 2/3 за прогнозом сценарію SDS [7].

У сценарії STEPS [6] прогнозується, що глобальний парк електромобілів викине 230 млн. т. CO<sub>2</sub>-екв. у 2030 році, але якби цей парк був би автомобілями із ДВЗ, викиди становили б 350 млн. т. CO<sub>2</sub>-екв., забезпечуючи зменшення викидів на 120 млн. т. CO<sub>2</sub>-екв. У сценарії SDS [7] очікується, що викиди парникових газів відповідно до принципу **well-to-wheel** від парку електромобілів у 2030 році будуть нижчими, ніж у сценарії STEPS (210 млн т CO<sub>2</sub>-екв.), що відображає те, що збільшення кількості електромобілів урівноважується меншим викидом вуглецю при генерації енергії для парку електромобілів. Сценарій SDS прогнозує зменшення викидів на 410 млн. т. CO<sub>2</sub>-екв. Графіки прогнозованих чистих та тих, яких можна уникнути, викидів парникових газів представлено на

рисунку 1.4 (а) для сценарію STEPS [20] і на рисунку 1.4 (б) для сценарію SDS [21]. Для рисунків 1.3 (а) і (б) додатні значення – це чисті викиди CO<sub>2</sub>-екв. для електромобілів, а від’ємні значення – це ті, які би викинув аналогічний парк автомобілів із ДВЗ.



а)



б)

- - легкові електромобілі      ■ - електробуси      ■ - вантажні електромобілі
- - 2/3 колісні ЕТЗ      ■ - автомобілі з ДВЗ      ■ - автобуси з ДВЗ
- - вантажні автомобілі з ДВЗ      ■ - 2/3 колісні ТЗ з ДВЗ
- - чисте скорочення викидів ПГ

Рисунок 1.3 – Графіки прогнозованих чистих і тих, яких можна уникнути, викидів ПГ за сценаріями: а) STEPS та б) SDS



Нещодавній аналіз IEA [10] показує, що з точки зору життєвого циклу (який включає викиди, пов'язані з виробництвом транспортних засобів, використанням і закінченням терміну експлуатації) сьогодні акумуляторні електромобілі забезпечують скорочення викидів ПГ протягом життєвого циклу приблизно на 20-30% порівняно зі звичайними транспортними засобами з ДВЗ у середньому по всьому світу. Ці переваги більш помітні в країнах, де генерація електроенергії швидко декарбонізується, наприклад, у Європейському Союзі, де викиди за життєвий цикл акумуляторного електромобіля приблизно на 45-55% нижчі. Крім того, аналіз показує, що декарбонізація палива, що споживається транспортним засобом, має бути пріоритетом для зменшення викидів протягом усього життєвого циклу для всіх силових агрегатів.

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

Як показано в попередньому підрозділі сучасний парк електромобілів уже є значною часткою загального парку автомобілів і буде розвиватись із кожним роком все стрімкіше. Тому зрозуміло, що завдяки такому наполегливому зосередженню країнами світу на електрифікації та декарбонізації автотранспорту електромобілі є майбутнім автопромисловості.

Як видно із рисунку 1.1 на 2020 рік кількість усіх зареєстрованих електромобілів (за виключенням 2/3 колісних) у світі перевищило 10 млн. одиниць. Якщо брати до уваги лише легкові автомобілі то більш детальні дані щодо кількості зареєстрованих, проданих, їх частки від загальної кількості і частки від усіх автомобілів та їх продажів наведено в таблиці 1.1. Також на рисунку 1.1 видно, що кількість електромобілів за період з 2010 по 2020 роки у світі значно збільшилось, а із таблиці 1.1 видно, що по кількості електромобілів лідером є Китай, а Норвегія є лідером по частці електромобілів від загального парку автомобілів.

На сьогоднішній день нараховується уже чимала кількість електромобілів від різних виробників. Деякі автовиробники навіть випускають виключно

електромобілі. Далі буде представлено декілька електромобілів від різних виробників, що здобули популярність та значні світові продажі, їх доступність в Україні.

Таблиця 1.1 – Частка продажів, ринку та використання легкових електромобілів за 2020 рік [22]

Країна	Світовий парк	Річні продажі	Частка ринку	% від заг. к-сті
Китай	4,595,100	1,246,000	5.4%	1.75%
Європа	3,299,823	1,364,813	11.4%	1.0%
США	1,741,566	297,939	2.2%	0.7%
Німеччина	~700,000	394,632	13.5%	1.2%
Каліфорнія	803,816	145,099	8.1%	2.27%
Норвегія	480,008	113,588	74.7%	17.2%
Франція	470,295	194,881	11.2%	1.29%
Велика Британія	434,282	175,082	10.7%	1.38%
Нідерланди	297,380	87,946	24.6%	3%
Японія	297,181	29,000	0.6%	-
Швеція	193,054	96,054	32.2%	4%
Канада	188,100	47,000	3.0% (2019)	0.73%
Глобально всього	10,800,000	3,240,000	4.6%	1.0%

У світі серед найбільш відомих є електромобілі компанії Tesla Motors які набули високої популярності. На сьогоднішній день уже випущено чимало моделей. За даними [23], [24] найбільшу кількість продажів на сьогоднішній день має Tesla Model 3 [25], технічні характеристики представлено в таблиці 1.2, зовнішній вигляд якої зображено на рисунку 1.4.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики електромобіля Tesla Model 3 [26],[27],[28]

Технічна характеристика	Значення
Маса авто, кг.	1847
Тип АБ	Літій-іонна
Запас руху, км.	507 (EPA), 567 (WLTP)
Ємність АБ, кВт·год.	75
Потужність зарядки, кВт.:	
змінним струмом	12
постійним струмом	250
Швидкість зарядки постійним струмом, км/год.	1323
Тип двигуна:	
передній	Асинхронний.
задній	Синхронний, на постійних магнітах.
Трансмісія	Одноступінчаста (9:1)
Максимальна швидкість, км/год.	260
Потужність, к. с. (кВт.)	450 (336)
Ефективність кВт·год./100 км.	13

Tesla Model 3 було представлено 28 липня 2017 року. Дана модель орієнтована на масовий ринок і тому є найдоступнішим електромобілем компанії серед усіх моделей, розробка якого була направлена на зниження початкової ціни електромобіля і в той же час продуктивність та запас ходу залишився на високому рівні. Також великих досягнень було здійснено в питаннях автопілоту. Компанією розроблені над швидкі зарядні пристрої Tesla Supercharger які здатні за 30 хвилин зарядити автомобільна 400 км. ходу.



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд електромобіля Tesla Model 3

Щодо поширення цих зарядних пристроїв в Україні, то попри плани побудувати Tesla Supercharger в Києві наразі жодної такої станції, станом на 2021 рік, відкрито не було і їх побудову відкладено на невизначений термін.

10 грудня 2018 року компанія-виробник у список де можна офіційно купувати її авто внесла Україну, однак забирати авто потрібно все ж з міста Тілбург, Нідерланди [29].

Наступним представимо електромобіль Nissan Leaf e+ [30] від японського автовиробника, зовнішній вигляд якого зображено на рисунку 1.5, технічні характеристики представлено в таблиці 1.3. Перша версія із лінійки електромобілів Leaf була представлена ще у грудні 2010 році у Японії та США, була першим масовим електромобілем серійного виробництва і також здобула звання «автомобіль року». Випуск електромобілів наступного покоління розпочато в 2017 році. Версія Leaf e+ стала дещо важчою, проте це відбулось через численні покращення, такі як: збільшення ємності САБ, збільшення запасу ходу, збільшено потужність зарядки як змінним так і постійним струмом у два рази і також здійснено зміну типу електродвигуна із синхронного на постійних магнітах до асинхронного, потужність якого також було збільшено.



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд електромобіля Nissan Leaf e+

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики електромобіля Nissan Leaf e+ [31],[32],[33]

Технічна характеристика	Значення
Маса авто, кг.	1756
Тип АБ	Літій-іонна
Запас руху, км.	364 (EPA), 385 (NEDC)
Ємність АБ, кВт·год.	62
Потужність зарядки, кВт.:	
змінним струмом	6.6
постійним струмом	100
Швидкість зарядки постійним струмом, км/год.	435
Тип двигуна:	Асинхронний
Трансмісія	-
Максимальна швидкість, км/год.	160
Потужність, к. с. (кВт.)	215 (160)
Ефективність кВт·год./100 км.	16

Цікавою особливістю оновленої версії Leaf стало застосування електронної педалі акселератора яка одночасно управляє як прискоренням так і гальмуванням (максимальне уповільнення якого становить 0,2 g) аж до зупинки з автоматичним утриманням машини на підйомі або спуску без необхідності застосування педалі гальм, і при цьому Leaf самостійно включає стоп сигнал.

Електромобілі Nissan лінійки Leaf в Україні здобули велику популярність і є найчисленнішим легковим електротранспортом, проте компанія Nissan поки ще не планує офіційно продавати дану модель в Україні, оскільки в країні відсутня необхідна інфраструктура. Технічні характеристики представлені в таблиці 1.3.

Toyota RAV4 EV II [34] – друге покоління повністю електричної версії популярного кросовера Toyota RAV4, що вироблялись США та Канаді у період з 2012 по 2014 роки спільно компаніями Toyota та Tesla Motors [35]. Зовнішній вигляд електромобіля Toyota RAV4 EV II зображено на рисунку 1.6, технічні характеристики представлені в таблиці 1.4.



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд електромобіля Toyota RAV4 EV II

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики електромобіля Toyota RAV4 EV II [36],[37],[38]

Технічна характеристика	Значення
Маса авто, кг.	1829
Тип АБ	Літій-іонна
Запас руху, км.	166 (EPA)
Ємність АБ, кВт·год.	41.8
Потужність зарядки, кВт.:	
змінним струмом	10
постійним струмом	-
Швидкість зарядки постійним струмом, км/год.	-
Тип двигуна:	Асинхронний
Трансмісія	Одноступінчаста (9.73:1)
Максимальна швидкість, км/год.	161
Потужність, к. с. (кВт.)	154 (115)
Ефективність кВт·год./100 км.	25

Офіційно продавались і здавались у лізинг лише в США. Поява даного електромобіля була викликана зміною в політиці влади штату Каліфорнія, для покращення екологічної обстановки та стимулювання до покупки екологічно чистіших транспортних засобів. До силової установки, для другого покоління версії цього електрокара, входить асинхронний електропривод, що зумовлене практикою відходу від використання синхронних двигунів.

Електромобіль Audi e-tron 55 quattro [39] від німецького автовиробника Audi, що перебуває у складі концерну Volkswagen AG. Даний електромобіль був спочатку представлений як концепт-кар на Франкфуртському автосалоні в 2015 році, а перший серійний автомобіль надійшов до продажу лише у 2019 році. Має на борту два асинхронних двигуна загальною потужністю 300 кВт. та САБ

ємністю 95 кВт·год., що, разом із ефективною системою рекуперації, яка в середньому становить 30 % від діапазону потужності установки, дозволяє подолати значну відстань на одному заряді, та є можливість швидкої зарядки, що забезпечує відновлення 80 % заряду акумуляторної батареї за час в 30 хвилин. Офіційно продається в Україні. Технічні характеристики електромобіля Audi e-tron 55 quattro представлені в таблиці 1.5, зовнішній вигляд зображено на рисунку 1.7.

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики електромобіля Audi e-tron 55 quattro [40],[41],[42]

Технічна характеристика	Значення
Маса авто, кг.	2565
Тип АБ	Літій-іонна
Запас руху, км.	328 (EPA) 441 (WLTP)
Ємність АБ, кВт·год.	95
Потужність зарядки, кВт.:	
змінним струмом	11
постійним струмом	155
Швидкість зарядки постійним струмом, км/год.	504
Тип двигунів (передній та задній):	Асинхронний
Трансмісія:	
передня	Одноступінчаста (9.205:1)
задня	Одноступінчаста (9.083:1)
Максимальна швидкість, км/год.	200
Потужність, к. с. (кВт.)	402 (300)
Ефективність кВт·год./100 км.	22





Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд електромобіля Audi e-tron 55 quattro

Наступний, також від німецького автовиробника в складі концерну Daimler AG, електромобіль Mercedes-Benz EQC [43]. Був представлений в Стокгольмі 4 вересня 2018 року, виробництво розпочато в 2019 році. Має, як і попередній представлений електромобіль Audi e-tron, пару асинхронних електродвигунів загальною потужністю 300 кВт., порівняно дещо меншої ємності САБ, проте має більший запас ходу за рахунок кращої енергоефективності, також має і швидку підзарядку із 10% ємності акумуляторної батареї до 80 % за 40 хвилин. Власникам цього електрокару пропонується інтеграція систем із їх смартфонами для інформування про рівень заряду поза межами авто. Україні наявний офіційний дистриб'ютор автомобілів компанії Mercedes-Benz. Технічні характеристики Mercedes-Benz EQC представлені в таблиці 1.6, а зовнішній вигляд електромобіля зображено на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд електромобіля Mercedes-Benz EQC

Таблиця 1.6 – Технічні характеристики електромобіля Mercedes-Benz EQC [44],[45],[46]

Технічна характеристика	Значення
Маса авто, кг.	2495
Тип АБ	Літій-іонна
Запас руху, км.	354 (EPA), 462 (NEDC) 417 (WLTP)
Ємність АБ, кВт·год	80
Потужність зарядки, кВт.:	
змінним струмом	11
постійним струмом	112
Швидкість зарядки постійним струмом, км/год.	409
Тип двигунів (передній та задній):	Асинхронний
Трансмісія (передня та задня):	Одноступінчаста
Максимальна швидкість, км/год.	180
Потужність, к. с. (кВт.)	402 (300)
Ефективність кВт·год./100 км.	19

Щодо виготовлення електромобілів в Україні [47], на сьогоднішній день не було створено жодного конкурентоспроможного електромобіля. Хоч і розробки в даному напрямку проводилися ще у 1973 році, в який у Запорізькому машинобудівному інституті було розроблено експериментальну машину під назвою ЗАЗ-968 Електро [48], який навіть отримав нагороди на науково-технічній виставці, проте на даний проєкт фінансування не було виділено. Подібна ситуація трапилася і з наступними спробами виготовлення електромобілів, де через недостатнє фінансування та недостатній рівень технологій в кращому випадку вдавалось виготовити декілька сотень одиниць.

Серед найбільш цікавих можна згадати ще такі проєкти як: гібрид ЗАЗ 110206 «Таврія-Гібрид» [49] представлений в 2005 році спільно ЗАЗ та Інститутом електродинаміки (автомобіль здатен був проїхати на одному заряді АБ до 50 км. а з включеним ДВЗ діапазон розширювався до 750 км.), ЗАЗ Ланос Пікап Електро [50] представлений в 2010 році (оснащений 15 кВт. двигуном італійського виробництва та АБ українського виробництва із запасом ходу одного заряду в 100 км.) та електромобіль Synchronous [51], який був представлений в Монако 2016 року компанією Electric Marathon International. Synchronous своїм дизайном нагадує карету, що сприяє його використанню як міське таксі чи екскурсійну машину. На рисунку 1.9 представлено зовнішній вигляд електромобіля а в таблиці 1.7 вказані його технічні характеристики.

Таблиця 1.7 – Технічні характеристики електромобіля Synchronous [52]

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

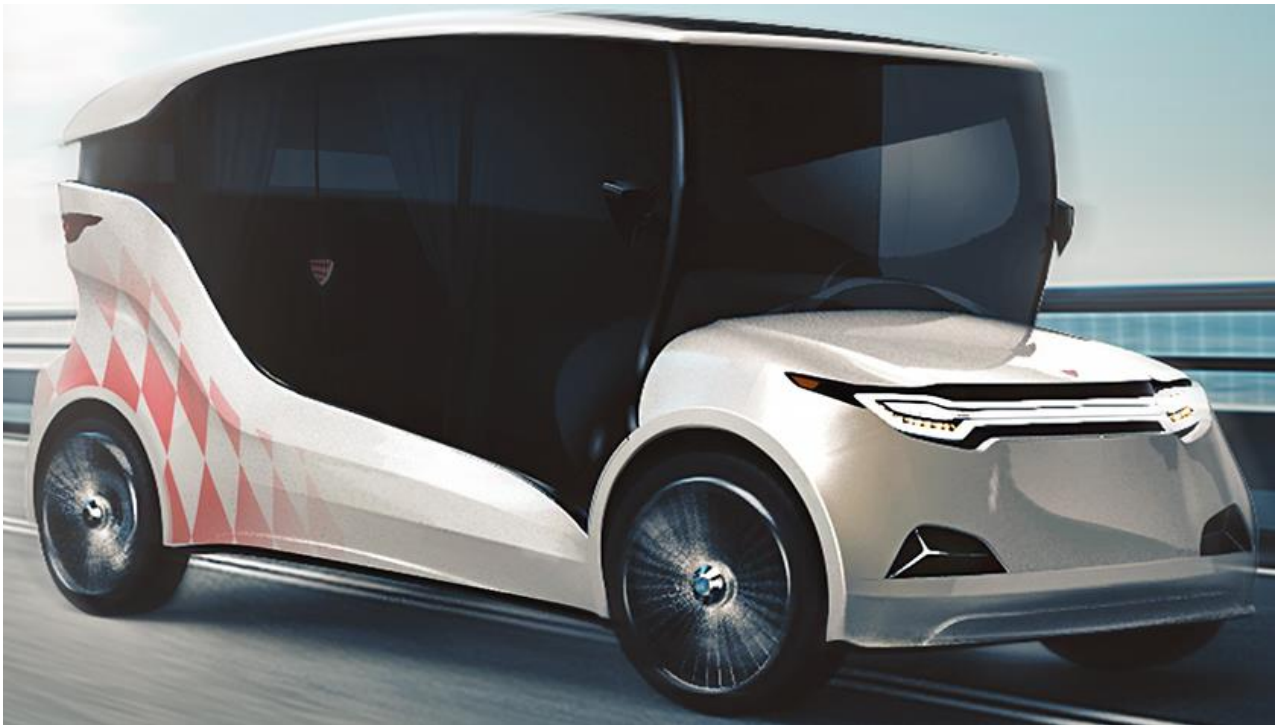


Рисунок 1.9 – Зовнішній вигляд електромобіля Synchronous

Український парк електромобілів збільшується з кожним роком все із більшими темпами, так у 2021 році, за даними [53], було придбано та зареєстровано 8872 електромобіля, що на 19% більше ніж попереднього року, і загальна кількість станом на 1 грудня 2021 року становила 32662 одиниці [54]. Найбільша частка продажів припадає на електромобіль Nissan Leaf, який за даними із [55], [56] та [57], займає лідируючі позиції уже не один рік. А щодо інфраструктури зарядних пристроїв, то на 1 серпня 2021 року нараховується 3244 одиниць [58] зарядних станцій на території України. На рисунку 1.10 зображена карта зарядних пристроїв України відповідно до даних сервісу PlugShare станом на 2022 рік.

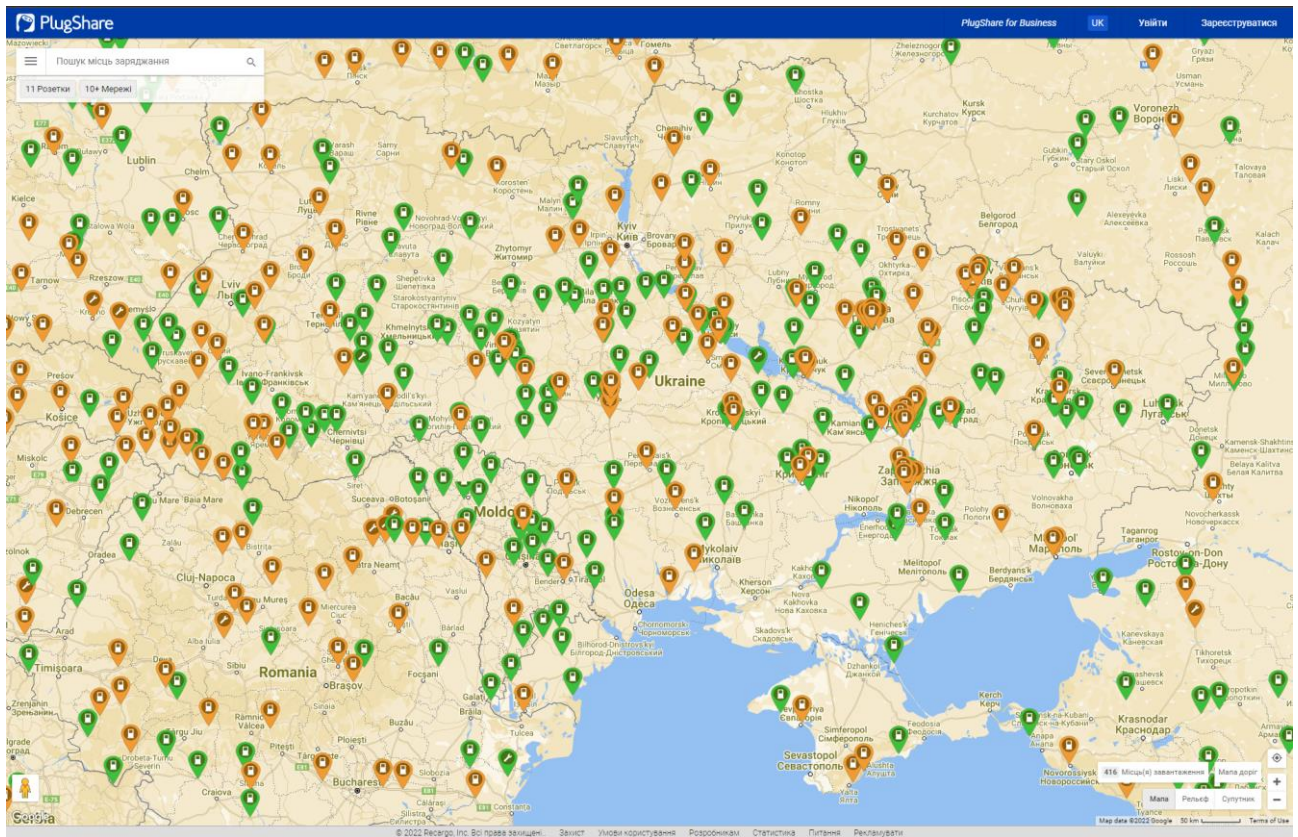


Рисунок 1.10 – Карта зарядних пристроїв України за даними сервісу PlugShare

Також в Україні присутня Національна транспортна стратегія Drive Ukraine 2030 [59], яку Кабінет Міністрів України схвалив 30 травня 2018 року. Дана стратегія націлена все стороннє перетворення та розвиток сфери транспорту, інфраструктури та застосування новітніх технологій для перетворення України на розвинену, високотехнологічну та інноваційну країну. Серед напрямків є і ті що спрямовані на розвиток електричної мобільності, до основних заявлених цілей, що стосується розвитку електротранспорту в Україні заявлено:

- 100 % громадського транспорту перевести на електричну тягу,
- будівництво в Україні Tesla Gigafactory,
- збільшення частки продажів електротранспорту до 50%,
- будівництво 2 заводів з виробництва електрокарів та акумуляторних батарей.

Таким чином, можна бачити, що розвиток електротранспорту та його інфраструктури є необхідним та важливим елементом у житті людей по усьому світі. Більшість країн світу уже на протязі більше 10 років активно займаються

розвитком електротранспорту створюючи сприятливі економічні та політичні умови для автовиробників для масового випуску доступних електромобілів які будуть за своїми показниками ефективності, ціни та зручності близькими або навіть перевершувати автомобілі із ДВЗ, враховуючи розвиток необхідної для такого виду транспорту інфраструктури. І тому варто не тільки підтримувати темпи а навіть і пришвидшувати розвиток електричної мобільності по усьому світі, оскільки існують та виникають нові не тільки екологічні проблеми, а також і економічні та політичні залежності багатьох країн світу від викопних енергоресурсів гостро ставить дані проблеми, і тому варто приділяти питанню декарбонізації енергетики та транспорту все більше уваги.

### **1.3 Аналіз наукових праць, присвячених теорії електромобілів та їх електроприводів**

Для легкових електричних транспортних засобів, на сьогодні, застосовують переважно двигуни змінного струму. Використовуються як асинхронні двигуни, яким присвячені роботи [60], [61], [62], так і синхронні [63], [64].

Стаття [60] присвячена порівнянню використання багаторівневих інверторів (англ. Multilevel Inverter [65]) для електричного транспортного засобу. Автори висвітлили певні особливості роботи трифазного інвертора та його вплив на роботу інших компонентів та систем електромобіля. Також тут представлено використання три-рівневого (подвійного дворівневого) інвертора із метою отримання певних переваг над дворівневими.

Робота складається із декількох частин. У першій із них роз'яснюється деякі проблеми, що присутні в електромобілях, такі як: пульсації струму, комутаційні втрати та акустичний шум, що можуть бути вирішені при використанні подвійного двох рівневого інвертора (трьох рівневого - 3L). На рисунку 1.11 представлені схеми двох рівневого та трьох рівневого трифазних інверторів.

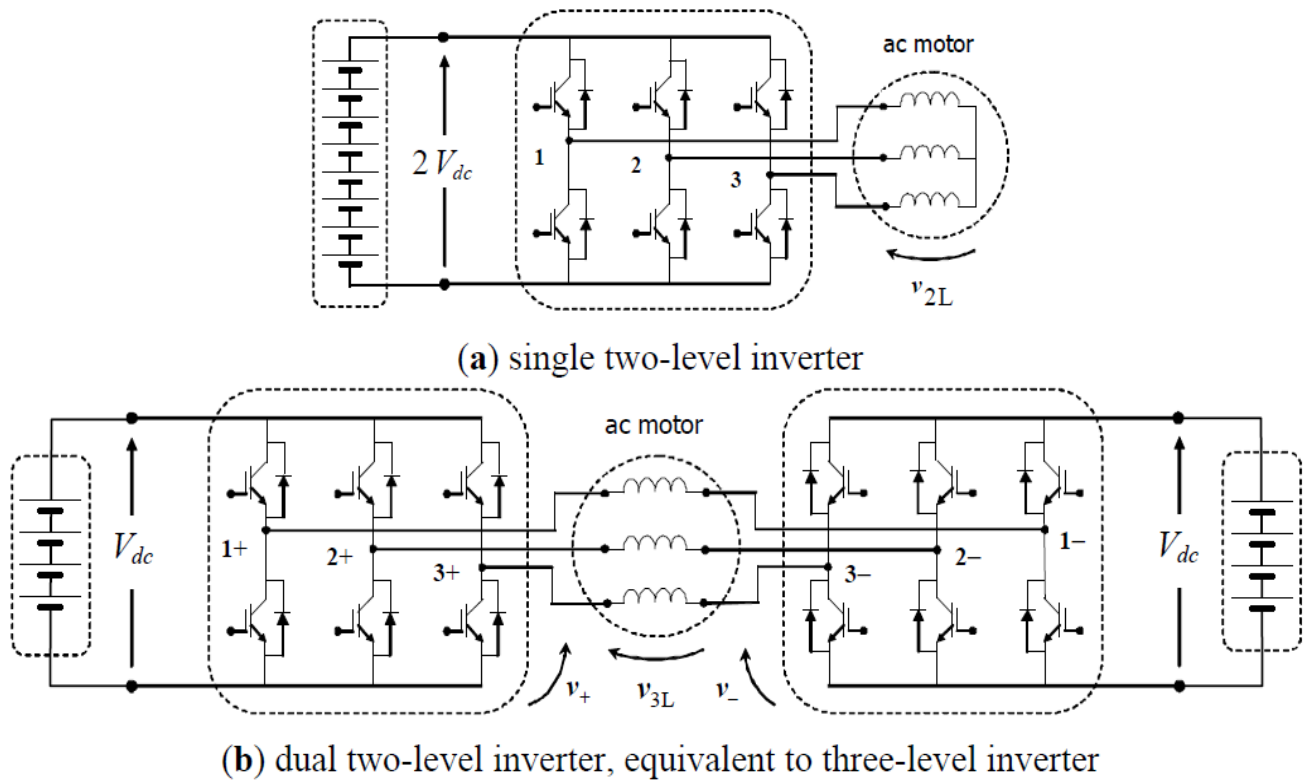
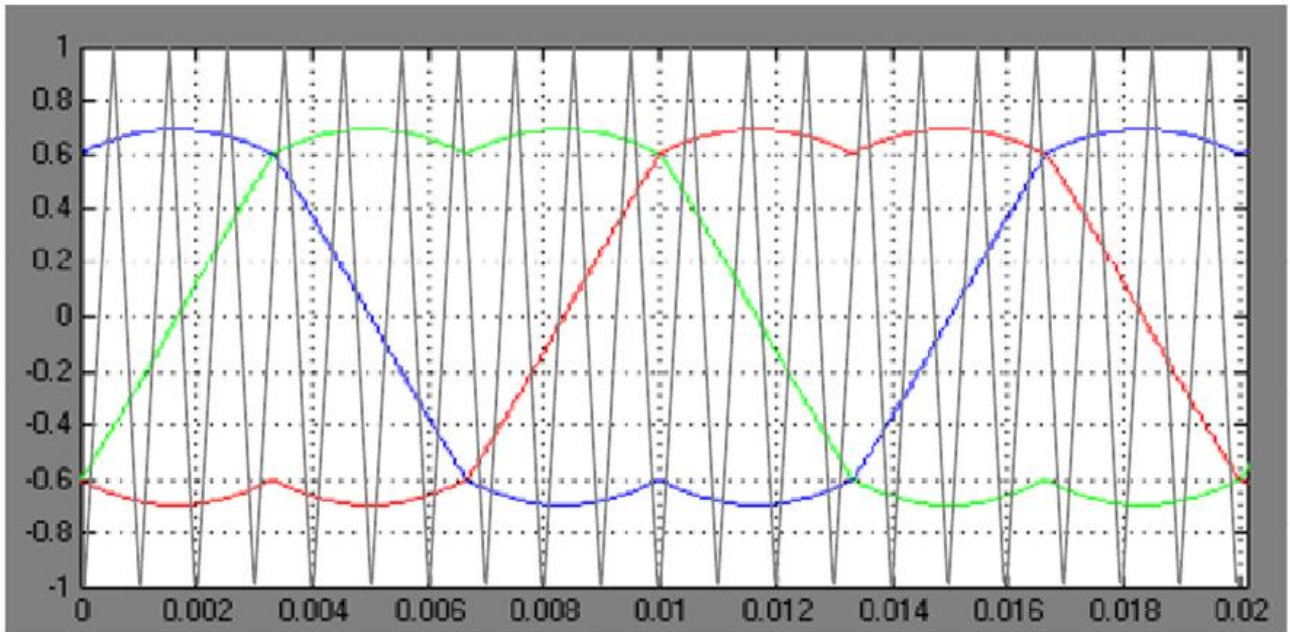


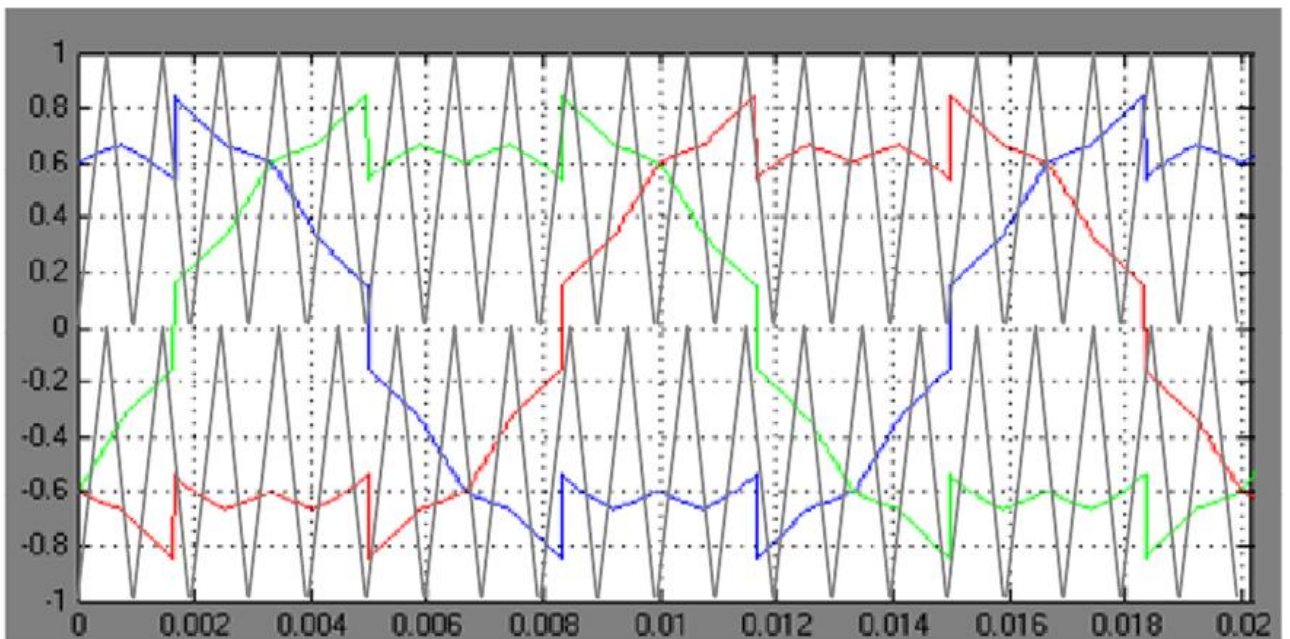
Рисунок 1.11 – Схеми підключення асинхронного двигуна від (а) від одного дворівневого інвертора та (б) подвійного дворівневого інвертора

Друга частина статті є аналізом просторових векторів представлених 2L та 3L інверторів. Тут запропоновано використання просторових векторів при аналізі трифазних інверторів, оскільки дає краще розуміння та спрощує обчислення рівнів напруги та відповідних моментів часу комутації.

В третій частині представляється просторово векторна модуляція 2L та 3L інверторів, а також реалізація центрованих модуляцій на основі ШІМ, які зображено на рисунку 1.12.



(a)



(b)

Рисунок 1.12 – Приклад модифікованих модулюючих сигналів для оптимізованого ШІМ, для (a) 2L та (b) 3L інверторів

Визначенню та оцінюванню струмових пульсацій для обох типів інверторів присвячена четверта частина роботи.

Результати досліджень описані в п'ятій частині. У підрозділі теоретичних результатів було проведено порівняння нормованої пікової амплітуди пульсацій струму для 2L та 3L інверторів у діапазоні  $\vartheta = (0,90^\circ)$  для різних індексів модуляції, а також порівняння середньо нормалізованих пульсацій струму із



індексами модуляції для обох типів представлених інверторів. Із них видно, що для 3L інверторів величина пульсацій майже вдвічі менша в порівнянні із 2L інверторами, різниця пульсацій зображена на рисунку 1.13. Також тут зазначається що саме середня амплітуда пульсацій струму може бути пов'язана із виникненням шуму у двигуні.

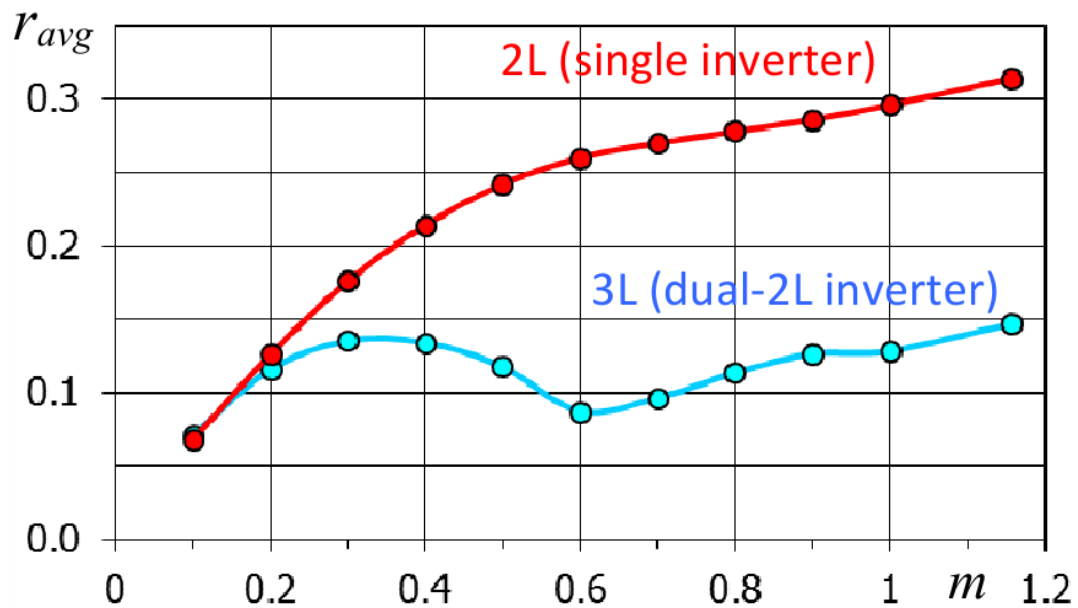


Рисунок 1.13 – Середня нормалізована пульсація струму в залежності від індексу модуляції для 2L та 3L інверторів

Також було проведено експеримент в якому трифазний асинхронний двигун спочатку живився від одного інвертора (2L) за схемою з'єднання зірка а потім одночасно від двох інверторів (3L) за схемою прохідного типу. Відзначається, що експериментальні результати дуже добре узгоджуються з розрахованими формами струмових пульсацій для всіх розглянутих випадків, що підтверджує ефективність запропонованих аналітичних розрахунків для практичного застосування. 3L інвертор забезпечує значне зменшення струмових пульсацій, зменшення акустичних шумів, що створюються двигуном, а також зменшення електромагнітного випромінювання. Більш того, за допомогою 3L інвертора, замість 2L інвертора, виникає можливість розділити одну групу батарей на дві рівні за номіналом, що дозволить зменшити рівень напруги постійного струму і дозволить підвищити надійність автомобіля в цілому.

Експеримент, що провели автори даної роботи із живленням асинхронного двигуна від двох інверторів (рисунок 1.11) підтвердив їхні теоретичні дослідження щодо зменшення струмових пульсацій, зменшення акустичних шумів та електромагнітного випромінювання. Проте експеримент проводився із двигуном при роботі без навантаження та без динамічних режимів. Також, варто відзначити, що експериментальній установці було застосовано малопотужний (0.55 кВт.) асинхронний двигун, а оскільки для легкових електромобілів на сьогодні використовується силові установки значно більших потужностей, тому результат отриманий експериментально для установки такої потужності може відрізнятись у випадку установки із більшою на порядки потужністю, особливо для випадків виникнення високочастотних електромагнітних шумів в системі електропривода. А також проблемним може бути реалізація ідеї розділення системи живлення із 1-ї САБ на дві, встановлення двох інверторів в якості трьох рівневого інвертора, результатом чого система стане складнішою по структурі та управлінні (як для інверторів так і для керуванням рівню заряду САБ), буде більш складний процес повернення енергії назад до САБ під час рекуперації, а також це може значно збільшити ціну електромобіля, що використовуватиме таку систему живлення асинхронного двигуна.

У роботах [61], [62] представлені системи керування асинхронним двигуном, а в [63] – система керування синхронним двигуном.

В [61] система побудована на основі непрямого векторного керування, ПП-регуляторі швидкості із системою усунення затримок та системі керування струмом гістерезису (англ. Hysteresis or Bang-Bang Current Controller [66]) для трифазного асинхронного двигуна діаграма якої показана на рисунку 1.14. Проведено моделювання режиму руху автомобіля за стандартом циклу водіння IDC (Indian Drive Cycle [67]) результати якого представлено на рисунку 1.15. Однак реалізація такого роду регулятора швидкості для асинхронного електропривода як і для будь-яких систем регулювання на основі гістерезисного регулятора струму має досить суттєві недоліки, такі як: висока частота комутацій силових ключів, високі динамічні втрати, спотворення форми струму

високочастотними гармоніками. І тому, як показано авторами роботи [60], варто максимально зменшувати високочастотні струмові коливання, оскільки це не тільки збільшує витрати, а і генерує електромагнітне випромінювання, котре може порушувати роботу інших бортових електронних пристроїв.

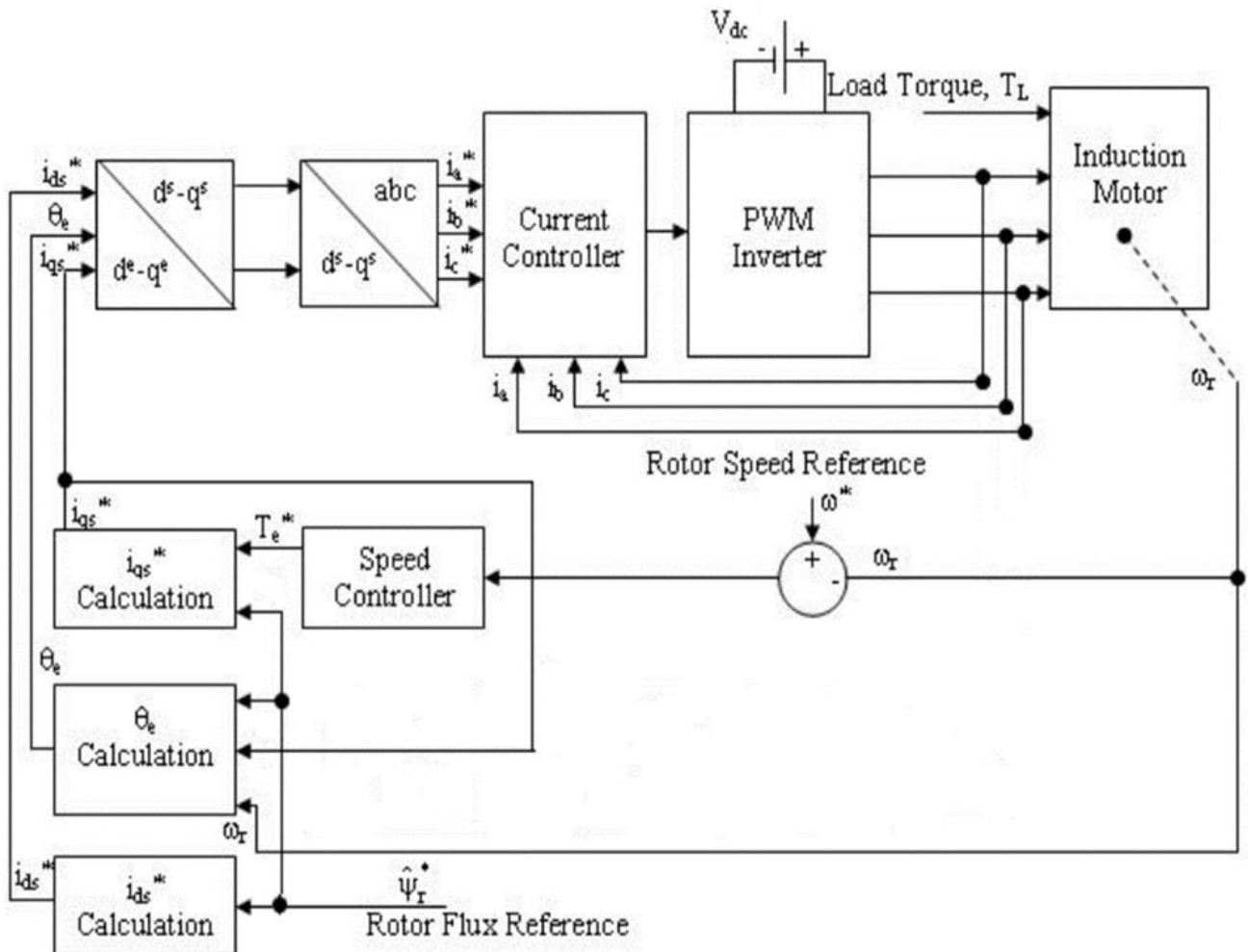


Рисунок 1.14 – Блок діаграма системи асинхронного електропривода з IFOC

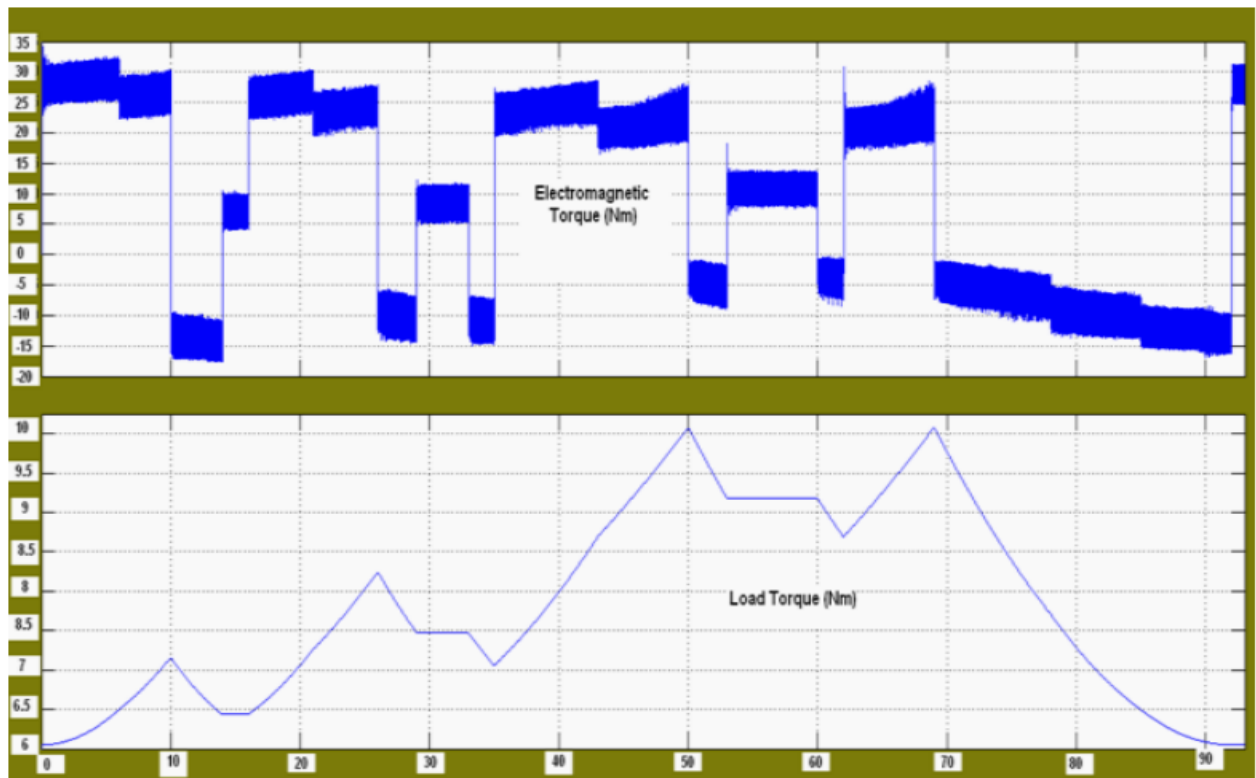


Рисунок 1.15 – Графіки зміни електромагнітного моменту (нижній) та крутний момент навантаження (верхній) залежно від часу (в секундах)

АД з IFOC для циклу водіння IDC

Стаття [62] представляє розробку акумуляторного електричного транспортного засобу тяговим електроприводом якого є АД з КЗ, що також отримує додатково живлення від фотоелектричних модулів. В ній представлено розробку системи керування, яка побудована на основі Процесора Цифрових Сигналів (Digital Signal Process), блок діаграма якої представлено на рисунку 1.16 Проведено експериментальне дослідження руху електромобіля на горизонтальній площині та на підйом, результати якого представлено на рисунку 1.17. Однак, як зазначають самі автори, результати показали, що під час підйому струм в АД був вищим у порівнянні із випадком застосування двигуна постійного струму при тих самих умовах і на тому ж транспортному засобі. Тому, необхідні дослідження в напрямку розроблення стратегій керування асинхронними двигунами електромобілів для покращення їх продуктивності.

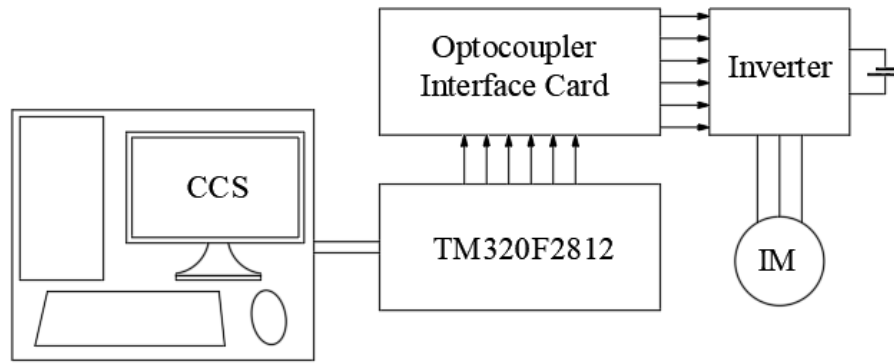


Рисунок 1.16 – Блок діаграма системи асинхронного електропривода на основі Процесора Цифрових Сигналів

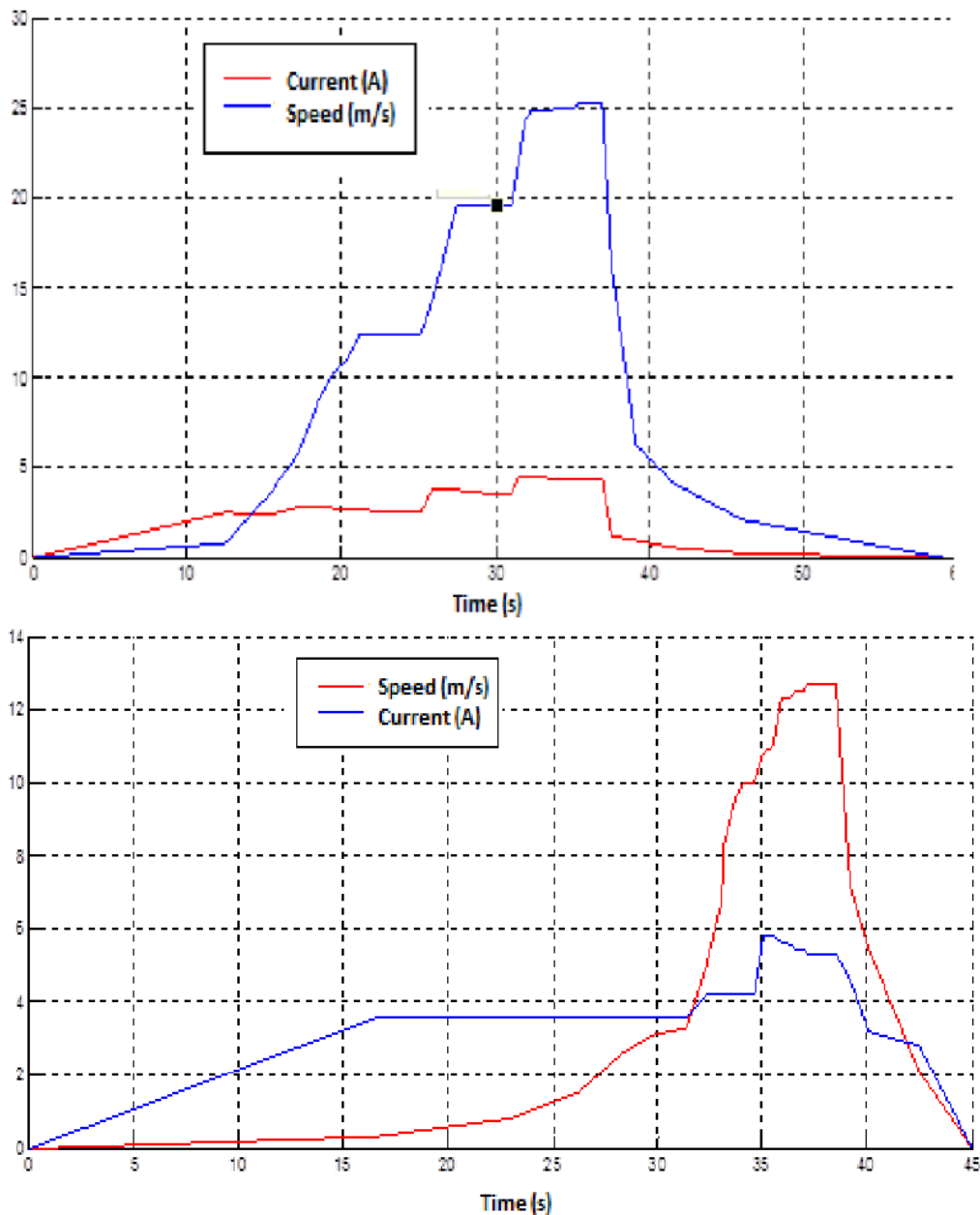


Рисунок 1.17 – Експериментальні результати процесу руху електромобіля на горизонтальній поверхні (зліва) та на підйом (справа)

Для синхронного електропривода [63] систему керування було розроблено за допомогою мови опису апаратури інтегральних схем аналогових та змішаних сигналів (з англ. Very High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language, - мова опису апаратури інтегральних схем, analog and mixed-signal extensions - аналогових та змішаних сигналів [68], [69]). Математичну модель системи керування представлено на рисунку 1.18. Проте в даній роботі силова установка тягового електропривода описана ідеальними функціональними моделями, і таким чином не були враховані нелінійні характеристики електричного двигуна.

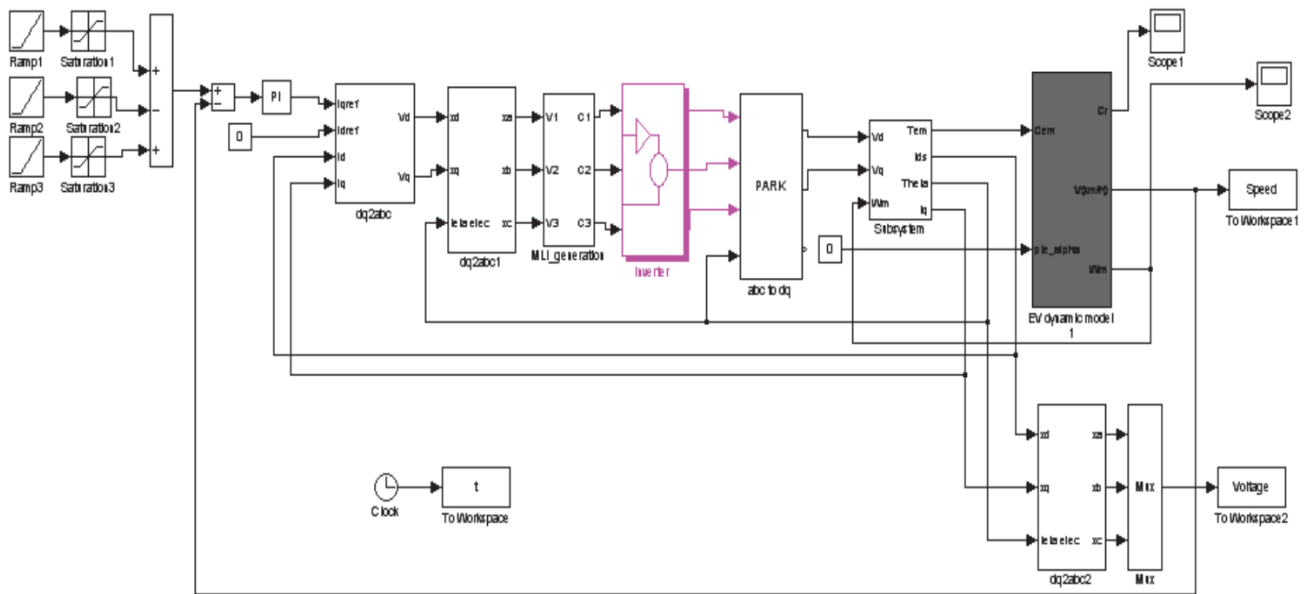


Рисунок 1.18 – Математична модель системи електропривода  
реалізована в MATLAB Simulink

Також моделювання проведено в роботі [61] за допомогою MATLAB/Simulink, моделювання роботи [63], що виконане в ANSYS Simplorer [70], та експеримент роботи [62] проведені за умов руху транспортного засобу при сталій швидкості, при прискоренні та сповільненні, (лише в [62], [63] виконано рух на підйом і спуск) не були враховані інші можливі випадки руху електромобіля.

Роботи [64], [71], [72] націлені на мінімізацію споживання заряду акумуляторних батарей. В дослідженні представленого в [64], моделювання проведено відповідно до представлені структури автомобіля. В якості тягового

електроприводу застосовується синхронний двигун на постійних магнітах. Для обмеження напруги що виникатиме при рекуперації передбачено обмежувач резистор. При моделюванні також було враховано додаткові споживачі електричної енергії (система освітлення, система безпеки та ін.). Передача крутного моменту від валу двигуна здійснюється через трансмісію. Загальна модель автомобіля, що включає в себе модель сил, що діє на транспортний засіб (вітер, сила тяжіння, опір кочення тощо), а також окремі компоненти силового агрегату (трансмісія, електричний двигун, інвертор, акумулятор, випрямляч та ін.) була реалізована в середовищі MATLAB/Simulink. Для спрощення, було прийнято за нуль швидкість вітру та кут нахилу дороги.

Моделювання роботи [64] проводились за стандартом водіння NEDC (New European Driving Cycle) [73]. Виконуючи основне завдання було знайдено мінімальну конфігурацію АКБ, що задовольняє потреби ЕТЗ за енергетичними показниками. Результатом дослідження представлено енергетичний розподіл в електромобілі в цілому, кругова діаграма якого представлена на рисунку 1.19. Лише 49 % електроенергії отриманої із мережі було використано електричним двигуном для приведення автомобіля у рух. 17 % було спожито додатковими системами, ще 14 % відносяться до втрат в АКБ (через умову оптимального користування АКБ при якому рівень заряду не має перевищувати 90 % і не має бути нижче 20 %, тобто використовується лише 70 % ємності батареї). Втрати в електричному двигуні становлять 10 %, усі інші складові приймають на себе ще 10 % витрат в електроенергії. Моделювання проводилось за допомогою MATLAB/Simulink і дозволило знайти мінімальну конфігурацію акумуляторних батарей що задовольняє потреби електричного транспортного засобу за енергетичними показниками. Але менше уваги приділено іншим елементам електромобіля (електричному приводу, силовій електроніці тощо) які є основними споживачами електричної енергії в електромобілі, і оскільки електропривод електромобіля має нелінійні залежності в споживанні електроенергії в залежності від струму живлення при різних навантаженнях, то в реальних умовах експлуатації електромобіля, які будуть відрізнятися від тих

які задає цикл водіння NEDC, отримана конфігурація акумуляторних батарей може бути не оптимальною.

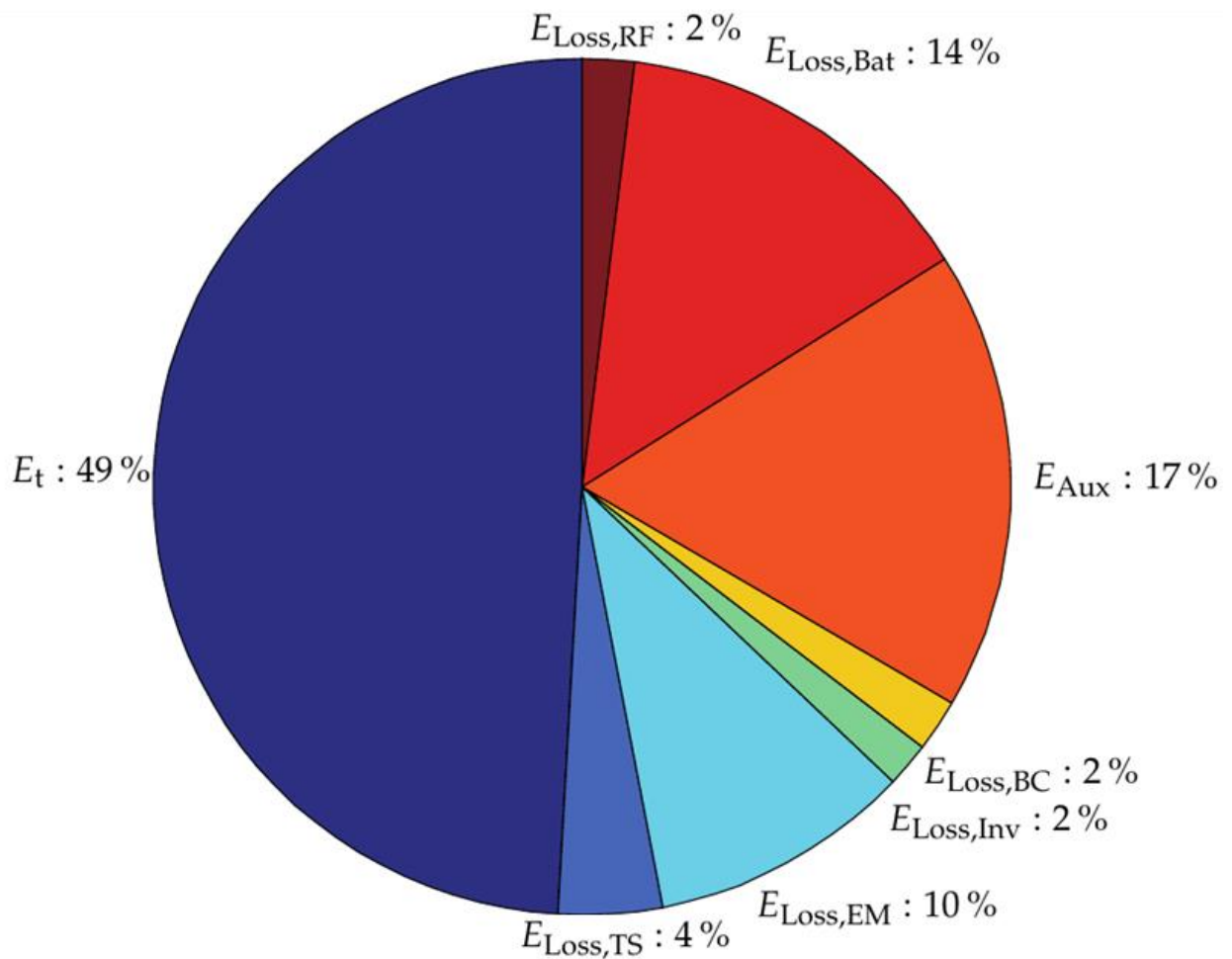


Рисунок 1.19 – Розподіл енергії в ЕТЗ отриманої із мережі.

Завданням мінімізації споживання заряду акумуляторних батарей гібридного автомобіля із статті [71] було приділено увагу оптимізації передачі крутного моменту від електродвигуна до приводного валу автомобіля. У ній змодельована така система передач передаточне число якої забезпечуватиме мінімальне споживання заряду АКБ гібридного електромобіля. Кожна складова моделі, що пройшла моделювання в MATLAB/Simulink була промодельована окремо для того щоб впевнитись у відповідності їх реакцій при статичних і динамічних режимах. Параметри електропривода були максимально наближені до тих що має 2010 Toyota Prius. Як зазначається в статті, отримані результати виявились дуже корисними з сторони того, як можна перевірити різні передаточні числа, а потім виконати оцінку оптимальних точок для мінімізації



втрат енергії, що можна реалізувати у запропонованій моделі. Проте, симуляція хоч і містила в собі динамічні режими роботи електропривода, аналогічно роботам [61], [62], [63] автори обмежились лише режимами прискорення та сповільнення, не проводячи симуляцію інших можливих режимів водіння та впливу погодних умов. Також було використано спрощені математичні моделі системи електропривода, які не враховують магнітне насичення в магнітопроводі електричного двигуна та інші нелінійні ефекти.

В роботі [72] досліджується адаптивно-еквівалентна стратегія мінімального споживання (A-ECMS – adaptive-equivalent consumption minimum strategy) електробуса із розширеним діапазоном (extended-range electric bus - E-REB) оснований на генерації цільового циклу водіння (TDC - target driving cycle), що працює на фіксованих маршрутах. В ній визначено функцію Гамільтона і рівняння спів стану для E-REB відповідно до принципу мінімуму Понтрягіна (PMP - Pontryagin Minimum Principle). Згенеровано серію цільових циклів водіння використовуючи ланцюги Маркова, та було отримано оптимальне рішення при різних рівнях заряду використовуючи PMP алгоритми формуючи початкову карту спів станів. Розроблено адаптивну функцію спів станів що включає фіксовані і динамічні умови. Отримано сегментовану опорну криву стану заряду відповідно до оптимальних кривих зміни заряду при різних початкових станах зарядів, що вирішуються за допомогою принципу мінімуму Понтрягіна. Визначено динамічні умови використовуючи метод ПІ-регулювання в реальному часі для спів станів слідуючи еталонній криві. Завершальний етап показує, що на основі згенерованих цільових циклів водіння, було порівняно ефект контролю адаптивно-еквівалентної стратегії мінімального споживання із принципом мінімуму Понтрягіна і сталої стратегії мінімального споживання, котре показало, що адаптивно-еквівалентна стратегія мінімального споживання забезпечує залишковий стан заряду ближче до заданого значення і повністю використовується потужність батарей. Однак, дана стратегія мінімального споживання заряду САБ розроблена на основі даних здійснених циклів водіння і працюватиме тільки на фіксованих маршрутах для яких проведено оптимізацію.

В роботі [74] представлено частотний метод управління асинхронним двигуном, здатний до вискоефективного регулювання на низьких швидкостях. Представлена система керування, схему якої показано на рисунку 1.20, базується на методі компенсації падіння напруги в статорі та втратам потужності в повітряному зазорі між статором та ротором, котрий потребує мінімальних відомостей про параметри двигуна та єдиною величиною, що необхідно вимірювати є струм статора.

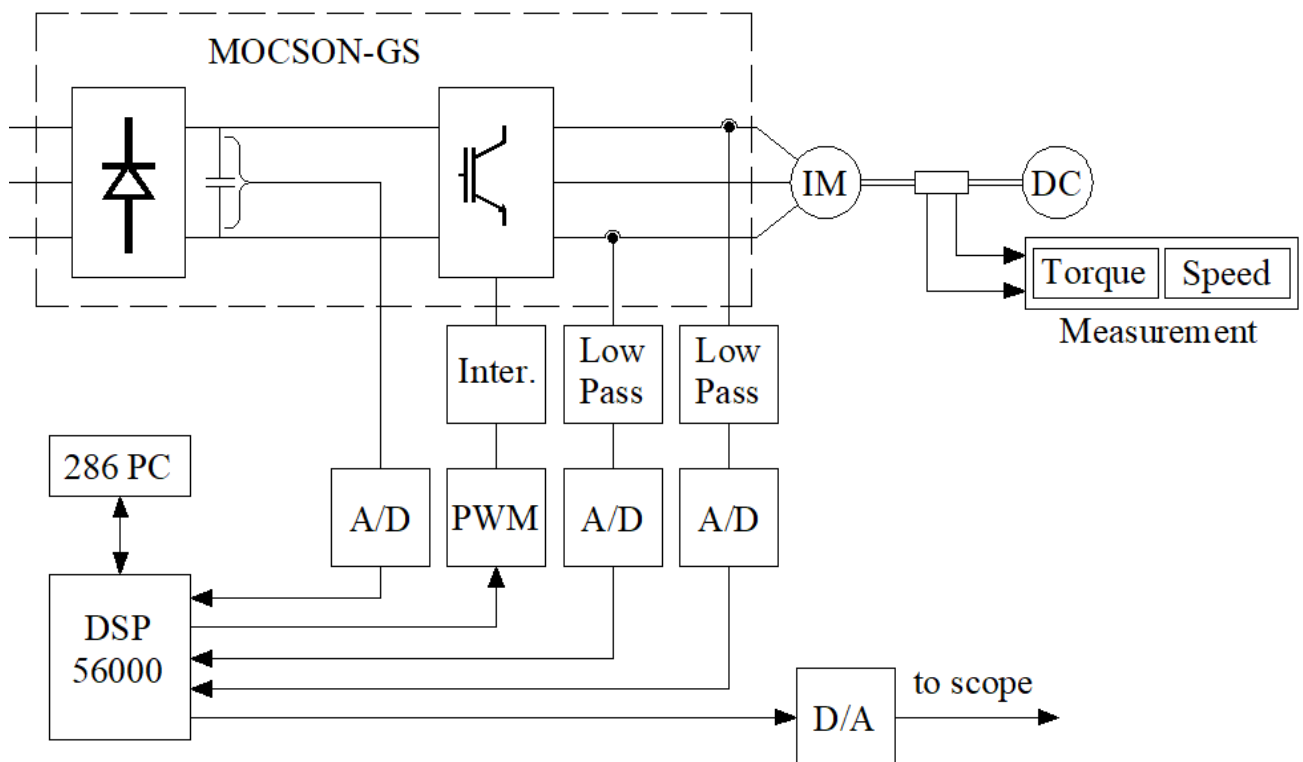


Рисунок 1.20 – Схема експериментальної установки

Компенсація опору статора здійснюється шляхом векторного додавання значення спаду напруги в статорі до напруги живлення двигуна використовуючи додатній зворотний зв'язок. Запропонований метод управління був спочатку змодельований (рисунок 1.21), за допомогою MATLAB і ACSL, а потім реалізований в лабораторії (рисунок 1.22).

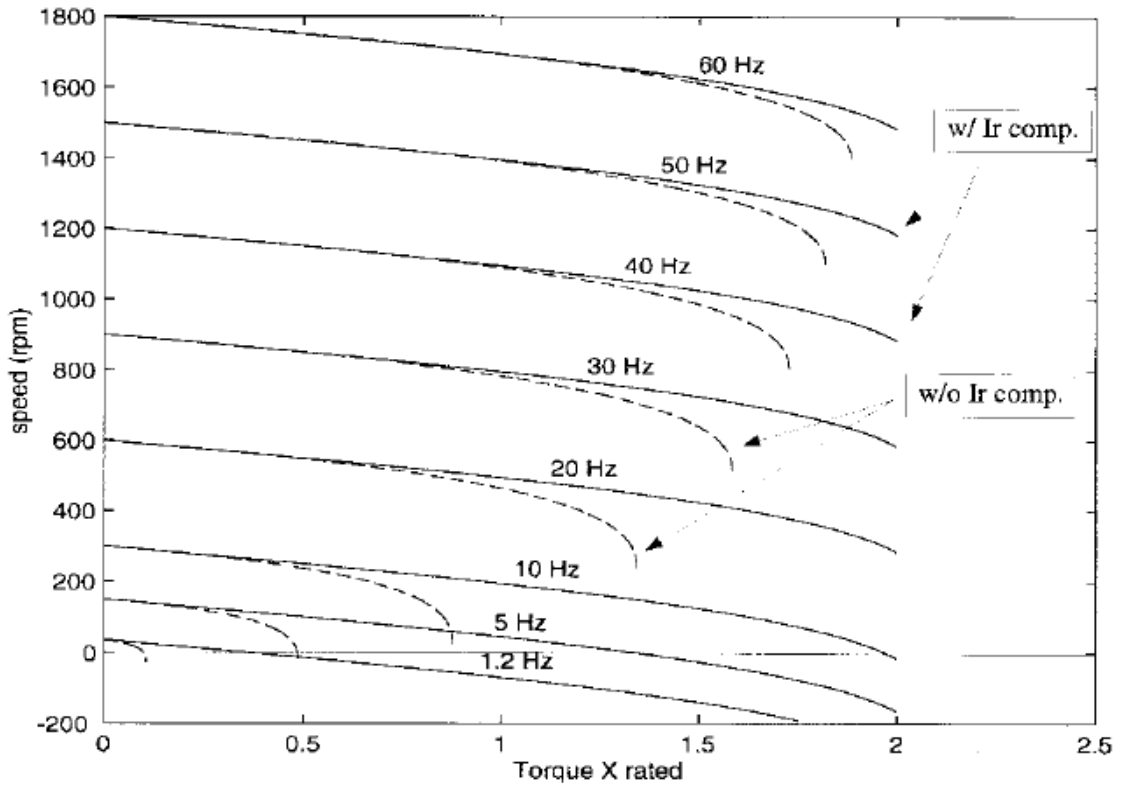


Рисунок 1.21 – Результати моделювання IR компенсації. Суцільна лінія із компенсацією, штрихова без компенсації.

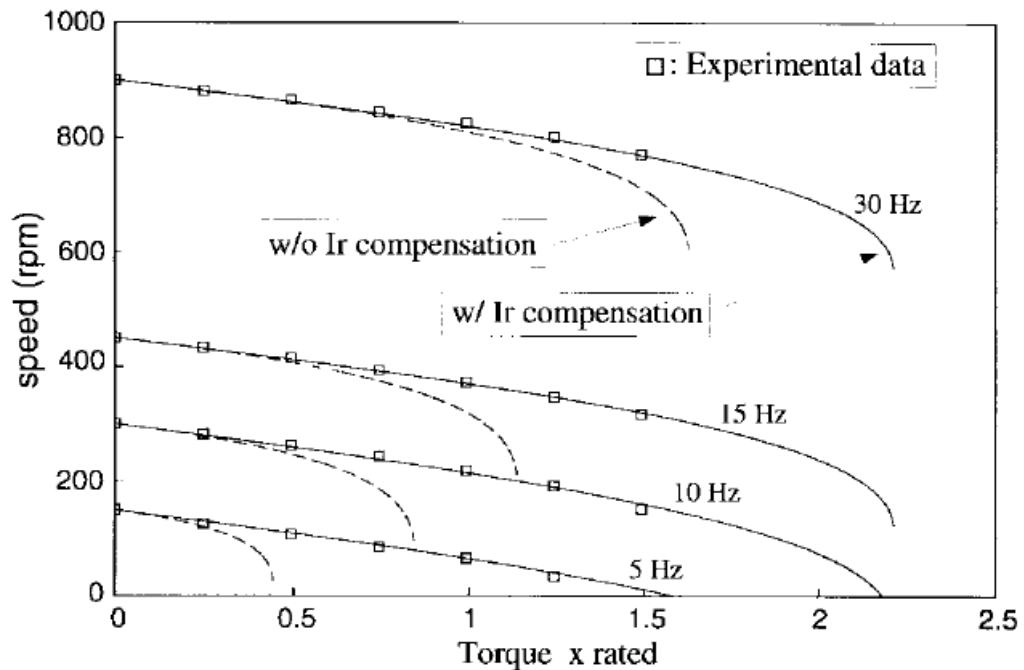


Рисунок 1.22 – Результати експериментального дослідження IR компенсації. Суцільна лінія із компенсацією, штрихова без компенсації. Результати моделювання і експерименту накладаються

Метод хоч і дозволяє керувати двигуном із досить високою точністю, і навіть при низьких частотах близьких до нуля та із навантаженням до 150% від номінального, проте ефективність даної системи керування обмежується діапазоном за низьких частот живлення та обертання валу електродвигуна.

В нашій науковій школі поставлено та виконано задачу по оптимізації режимів роботи електротехнічного комплексу електромобіля з електроприводом постійного струму. Проте, отримані в ході вирішення тієї задачі математичні моделі не можуть бути застосовані для електромобілів із електроприводом змінного струму, оскільки електричні машини постійного і змінного струму є принципово різними та відповідно мають різні механічні характеристики, які представлено на рисунку 1.23.

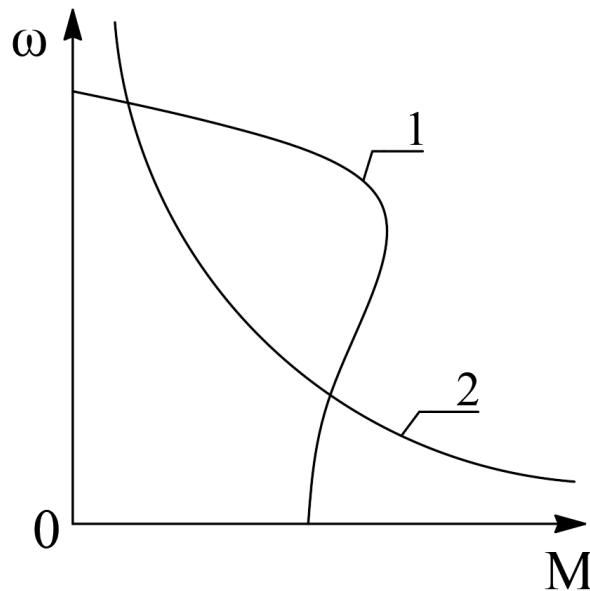


Рисунок 1.23 – Механічні характеристики: 1 – АД, 2 – ДПС з ПЗ

Тому, використану у рівнянні динаміки роботи [75], механічну характеристику для визначення тягового моменту двигуна постійного струму із послідовним збудженням (ДПС з ПЗ) –

$$M_T = k_D I \Phi(I), \quad (1.1)$$

потрібно замінити на ту, яка відповідає асинхронному двигуну – вираз (2.14).

А в роботі [76] представлено математичну модель кривої намагнічування, яка була використана для побудови математичних моделей, а саме:

$$\phi(i) = \begin{cases} -a_2 i^2 + b_2 i, & i \in [0, i_{cn}), \\ a_1 + b_1 i, & i \in [i_{cn}, \infty), \end{cases} \quad (1.2)$$

яка є сукупністю параболи та прямої, які стикаються при значенні аргументу  $i_{cn}$ . Однак її використання потребувало створення математичних моделей по двох напрямках, перший відповідає математичним моделям роботи електромобіля при повному завантаженні, тобто коли електродвигун працює на прямолінійній частині характеристики намагнічування (1.2); другий уже відповідає роботі незавантаженого електромобіля, тобто коли робота електродвигуна відбуватиметься на параболічній частині характеристики (1.2).

Тому для побудови математичних моделей, оптимальних за критерієм витрат енергії, режимів роботи асинхронного електропривода обрано іншу математичну модель кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса (2.19), яка не тільки дає високу точність між залежністю магнітного потоку від електричного струму, а і дозволить уникнути розділення у математичних моделях за ступенем завантаженості електромобіля, що у свою чергу значно спростить розробку систем на основі отриманих результатів.

#### **1.4 Постановка задач дисертаційного дослідження**

Електромобілі, станом на сьогоднішній день, уже займають впевнені позиції в світовому автопарку і за умови розвиненої інфраструктури зарядних станцій уже здатні конкурувати із автомобілями із ДВЗ. Більше того швидкість росту кількості електромобілів в світі неупинно збільшується, чому сприяє як всесвітня залученість до декарбонізації та електрифікації автотранспорту, впровадження економічних та політичних стимулів розвитку електричної мобільності, а також технічного розвитку. Оскільки в найближчому часі буде цілком очікувано, що електромобілі будуть привабливішим видом транспорту ніж автомобілі з ДВЗ. Тому і українським науковцям варто звертати увагу на такий вид транспорту як електромобілі і прикладати зусилля для розвитку електричної мобільності щоб сприяти її впровадженню в Україні.

Серед розглянутих робіт, авторами запропоновано різні методи чи системи які націлені на оптимізацію роботи та зменшення споживання заряду САБ тяговим електроприводом змінного струму. Проте у спробах вирішення даного питання присутні суттєві недоліки. У роботі [60] пропонується зменшення втрат у тяговому електричному двигуні та його системі живлення шляхом зменшення пульсацій струму, які виникають в інверторі постійного струму в змінний, але запропонований спосіб значно ускладнить систему електроприводу електромобіля та значно підвищить його вартість. У роботі [61] пропонується система керування асинхронного на основі гістерезисного регулятора швидкості, але такий регулятор за своєю особливістю створює ті проблеми, над вирішенням яких працювали автори роботи [60], а саме: збільшення струмових пульсацій, через що збільшуються динамічні втрати та виникає електромагнітне випромінювання, яке може порушувати роботу бортових електронних пристроїв електромобіля. Представлена у роботі [62] система керування електромобіля із асинхронним електроприводом, як зазначили самі автори проаналізувавши експериментальні дані, у випадку руху на підйом виявилась менш ефективною у порівнянні із використанням двигуна постійного струму за тих же умов. В роботах [63], [64] та [71] недоліком є те, що використані спрощені (ідеальні) математичні моделі асинхронних двигунів, які не враховують їх нелінійні особливості і тому такі моделі є досить неточними для вирішення питань оптимізації роботи за критерієм оптимального енергоспоживання. В роботі [72] виконана оптимізація руху автомобіля лише по фіксованому маршруту. А у роботі [74] здійснено компенсацію втрат, викликаних спадом напруги в обмотці статора, лише в діапазоні роботи АД на низьких швидкостях.

А тому, розглянувши та проаналізувавши результати уже розв'язаних іншими авторами задач по оптимізації режимів роботи електротехнічного комплексу електромобіля з електроприводом постійного струму, і встановивши неможливість використання отриманих ними моделей для електромобілів із асинхронним електроприводом через їх принципову відмінність, автор даної дисертації прийняв рішення синтезувати математичні моделі та з їх

використанням оптимізувати режими роботи електромобіля з електричним приводом змінного струму асинхронного типу за критерієм мінімуму електричних втрат, враховавши при цьому недоліки, виявлені в результаті аналізу робіт інших авторів – це і визначило тему дисертації

Цілком очевидно, що створення теоретичних засад оптимізації руху електромобіля потрібно розпочати зі створення моделей процесів, що протікають в електротехнічних системах електромобілів, в яких використовується асинхронний двигун в якості електропривода. Даний напрям було вибрано тому, що для легкових електромобілів зазвичай в якості тягового приводу використовують переважно електродвигуни змінного струму, і в більшості випадків - це саме асинхронні електродвигуни. І тому прикладне значення таких теоретичних засад є актуальним, оскільки багато електромобілів здійснюють живлення електроприводів від САБ через інвертори постійного струму в змінний, що дозволяє надійно і ефективно жити електродвигуни змінного струму, в якості яких в більшій мірі використовують дешевші, конструктивно простіші та надійні асинхронні електродвигуни, а дана система дозволяє регулювати швидкість і тягове зусилля в широкому діапазоні, що в свою чергу також дозволяє відмовитись від багатоступінчастої трансмісії, зменшивши тим самим вагу автомобіля, зменшити втрати енергії та підвищити надійність системи в цілому.

В дисертації сформовано наступні наукові задачі, які потрібно розв'язати для досягнення поставленої мети:

1. Синтезувати математичні моделі керування рухом електромобіля, оптимізовані за критерієм мінімуму втрат електричної енергії частотного керування режимами роботи короткозамкнутого асинхронного електродвигуна, який є тяговим в системі привода електромобіля, з використанням математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса, яка з високою точністю зв'язує між собою електричний струм в обмотці статора асинхронного двигуна з магнітним потоком, що створюється полем цього струму, а тому відповідає фізичним умовам реального функціонування

асинхронних електричних машин, та з застосуванням варіаційного варіанту методу Лагранжа, що приводить до поля екстремалей в координатах відносно час, відносна швидкість руху електромобіля та відносний струм в обмотці статора його приводного електродвигуна.

2. Виконати синтез та ідентифікацію математичних моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму на горизонтальному відрізку дороги та розробити обчислювальний метод для побудови траєкторій оптимального руху на горизонтальному відрізку дороги.

3. Виконати синтез та ідентифікацію математичних моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму на спусках, підйомах і поворотах та розробити обчислювальний метод для побудови траєкторій оптимального руху на спусках, підйомах і поворотах, яких зобов'язаний дотримуватись водій електромобіля для реалізації оптимального руху електромобіля.

4. Розробити імітаційні математичні моделі для оцінювання адекватності моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму та провести з їх використанням моделювання оптимального руху електромобіля у горизонтальній площині, на спуск та на підйом.

5. Запропонувати структуру системи підтримки прийняття рішень водієм електромобіля, в основу якої закласти синтезовані математичні моделі оптимального руху, та визначити перспективи її практичної реалізації.

### **1.5 Висновки за матеріалами першого розділу**

1. Виконано аналіз перспектив подальшого розвитку електромобілів на фоні автомобілів із двигунами внутрішнього згорання, із якого визначено, що уже на протязі останніх десяти років тенденція до розвитку та впровадження електромобілів на заміну автомобілям із ДВЗ з кожним роком набуває усе більшої ваги та актуальності.

2. Показано, що сучасні електромобілі уже досягають рівних можливостей в порівнянні із автомобілями на ДВЗ якщо розвинена інфраструктура зарядних станцій, а в сукупності із зусиллями автовиробників,



які займаються виготовленням та розвитком електротранспорту, та державними політичними та економічними заходами які сприяють розвитку електричної мобільності, цілком можливо, що на уже протязі нинішнього десятиліття електромобілі стануть більш привабливими та доступними у порівняння з автомобілями з ДВЗ.

3. За результатами проведеного аналізу розглянутих робіт інших авторів, присвячених теорії електромобілів та їх електроприводів, встановлено, що у запропонованих системах оптимального їх керування чи методах оптимізації споживання енергії САБ присутні такі недоліки як: використовуються спрощені математичні моделі електричних машин змінного струму, які не враховують їх нелінійні магнітні характеристики і тому не відповідають фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин, використання не оптимального гістерезисного регулятора швидкості електропривода у випадку їх застосування на електромобілях, оптимізація системи живлення та зменшення струмових пульсацій за рахунок значного укладення системи САБ та інвертора (що збільшить вартість та знизить надійність електромобіля), а також неможливість використання математичних моделей які були отримані в ході виконання задачі по оптимізації режимів роботи електротехнічного комплексу електромобіля з електроприводом постійного струму в нашій науковій школі у випадку їх застосування для електромобілів із тяговими електроприводами змінного струму асинхронного типу.

4. Здійснено постановку задач дисертаційного дослідження.

Результати, представлених у другому розділі, отримані внаслідок дослідження, опубліковані в роботі [77] автора дисертації.

## РОЗДІЛ 2

### СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ВІДРІЗКУ ДОРОГИ

#### 2.1 Базові математичні моделі динаміки електромобіля та їх приведення до безрозмірного вигляду

Для розв'язання задачі оптимізації руху електромобіля із асинхронним електроприводом спочатку приведемо її формулювання, як це здійснено для електроприводу постійного струму [78]. Отже, потрібно мінімізувати функціонал:

$$E_I = \int_0^{T_I} UI dt = \int_0^{T_I} (U_B - \Delta U) I dt = \int_0^{T_I} U_B \left( 1 - \frac{r_B}{U_B} I \right) I dt, \quad (2.1)$$

де  $E_I$  – кількість використаної електроенергії за час  $T_I$  їзди електромобіля, а  $U_B$ ,  $I$ ,  $r_B$  – базова напруга, струм та внутрішній опір силової акумуляторної батареї САБ, за наявності обмеження у вигляді іншого функціоналу:

$$L_I = \int_0^{T_I} V dt, \quad (2.2)$$

в якому  $V$  – швидкість руху електромобіля, а  $L_I$  – відстань, яку подолає електромобіль за час  $T_I$ , та обмеження у вигляді моделі динаміки руху горизонтальним відрізком дороги, заданої диференціальним рівнянням:

$$m \frac{dV}{dt} = F_T - k_0 F_G - k_1 V - k_2 V^2, \quad (2.3)$$

в якому  $m$  – маса електромобіля,  $V$  – швидкість, з якою рухається електромобіль,  $F_T$  – сили тяги, що створює електродвигун,  $F_G$  вага електромобіля,  $k_0$  – табличний коефіцієнт, який залежить від матеріалу поверхні дороги,  $k_1$  – коефіцієнт, що залежить від площі бічної поверхні електромобіля,  $k_2$  – коефіцієнт, що залежить від площі поперечного перерізу електромобіля.

А з врахуванням того, що тяговий електромагнітний момент  $M_T$  електродвигуна зв'язаний з силою тяги  $F_T$  та радіусом колеса  $R$  співвідношенням:

$$F_T = \frac{M_T}{R}, \quad (2.4)$$

та з врахуванням базових величин - основних:

- для тягової сили  $F_T$  її значення  $F_H$  в номінальному режимі;
- для моменту  $M$  на валу його номінальне значення  $M_H$ ;
- для швидкості  $V$  руху електромобіля її номінальне значення  $V_H$ ;
- для струму  $I$  САБ його номінальне значення  $I_H$ ;
- для напруги  $U$ , що прикладається до зажимів тягового електродвигуна, напругу  $U_B$  акумуляторної батареї при її повному заряді;
- для магнітного потоку  $\Phi$  його значення  $\Phi_H$  при номінальному струмі намагнічування  $I_H$ , тобто  $\Phi_H = \Phi(I_H)$ ,

та похідних:

- для часу  $t$  – електромеханічну сталу  $T_M$ , яка зв'язана з основними базовими величинами співвідношенням:

$$T_M = \frac{mV_H}{F_H}; \quad (2.5)$$

- для відстані  $L$  – величину  $L_H$ , яка зв'язана з основними базовими величинами співвідношенням:

$$L_H = V_H T_M; \quad (2.6)$$

- для енергії  $E$  постійного струму акумуляторної батареї величину  $E_H^I$ , яка зв'язана з основними базовими величинами співвідношенням:

$$E_H^I = U_B I_H T_M, \quad (2.7)$$

співвідношення (2.1), (2.2), (2.3), набувають безрозмірного вигляду:

$$e_i = \int_0^{\tau_i} (1 - \alpha i) i d\tau, \quad (2.8)$$

$$l_i = \int_0^{\tau_i} v d\tau, \quad (2.9)$$

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{T_M M_T}{m V_H R} - f_0 - f_1 v - f_2 v^2, \quad (2.10)$$

де:

$$v = \frac{V}{V_H}; \tau = \frac{t}{T_M}; i = \frac{I}{I_H}; e_i = \frac{E_I}{E_H^I} = \frac{E_I}{U_B I_H T_M}; \tau_i = \frac{T_I}{T_M}; \quad (2.11)$$

$$f_0 = \frac{k_0 F_G T_M}{m V_H}; f_1 = \frac{k_1 T_M}{m}; f_2 = \frac{k_2 V_H T_M}{m}; \alpha = \frac{r_B I_H}{U_B}; l_i = \frac{L_I}{V_H T_M}, \quad (2.12)$$

Порівнюючи приведені вище вирази з тими, що наведені в роботі [78], бачимо, що вони відрізняються першим членом у правій частині рівняння (2.10), що, як буде показано в основній частині дослідження, приводить до суттєвої зміни кінцевих результатів оптимізації.

## 2.2 Синтез математичних моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму на горизонтальну відрізок дороги

Викладення матеріалу почнемо з нагадування про те, що в роботі [79] приведено один із варіантів розв'язання сформульованої нами задачі, але за умови, по-перше, що характеристика намагнічування  $\Phi = \Phi(I)$  осердя статора АД є аж занадто ідеалізованою і являє собою сукупність двох прямих, одна з яких з'єднує початок системи координат  $(0,0)$  з точкою  $(I_H, \Phi_H)$ , а друга, розпочинаючись з точки  $(I_H, \Phi_H)$ , проходить паралельно осі абсцис (струму), А другою умовою, яку використав автор роботи [79], є умова гіперболічної залежності електромагнітного моменту від ковзання  $s$ , де:

$$s = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c} = \frac{f_c - f}{f_c}, \quad (2.13)$$

а  $\omega$ ,  $\omega_c$  – відповідно, поточна кутова швидкість обертання валу ротора АД, якій відповідає частота  $f$  та кутова швидкість обертання вектора електричного струму живлення, який подається в обмотку статора АД, якій відповідає частота  $f_c$ .

За цих умов мінімум електричних втрат в АД при використанні частотного регулювання його швидкості, як показано в роботі [79], досягається шляхом такого регулювання частоти живлення  $f_c$ , за якого підтримується на номінальному рівні  $\Phi_H$  магнітний потік  $\Phi$ .

Але, як показано в роботі [80], моделювання гіперболічною функцією залежності електромагнітного моменту  $M_T$  асинхронного електродвигуна від ковзання  $s$  не відповідає характеру електромеханічних процесів в АД, а тому є хибним і приводить до результатів, що йдуть врозріз з реальними характеристиками АД, оскільки в дійсності ця залежність має вигляд

$$M_T = M_H \left( \frac{s}{s_H} \right) \left( \frac{U}{U_H} \right) \left( \frac{\Phi}{\Phi_H} \right) \frac{1 + \left( \frac{x_p}{r_p} \right)^2 s_H^2}{1 + \left( \frac{x_p}{r_p} \right)^2 s^2} = M_H s_* u \varphi \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2}, \quad (2.14)$$

де  $U$  – напруга, що подається на обмотку статора АД,  $U_H$  – номінальне значення цієї напруги,  $r_p$ ,  $x_p$  – відповідно, активний та реактивний опір ротора АД в загальмованому стані, безрозмірні величини мають вигляд:

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_H}, \quad (2.15)$$

$$u = \frac{U}{U_H}, \quad (2.16)$$

$$s_* = \frac{s}{s_H}, \quad (2.17)$$

а параметри мають вигляд:

$$a = \frac{1}{s_H}, \quad b = \frac{x_p}{r_p} \quad (2.18)$$

А як витікає із результатів роботи [81], використана в роботі [79] ідеалізація характеристики намагнічування  $\phi = \phi(i)$  приводить до значних похибок в розрахунках при її використанні, тож суттєво зменшити ці похибки можна, якщо математичну модель кривої намагнічування, приведені з реальними значеннями

фізичних параметрів, взятими, наприклад, з роботи [82], задати у вигляді зваженого оберненого гіперболічного синуса [83], тобто, у вигляді

$$\varphi = 1,136 \operatorname{Arshi} = 1,136 \ln(i + \sqrt{i^2 + 1}) \quad (2.19)$$

Підставляючи вираз (2.14) у рівняння (2.10) та враховуючи співвідношення (2.4), (2.5), (2.11), (2.15), приведемо це рівняння до вигляду:

$$\frac{dv}{d\tau} = \varphi u \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2} s_* - f_0 - f_1 v - f_2 v^2, \quad (2.20)$$

а з врахуванням виразу (2.19) до вигляду:

$$\frac{dv}{d\tau} = 1,136 \ln(i + \sqrt{i^2 + 1}) u \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2} s_* - f_0 - f_1 v - f_2 v^2 \quad (2.21)$$

З врахуванням здійснених вище перетворень наша задача отримала наступне формулювання: знайти такі закони для відносної швидкості руху  $v(\tau)$  електромобіля та відносного струму  $i(\tau)$  у обмотці статора АД, які забезпечать мінімум функціоналу (2.8) в умовах дотримання обмежень (2.9) та (2.21).

Аналізуючи рівняння динаміки (2.21) електромобіля, бачимо, що впливати на його швидкість руху та струм в асинхронному двигуну електропривода ми можемо або змінюючи ефективне значення напруги, що прикладається до обмотки статора цього електродвигуна, або змінюючи частоту цієї напруги, яка виразами (2.13) та (2.17) зв'язана з відносним ковзанням ротора АД.

Як відомо [78], регулювання кутової швидкості обертання роторів приводних асинхронних електродвигунів в усіх легкових електромобілів здійснюється шляхом змін частоти струму, що подається в обмотку статора, реалізація яких при інверторному перетворенні напруги постійного струму силової акумуляторної батареї в напругу змінного струму, потрібного для живлення АД, не викликає труднощів і дозволяє у рівнянні (2.21) відносно напругу  $u$  вважати константою. Для спрощення викладок приймемо, що в інверторі і обмотці статора втрачається до 12% підведеної напруги в її ефективному значенні, тобто, покладемо, що

$$1,136 u = 1 \quad (2.22)$$

Це дає нам право при частотному регулюванні кутової швидкості обертання ротора АД записати рівняння (2.21) у вигляді:

$$\frac{dv}{d\tau} = \ln\left(i + \sqrt{i^2 + 1}\right) \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2} s_* - f_0 - f_1 v - f_2 v^2 \quad (2.23)$$

Розпочнемо розв'язання сформульованої задачі з синтезу функції Лагранжа, яка для приведених вище умов набуває вигляду:

$$L(\tau, u, i, v, s_*, \psi, u', i', v', s_*', \psi') = (1 - \alpha i)i + \lambda_1 \left( v' - \ln(i + \sqrt{i^2 + 1}) \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2} s_* + f_0 + f_1 v + f_2 v^2 \right) + \lambda_2 (\psi' - v) \quad (2.24)$$

Оскільки функція Лагранжа (2.24) містить 4 залежних від відносного часу  $\tau$  змінних  $s_*$ ,  $v$ ,  $i$ ,  $\psi$ , то аби вони були екстремаліями, як відомо, наприклад, із роботи [79], їх потрібно знаходити із системи рівнянь:

$$\begin{cases} L_i - \frac{d}{d\tau} L_{i'} = 0, \\ L_v - \frac{d}{d\tau} L_{v'} = 0, \\ L_\psi - \frac{d}{d\tau} L_{\psi'} = 0, \\ L_{s_*} - \frac{d}{d\tau} L_{s_*'} = 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

Беручи частинні похідні  $L_i$ ,  $L_{i'}$ ,  $L_v$ ,  $L_{v'}$ ,  $L_\psi$ ,  $L_{\psi'}$ ,  $L_{s_*}$ ,  $L_{s_*'}$  від функції Лагранжа (2.24) по відповідним змінним, позначеним в нижніх індексах цих частинних похідних, і підставляючи отримані вирази в систему рівнянь (2.25), отримаємо цю систему рівнянь у вигляді:

$$\begin{cases} 1 - 2\alpha i - \lambda_1 \frac{(a^2 + b^2) s_*}{a^2 + b^2 s_*^2} \frac{1}{\sqrt{i^2 + 1}} = 0, \\ \lambda_1 (f_1 + 2f_2 v) - \lambda_2 - \frac{d\lambda_1}{d\tau} = 0, \\ -\frac{d\lambda_2}{d\tau} = 0, \\ -\lambda_1 \ln\left(i + \sqrt{i^2 + 1}\right) \frac{(a^2 + b^2)(a^2 - b^2 s_*^2)}{(a^2 + b^2 s_*^2)^2} = 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

З врахуванням того, що:

$$\begin{cases} a^2 + b^2 s_*^2 \neq 0, \\ \sqrt{i^2 + 1} \neq 0, \end{cases} \quad (2.27)$$

систему рівнянь (2.26) можна трансформувати у систему рівнянь:

$$\begin{cases} (a^2 + b^2 s_*^2) \sqrt{i^2 + 1} (1 - 2\alpha i) - \lambda_1 (a^2 + b^2) s_* = 0, \\ \frac{d\lambda_1}{d\tau} - \lambda_1 (f_1 + 2f_2\nu) + \lambda_2 = 0, \\ -\frac{d\lambda_2}{d\tau} = 0, \\ -\lambda_1 \ln(i + \sqrt{i^2 + 1}) (a^2 + b^2) (a^2 - b^2 s_*^2) = 0, \end{cases} \quad (2.28)$$

яка матиме ті ж розв'язки, що і система (2.26).

Із третього рівняння системи (2.28) маємо:

$$\lambda_2 = -C_2, \quad (2.29)$$

де  $C_2$  – поки-що невідома константа, підставляючи яку в друге рівняння системи (2.28), отримаємо лінійне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку

$$\frac{d\lambda_1}{d\tau} - (f_1 + 2f_2\nu)\lambda_1 = C_2, \quad (2.30)$$

розв'язком якого є функція –

$$\lambda_1(\tau) = C_1 e^{(f_1\tau + 2f_2\int \nu d\tau)} - \frac{C_2}{f_1 + 2f_2\nu}, \quad (2.31)$$

де  $C_1$  – ще одна поки-що невідома константа.

Підставляючи вираз (2.31) у перше та четверте рівняння системи (2.28), отримаємо еквівалентну їй систему, але уже лише двох рівнянь:

$$\begin{cases} (a^2 + b^2 s_*^2) \sqrt{i^2 + 1} (1 - 2\alpha i) - \left( C_1 e^{(f_1\tau + 2f_2\int \nu d\tau)} - \frac{C_2}{f_1 + 2f_2\nu} \right) (a^2 + b^2) s_* = 0, \\ -\left( C_1 e^{(f_1\tau + 2f_2\int \nu d\tau)} - \frac{C_2}{f_1 + 2f_2\nu} \right) \ln(i + \sqrt{i^2 + 1}) (a^2 + b^2) (a^2 - b^2 s_*^2) = 0 \end{cases} \quad (2.32)$$

Розглянемо друге рівняння системи (2.32). Оскільки, як легко переконатись, аналізуючи вираз (2.31):

$$\lambda_1(\tau) \neq 0 \quad \text{для} \quad \forall \tau \geq 0, \quad (2.33)$$



то друге рівняння системи (2.32) може виконуватись лише за умови:

$$a^2 - b^2 s_*^2 = 0, \quad (2.34)$$

із якої витікає, що:

$$s_* = \frac{a}{b}. \quad (2.35)$$

Підставляючи вираз (2.35) в перше рівняння системи (2.32) та в рівняння динаміки (2.23), отримаємо систему двох рівнянь з двома залежними від відносного часу  $\tau$  невідомими  $i$ ,  $v$ :

$$\begin{cases} 2a\sqrt{i^2 + 1}(1 - 2ai) - \left( C_1 e^{(f_1\tau + 2f_2 \int v d\tau)} - \frac{C_2}{f_1 + 2f_2 v} \right) \frac{(a^2 + b^2)}{b} = 0, \\ \frac{dv}{d\tau} = \ln\left(i + \sqrt{i^2 + 1}\right) \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} - f_0 - f_1 v - f_2 v^2, \end{cases} \quad (2.36)$$

на розв'язках яких:

$$i = i(C_1, C_2, C_3, \tau), \quad v = v(C_1, C_2, C_3, \tau) \quad (2.37)$$

досягатиметься мінімум функціоналу (2.8) в умовах дії обмежень (2.9), (2.10).

### 2.3 Ідентифікація математичних моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму горизонтальним відрізком дороги

Перше, що нам потрібно здійснити для ідентифікації математичних моделей оптимального руху (2.37) електромобіля, це визначити сталі інтегрування  $C_1$ ,  $C_2$ , що увійшли у верхнє рівняння системи (2.36).

Для цього ми використаємо початкові –

$$\begin{cases} i(0) = i_n, \\ v(0) = 0, \\ \int_0^0 v(\tau) d\tau = 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

та граничні –

$$\begin{cases} i(\tau_l) = 0, \\ v(\tau_l) = 0, \\ \int_0^{\tau_l} v(\tau) d\tau = l_l \end{cases} \quad (2.39)$$

Підставляючи спочатку вирази (2.38) у перше рівняння системи (2.36), а потім підставляючи у це ж рівняння вирази (2.39), отримаємо систему двох рівнянь з двома невідомими  $C_1, C_2$ , а саме:

$$\begin{cases} 2a\sqrt{i_n^2+1}(1-2\alpha i_n) - \left(\frac{a^2+b^2}{b}\right)\left(c_1 - \frac{c_2}{f_1}\right) = 0 \\ 2a - \left(\frac{a^2+b^2}{b}\right)\left(c_1 e^{(f_1\tau_l+2f_2l_l)} - \frac{c_2}{f_1}\right) = 0, \end{cases} \quad (2.40)$$

або –

$$\begin{cases} 2a\sqrt{i_n^2+1}(1-2\alpha i_n) - \left(\frac{a^2+b^2}{b}\right)C_1 = -\left(\frac{a^2+b^2}{b}\right)\frac{C_2}{f_1}, \\ 2a - \left(\frac{a^2+b^2}{b}\right)C_1 e^{(f_1\tau_l+2f_2l_l)} = -\left(\frac{a^2+b^2}{b}\right)\frac{C_2}{f_1} \end{cases} \quad (2.41)$$

Оскільки праві частини рівнянь в системі (2.41) однакові, то ми маємо право прирівняти і їх ліві частини та отримати рівняння з однією невідомою  $C_1$  у вигляді –

$$2a\sqrt{i_n^2+1}(1-2\alpha i_n) - \left(\frac{a^2+b^2}{b}\right)C_1 = 2a - \left(\frac{a^2+b^2}{b}\right)C_1 e^{(f_1\tau_l+2f_2l_l)}, \quad (2.42)$$

розв'язуючи яке відносно цієї невідомої, отримаємо вираз

$$C_1 = \left(\frac{2ab}{a^2+b^2}\right) \frac{\sqrt{i_n^2+1}(1-2\alpha i_n) - 1}{1 - e^{(f_1\tau_l+2f_2l_l)}}, \quad (2.43)$$

підставляючи в який числові значення усіх його параметрів, знайдемо числове значення  $C_1^*$  цієї невідомої.

А підставляючи вираз (2.43) в друге рівняння системи (2.41), отримаємо рівняння з однією невідомою  $C_2$  у вигляді –

$$2a - 2a \left( \frac{\sqrt{i_n^2 + 1} (1 - 2\alpha i_n) - 1}{1 - e^{(f_1 \tau_1 + 2f_2 l_1)}} \right) e^{(f_1 \tau_1 + 2f_2 l_1)} = - \left( \frac{a^2 + b^2}{b} \right) \frac{C_2}{f_1}, \quad (2.44)$$

розв'язуючи яке відносно цієї невідомої, отримаємо вираз

$$C_2 = \left( \frac{2abf_1}{a^2 + b^2} \right) \left\{ \frac{\sqrt{i_n^2 + 1} (1 - 2\alpha i_n) - 1}{1 - e^{(f_1 \tau_1 + 2f_2 l_1)}} e^{(f_1 \tau_1 + 2f_2 l_1)} - 1 \right\}, \quad (2.45)$$

підставляючи в який числові значення усіх його параметрів, знайдемо числове значення  $C_2^*$  цієї невідомої.

У свою чергу, підставляючи отримані з виразів (2.43), (2.45) числові значення  $C_1^*$ ,  $C_2^*$  в систему рівнянь (2.36), отримаємо систему двох рівнянь:

$$\begin{cases} 2a\sqrt{i^2 + 1}(1 - 2\alpha i) - \left( \frac{a^2 + b^2}{b} \right) \left( C_1^* e^{(f_1 \tau + 2f_2 \int v d\tau)} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2 v} \right) = 0, \\ \frac{dv}{d\tau} = \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} \ln(i + \sqrt{i^2 + 1}) - f_0 - f_1 v - f_2 v^2, \end{cases} \quad (2.46)$$

розв'язками яких будуть уже функції

$$i = i(\tau, C_3), \quad v = v(\tau, C_3) \quad (2.47)$$

на яких досягатиметься мінімум функціоналу (2.1) в умовах дії обмежень (2.3), (2.2) та дотримання початкових умов (2.38) і граничних (2.39), які і є ідентифікованими моделями оптимального руху електромобіля. Але, слід зауважити, що це будуть не математичні моделі, а кібернетичні, або, як їх ще називають, комп'ютерні моделі, оскільки система нелінійних рівнянь (2.46) розв'язків, визначених конкретними математичними виразами, не має, тобто, для неї не можна аналітично визначити значення сталої інтегрування  $C_3$ , а її можна розв'язувати лише методом послідовних наближень, застосовуючи комп'ютери, які реалізовуватимуть відповідний алгоритм, до побудови якого ми і перейдемо.

## 2.4 Розробка обчислювального методу для побудови траєкторій оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму горизонтальним відрізком дороги

Оскільки друге рівняння в системі (2.46) відображає динаміку електромобіля, то, використовуючи саме його, ми і будемо починати синтезувати розрахункові співвідношення нашого алгоритму. Для точки  $\tau_k$ ,  $k=0,1,2,\dots$  це рівняння можна переписати і так –

$$\frac{\Delta v_k}{\Delta \tau_k} = \frac{v_{k+1} - v_k}{\tau_{k+1} - \tau_k} \approx \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} \ln\left(i_k + \sqrt{i_k^2 + 1}\right) - f_0 - f_1 v_k - f_2 v_k^2, \quad (2.48)$$

або –

$$v_{k+1} \approx v_k + \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln\left(i_k + \sqrt{i_k^2 + 1}\right) - (f_0 + f_1 v_k + f_2 v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k), \quad (2.49)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots; \quad \tau_0 = 0, \quad v_0 = 0, \quad i_0 = i_n$$

Із виразу (2.49) бачимо, що для того, щоб знайти чисельне значення швидкості  $v_{k+1}$  в момент часу  $\tau_{k+1}$  необхідно знати не лише чисельне значення цієї швидкості  $v_k$  в попередній момент часу  $\tau_k$ , але і чисельне значення струму  $i_k$  у цей же попередній момент часу. Тож необхідно розробити процедуру його обчислення, використавши перше рівняння системи (2.46), яке отримане шляхом розв'язання задачі мінімізації витрат електроенергії, а тому чисельні значення струму, знайдені з цього рівняння лягатимуть на струмову складову траєкторії оптимального руху електромобіля. І оскільки це рівняння не лише нелінійне, але ще і трансцендентне, то для його розв'язання необхідно застосовувати ітераційну процедуру послідовних наближень, різноманітні варіанти якої представлено в роботі [84]. Ми використаємо варіант –

$$i_k(n) = i_k(n-1) - \frac{C_4}{n} \psi_k(i, v, \tau), \quad n = 1, 2, \dots; \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.50)$$

де  $n$  – це номер ітерації,  $C_4$  - константа, яку задає особа, що реалізує ітераційний процес, а  $\psi_k(i, v, \tau)$  – це ліва частина першого рівняння системи (2.46), в яку підставили

$$i = i_k(n-1), v = v, d\tau = \tau_{k+1} - \tau_k, \int v d\tau = v_k(\tau_{k+1} - \tau_k), \quad (2.51)$$

тобто –

$$\psi_k(i, v, \tau) = 2a\sqrt{(i_k(n-1))^2 + 1}(1 - 2\alpha i_k(n-1)) - \left(\frac{a^2 + b^2}{b}\right) \left( C_1^* e^{(f_1\tau_k + 2f_2v_k(\tau_{k+1} - \tau_k))} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2v_k} \right), \quad (2.52)$$

а тому вираз (2.50) набирає вигляду –

$$i_k(n) = i_k(n-1) - \frac{C_4}{n} \left\{ 2a\sqrt{(i_k(n-1))^2 + 1}(1 - 2\alpha i_k(n-1)) - \left(\frac{a^2 + b^2}{b}\right) \left( C_1^* e^{(f_1\tau_k + 2f_2v_k(\tau_{k+1} - \tau_k))} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2v_k} \right) \right\} \quad (2.53)$$

Ітераційний процес (2.53) зупинятимемо, коли виконуватиметься умова

$$|i_k(n) - i_k(n-1)| \leq \varepsilon, \quad (2.54)$$

де  $\varepsilon$  – прийняте нами числове значення відносної похибки визначення струму в ітераційному процесі, з оглядом на яку ми прийматимемо, що

$$i_k(n) = i_k \quad (2.55)$$

І саме це значення струму, яке визначається за виразом (2.55), ми і підставлятимемо у вираз (2.49) для визначення наступного значення  $v_{k+1}$  швидкості.

Цілком очевидно, що чим меншим ми будемо брати часовий відрізок

$$\Delta\tau_k = \tau_{k+1} - \tau_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.56)$$

тим з меншими похибками ми визначатимемо координати  $i_k, v_k$  траєкторії оптимального руху електромобіля, але обмеженням в бік зменшення цього відрізка у нас виступатиме часовий відрізок

$$\Delta\tau_n = \tau_n - \tau_0, \quad (2.57)$$

за який завершується ітераційний процес (2.50).

Отже ще однією умовою, яку необхідно буде виконувати для реалізації запропонованого методу ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля, у нашому випадку буде умова

$$\Delta\tau_k > \Delta\tau_n, \quad \text{для } \forall k, \forall n \quad (2.58)$$

## 2.5 Висновки за матеріалами другого розділу

1. Запропоновано розв'язувати задачу оптимального за критерієм мінімуму втрат електричної енергії частотного керування режимами роботи короткозамкнутого асинхронного електродвигуна, який є тяговим в системі привода електромобіля, з використанням математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса, яка з високою точністю зв'язує між собою електричний струм в обмотці статора асинхронного двигуна з магнітним потоком, який створюється полем цього струму, а тому відповідає фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин.

2. Приведені результати розв'язання задачі оптимального частотного керування режимами короткозамкнутого асинхронного електродвигуна в умовах його роботи в якості тягового в системі привода електромобіля, які отримані з застосуванням варіаційного варіанту методу Лагранжа та математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса і які приводять до поля екстремалей в координатах відносний час, відносна швидкість руху електромобіля та відносний струм в обмотці статора його приводного електродвигуна.

3. Запропоновано метод ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом, на першому етапі реалізації якого визначаються константи, котрі мають місце у цих моделях внаслідок використання двічі операції інтегрування в процесі їх синтезу, на другому етапі реалізації пропонується прямий алгоритм визначення швидкості електромобіля на основі моделі його динаміки, а на третьому етапі синтезується ітераційний алгоритм визначення струму, зв'язаного зі швидкістю електромобіля співвідношенням, отриманим в результаті розв'язання задачі оптимізації методом невизначених множників Лагранжа.

При викладенні змісту другого розділу дисертації використані результати дослідження, що опубліковані в роботах [85], [86] автора дисертації.

## РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ  
ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗМІННОГО СТРУМУ НА  
СПУСКАХ, ПІДЙОМАХ І ПОВОРОТАХ

**3.1 Синтез математичних моделей оптимального руху електромобіля з електроприводом змінного струму по схилах і підйомах дороги**

В роботі [87], що теж виконана у нашій науковій школі, задача, що сформульована вище, уже розв'язувалась, але там мова йшла про рух на спуск та на підйом електромобіля вантажного з електроприводом постійного струму на основі електродвигуна з послідовним збудженням, тягова сила якого створюється зовсім за іншим законом ніж в асинхронного тягового електродвигуна, а тому отримані в роботі [87] математичні моделі оптимального руху на спуск та на підйом для нашого випадку непридатні.

Але що стосується рівняння динаміки руху електромобіля, то в загальному вигляді і у нашому випадку воно буде таким же, як і в роботі [87], тобто, при русі на спуск – це

$$m \frac{dV}{dt} = F_T - k_0 F_G \cos \beta + F_G \sin \beta - k_1 V - k_2 V^2, \quad (3.1)$$

а при русі на підйом – це

$$m \frac{dV}{dt} = F_T - k_0 F_G \cos \beta - F_G \sin \beta - k_1 V - k_2 V^2 \quad (3.2)$$

Порівнюючи рівняння (3.1) та (3.2) динаміки руху електромобіля, відповідно, на спуск та на підйом з рівнянням (2.3) динаміки його руху горизонтальним відрізком дороги, бачимо, що вони відрізняються появою двочлена

$$(-k_0 F_G \cos \beta + F_G \sin \beta) \quad (3.3)$$

замість одночлена  $(-k_0 F_G)$  в режимі спуску, та появою двочлена

$$(-k_0 F_G \cos \beta - F_G \sin \beta) \quad (3.4)$$

замість одноклена  $(-k_0F_G)$  в режимі підйому. Ця трансформація рівняння (2.3) обумовлена тим, що сила ваги електромобіля  $F_G$ , яка під час руху горизонтальним відрізком дороги створює лише силу тертя коліс об дорогу  $k_0F_G$ , що протидіє силі тяги  $F_T$ , а тому входить зі знаком мінус, під час руху на спуск та на підйом з нахилом дороги до горизонтальної площини під кутом  $\beta$  своїми проекціями на вісь дороги та на вісь, перпендикулярну дорозі, створює пару сил:  $k_0F_G \cos\beta$ ,  $F_G \sin\beta$  перша із яких є трансформованою силою тертя коліс об дорогу, а тому і в рівняння (3.1) і в рівняння (3.2) входить зі знаком мінус, а друга є при спуску додатковою силою тяги, а тому входить у рівняння (3.1) зі знаком плюс, а при підйомі є додатковою силою опору, а тому у рівняння (3.2) входить зі знаком мінус. Рисунок 3.1, який це схематично відображає, взятий із роботи [87], приведено нижче

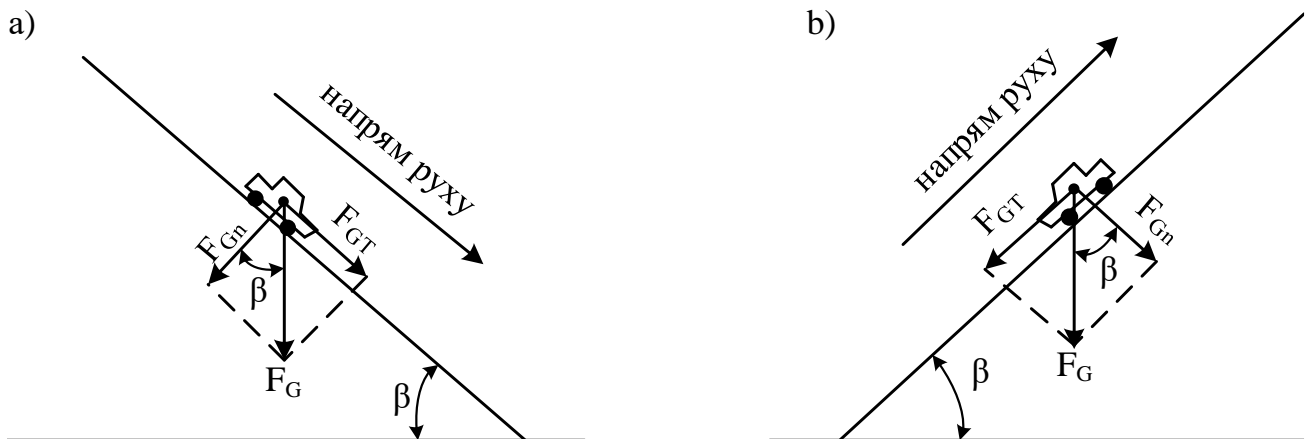


Рисунок 3.1 – Векторні діаграми сил, створюваних силою ваги  $F_G$  автомобіля під час руху на спуск (a) та на підйом (b)

Якщо, скориставшись тією ж процедурою, що приведена в роботі [85], ми переведемо рівняння динаміки (3.1) і (3.2) до безрозмірного вигляду, то отримаємо аналог рівняння (3.1), що описує динаміку електромобіля на спуску дороги, у вигляді –

$$\frac{dv}{d\tau} = \ln\left(i + \sqrt{i^2 + 1}\right) \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2} s_* + f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1 v - f_2 v^2, \quad (3.5)$$

та аналог рівняння (3.2), що описує динаміку електромобіля на підйомі дороги, у вигляді –



$$\frac{dv}{d\tau} = \ln\left(i + \sqrt{i^2 + 1}\right) \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2} s_* - f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1 v - f_2 v^2, \quad (3.6)$$

Із процедури переведення рівнянь динаміки електромобіля до безрозмірного вигляду, викладеної в роботі [85], витікає, що додатковий коефіцієнт  $f_0^*$ , якого немає в рівнянні (2.3), але який появився у рівняннях (3.1) та (3.2), обчислюється за виразом

$$f_0^* = \frac{F_G T_M}{m V_H}. \quad (3.7)$$

за умови, що  $m$  – це маса електромобіля з пасажирами,  $F_G$  – це сила ваги електромобіля, створюваної його масою,  $V_H$  – це швидкість електромобіля, яку він розвиває на горизонтальній ділянці дороги при номінальній силі тяги, а  $T_M$  – це електромеханічна стала часу, яка розраховується за виразом –

$$T_M = \frac{m V_H}{F_H}; \quad (3.8)$$

в якому  $F_H$  – номінальна сила тяги електромобіля, створювана його електроприводом.

Якщо взяти до уваги, що ні двочлен (3.3), ні двочлен (3.4) не є безпосередньо залежними від  $i, i', v, v', \psi, \psi', s_*, s_*'$  – а саме по цих змінних, як показано в нашій роботі [85], беруться частинні похідні в рівняннях Ейлера-Лагранжа, то навіть після уведення у функцію Лагранжа обмеження не у вигляді (2.23), а у вигляді (3.5) чи (3.6) ми все одно в якості розв'язку цієї системи рівнянь отримаємо перше рівняння системи (2.36), а тому синтезуватимемо моделі оптимального руху у вигляді (2.37), виходячи з системи рівнянь, аналогічної системі (2.36), в якій другим рівнянням замість рівняння (2.23) буде рівняння (3.5) для руху на спуск та рівняння (3.6) під час руху на підйом, тобто, моделі оптимального руху електромобіля під час руху на спуск необхідно синтезувати із системи рівнянь:

$$\begin{cases} 2a\sqrt{i^2 + 1}(1 - 2\alpha i) - \left( C_1 e^{(f_1\tau + 2f_2 \int v d\tau)} - \frac{C_2}{f_1 + 2f_2 v} \right) \frac{(a^2 + b^2)}{b} = 0, \\ \frac{dv}{d\tau} = \ln\left(i + \sqrt{i^2 + 1}\right) \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} + f_0^* \sin \beta - f_0 \cos \beta - f_1 v - f_2 v^2, \end{cases} \quad (3.9)$$

а моделі оптимального руху електромобіля під час руху на підйом необхідно синтезувати із системи рівнянь:

$$\begin{cases} 2a\sqrt{i^2+1}(1-2\alpha i) - \left( C_1 e^{(f_1\tau+2f_2\int v d\tau)} - \frac{C_2}{f_1+2f_2v} \right) \frac{(a^2+b^2)}{b} = 0, \\ \frac{dv}{d\tau} = \ln\left(i + \sqrt{i^2+1}\right) \frac{(a^2+b^2)}{2ab} - f_0^* \sin\beta - f_0 \cos\beta - f_1v - f_2v^2, \end{cases} \quad (3.10)$$

І ці моделі оптимального руху, які у дискретному варіанті під час руху електромобіля по горизонтальному відрізку дороги в роботі [86] були отримані у вигляді (2.49), (2.53), для нашої задачі під час руху на спуск матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} v_{k+1} &\approx v_k + \frac{(a^2+b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln\left(i_k + \sqrt{i_k^2+1}\right) - (-f_0^* \sin\beta_k + \\ &\quad + f_0 \cos\beta_k + f_1v_k + f_2v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k), \\ k &= 0, 1, 2, \dots; \quad \tau_0 = 0, \quad v_0 = v_{0s}, \quad i_0 = i_{0s}, \quad \beta_k \in \left[0, \beta_{\max} < \frac{\pi}{2}\right], \\ i_k(n) &= i_k(n-1) - \frac{C_4}{n} \left\{ 2a\sqrt{(i_k(n-1))^2+1}(1-2\alpha i_k(n-1)) - \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{a^2+b^2}{b}\right) \left( C_1^* e^{(f_1\tau_k+2f_2v_k(\tau_{k+1}-\tau_k))} - \frac{C_2^*}{f_1+2f_2v_k} \right) \right\}, \\ n &= 1, 2, \dots, N \Rightarrow |i_{N-1} - i_N| \leq \varepsilon, \end{aligned} \quad (3.11)$$

а під час руху на підйом матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} v_{k+1} &\approx v_k + \frac{(a^2+b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln\left(i_k + \sqrt{i_k^2+1}\right) - (f_0^* \sin\beta_k + \\ &\quad + f_0 \cos\beta_k + f_1v_k + f_2v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k), \\ k &= 0, 1, 2, \dots; \quad \tau_0 = 0, \quad v_0 = v_{0p}, \quad i_0 = i_{0p}, \quad \beta_k \in \left[0, \beta_{\max} < \frac{\pi}{2}\right], \\ i_k(n) &= i_k(n-1) - \frac{C_4}{n} \left\{ 2a\sqrt{(i_k(n-1))^2+1}(1-2\alpha i_k(n-1)) - \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{a^2+b^2}{b}\right) \left( C_1^* e^{(f_1\tau_k+2f_2v_k(\tau_{k+1}-\tau_k))} - \frac{C_2^*}{f_1+2f_2v_k} \right) \right\}, \\ n &= 1, 2, \dots, N \Rightarrow |i_{N-1} - i_N| \leq \varepsilon, \end{aligned} \quad (3.12)$$

де  $\tau_0$  – в моделях (3.11) відносний час початку руху на спуск, а в моделях (3.12) відносний час початку руху на підйом,  $i_{0s}$ ,  $v_{0s}$  – чисельні значення відносного струму та відносної швидкості на початку руху на спуск,  $i_{0p}$ ,  $v_{0p}$  – чисельні значення відносного струму та відносної швидкості на початку руху на підйом, а  $\varepsilon$  – задане нами чисельне значення похибки обчислень, від якого

залежить кількість ітерацій  $N$  при визначенні чисельних значень відносного струму  $i_k$  на кроці  $k$ .

Аналізуючи дискретні математичні моделі (3.11), (3.12), якими задаються закони оптимального руху електромобіля на спуск та на підйом, бачимо, що для запуску ітераційних алгоритмів, за якими обчислюється кожне наступне оптимальне значення відносної швидкості електромобіля та відносного струму його тягового електродвигуна, нам необхідно знати числові значення відносного струму  $i_0$  та відносної швидкості  $v_0$  на початку руху на спуск ( $i_{0s}, v_{0s}$ ) чи на підйом ( $i_{0p}, v_{0p}$ ), а також числові значення констант  $C_1^*$ ,  $C_2^*$ ,  $C_4$ . А в процесі реалізації ітераційних алгоритмів в моделях (3.11), (3.12) нам необхідно знати на кожному кроці  $k$  ще й числове значення кута нахилу  $\beta_k$  осі дороги (або, що одне і те ж, повздожньої осі рами електромобіля) до горизонтальної площини.

Від константи  $C_4$  залежить швидкість руху ітераційного процесу до «нерухомої точки», тож її числове значення ми обираємо самі, і більшим одиниці воно може бути лише за умови, що оцінки відносного струму на кожному кроці до «нерухомої точки» наближаються монотонно. Якщо ж процес цього наближення є знаково змінним, то краще задавати значення цієї константи рівним одиниці.

Що ж до констант  $C_1^*$ ,  $C_2^*$ , то у нашому випадку їх уже не можна обчислювати за виразами (2.43), (2.45), оскільки у нашому випадку змінюються граничні умови, які тепер уже не матимуть вигляд виразів (2.38), (2.39), а задаватимуться виразами:

$$\begin{cases} i(0) = i_0, \\ v(0) = v_0, \\ \int_0^0 v(\tau) d\tau = 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\begin{cases} v'(\tau_l) = v_l', \\ v(\tau_l) = v_l, \\ \int_0^{\tau_l} v(\tau) d\tau = l \end{cases} \quad (3.14)$$

в яких числові значення  $i_0$ ,  $v_0$  відносного струму та відносної швидкості в точці входження в спуск чи підйом ми вимірятимемо, а числові значення  $v_l$ ,  $v_l'$

відносної швидкості та прискорення в точці закінчення спуску чи підйому ми задаватимемо, аби саме за цих їх значень завершувати спуск чи підйом.

Накладемо умову, що зі спуску чи підйому електромобіль виїздить на горизонтальний відрізок дороги, тобто, що

$$\beta_l = 0 \quad (3.15)$$

З врахуванням умов (3.14) та (3.15) із другого рівняння системи (3.10) матимемо –

$$v_l' = \ln\left(i_l + \sqrt{i_l^2 + 1}\right) \frac{a^2 + b^2}{2ab} - f_0 - f_1 v_l - f_2 v_l^2, \quad (3.16)$$

а із виразу (3.16) після відповідних перетворень знайдемо, що відносний струм  $i_l$  тягового електродвигуна електромобіля в точці виїзду зі спуску чи підйому на горизонтальну ділянку дороги, тобто, в момент відносного часу  $\tau_l$ , для забезпечення заданих умовами (3.14) числових значень відносної швидкості  $v_l$  та прискорення  $v_l'$  можна заздалегідь визначити, трансформувавши вираз (3.16) до вигляду

$$i_l = \frac{e^{2v_\Sigma} - 1}{2e^{v_\Sigma}}, \quad (3.17)$$

в якому

$$v_\Sigma = \frac{2ab}{a^2 + b^2} (v_l' + f_0 + f_1 v_l + f_2 v_l^2) \quad (3.18)$$

А далі, підставляючи умови (3.13) в перше рівняння системи (3.14), отримаємо, що

$$2a\sqrt{i_0^2 + 1}(1 - 2\alpha i_0) - \left(C_1 - \frac{C_2}{f_1 + 2f_2 v_0}\right) \frac{(a^2 + b^2)}{b} = 0, \quad (3.19)$$

У свою чергу із виразу (3.19) матимемо –

$$C_1 = \frac{2ab}{a^2 + b^2} (1 - 2\alpha i_0) + \frac{C_2}{f_1 + 2f_2 v_0} \quad (3.20)$$

А підставляючи вираз (3.20) та умови (3.14) і результат розрахунку за виразом (3.17) в перше рівняння системи (3.10) та здійснюючи відповідні перетворення, отримаємо –

$$C_2 = \frac{2ab(f_1 + 2f_2v_0)(f_1 + 2f_2v_l)\phi(i_0, i_l)}{(a^2 + b^2)[(f_1 + 2f_2v_l)\exp(f_1\tau_l + 2f_2l) - f_1 - 2f_2v_0]}, \quad (3.21)$$

де

$$\phi(i_0, i_l) = \sqrt{i_l^2 + 1}(1 - 2\alpha i_l) - (1 - 2\alpha i_0)\exp(f_1\tau_l + 2f_2l) \quad (3.22)$$

Порівнюючи вирази (2.43), (2.45) та (3.20), (3.21), бачимо, що вони суттєво відрізняються, а тому відрізнятимуться і ітераційні процедури (2.49), (2.53) та (3.11), (3.12), в яких використовуються константи, що обчислюються за цими виразами.

Але ітераційні процедури (3.11), (3.12) та (2.49), (2.53) відрізняються не лише різними значеннями згаданих вище констант – вони відрізняються ще й тим, що в ітераційних процедурах (3.21), (3.22) використовується кут  $\beta$  нахилу повздовжньої осі рами електромобіля до горизонтальної площини, який змінюється в процесі руху електромобіля на спуск чи на підйом дороги, що вимагає встановлення на електромобілях пристроїв для вимірювання цього кута. Але, оскільки станом на сьогодні вже сконструйовано і випускається промисловістю достатньо багато таких пристроїв, як електромеханічних так і оптико-електронних та гіроскопічних, приклади встановлення окремих зразків яких на автомобілях уже мають місце, то не стане нерозв'язною і проблема вимірювання кута нахилу повздовжньої осі рами електромобіля до горизонтальної площини в темпі процесу його зміни під час руху на спуск чи на підйом. А це дає надію нам, як авторам синтезованих вище дискретних математичних моделей оптимального руху електромобіля на спуск чи на підйом, що ці моделі досить швидко будуть втіленими творцями сучасних електромобілів в системах керування ними.

І, завершаючи цей аналіз, хочемо звернути увагу на те, що в разі, якщо електромобіль виїжджає на горизонтальну ділянку дороги зі спуску чи підйому без зупинки, то для визначення констант в моделях його оптимального руху теж стають непридатними вирази (2.43), (2.45), оскільки граничні умови не можуть бути заданими у вигляді (2.38), (2.39), а вони матимуть або вигляд (3.13), (3.14), або наблизатимуться до них за своєю структурою, що приведе нас і у цьому

випадку до виразів (3.20), (3.21) для визначення констант, або до виразів, подібних їм за своєю структурою.

### **3.2 Інтеграція кінематичної та динамічної математичних моделей двохосьового електромобіля в задачі оцінки його стійкості на поворотах**

Цілком очевидним, тобто таким, що не потребує додаткового обґрунтування, є той факт, що під час руху електромобіля дорогою, прокладеною на горизонтальній площині, найскладнішим є етап проходження її поворотів. Це обумовлено і тим, що, не розрахувавши швидкість входження в поворот, водій електромобіля може опинитись в кюветі в результаті перевертання цього електромобіля, викликаного дією моменту, створюваного відцентровою складовою швидкості, і тим, що у цьому ж таки кюветі водій з електромобілем може опинитись в результаті заносу на повороті дороги, обумовленого невірною оцінкою водієм стану покриття дороги та ступеню зношеності колісних шин.

Дослідження проблеми перевертання автомобіля під час руху на повороті присвячено роботи [88], [89], шляхом визначення таких параметрів швидкості та кута нахилу автомобіля за яких можна уникнути зміщення центру ваги до точки при якій автомобіль перевернеться. Автори робіт [90] та [91] вирішують питання запобігання заносу автомобіля на поворотах використовуючи нелінійні динамічні моделі реакцій сил в шинах під час ковзання при проходженні поворотів. А у роботі [92] окрім моделей динаміки сил шин ще враховується і різниця швидкостей неведучих коліс. Проте усіх трьох роботах для розрахунків використовуються модель автомобіля приведену до двоколісної, яка є спрощеною. Оскільки роботи [88], [89], [90], [91], [92] розглядають лише або перевертання автомобіля або ж його занос, тому вирішено розробити модель, яка враховуватиме обидва випадки.

В роботі [93] з використанням інформації, почерпнутої із робіт [94], [95] показано, що поступальний рух автомобіля можливий лише за умови, що:

$$F_R + F_B + F_K \leq F_P^{kl\Pi-2} + F_P^{kl\Pi-3} + F_P^{kl\Pi-4} + F_P^{kl\Pi-5} + F_T^K, \quad (3.23)$$

$$M_B \leq M_P, \quad (3.24)$$

де:  $F_R, F_B, F_K, F_T^K$  – сили (відцентрова, бокового опору повітря, коріолісова, складова тяги двигуна, що урівноважує коріолісову),  $F_P^{kЛ-П}, F_P^{kЛ-З}, F_P^{kП-П}, F_P^{kП-З}$  – сили тертя ковзання коліс (лівого переднього, лівого заднього, правого переднього, правого заднього),  $P$  – сила ваги автомобіля,  $M_B, M_P$  – обертальні моменти, створювані відцентровою силою та силою ваги. Векторні діаграми представлено на рисунках 3.2 та 3.3.

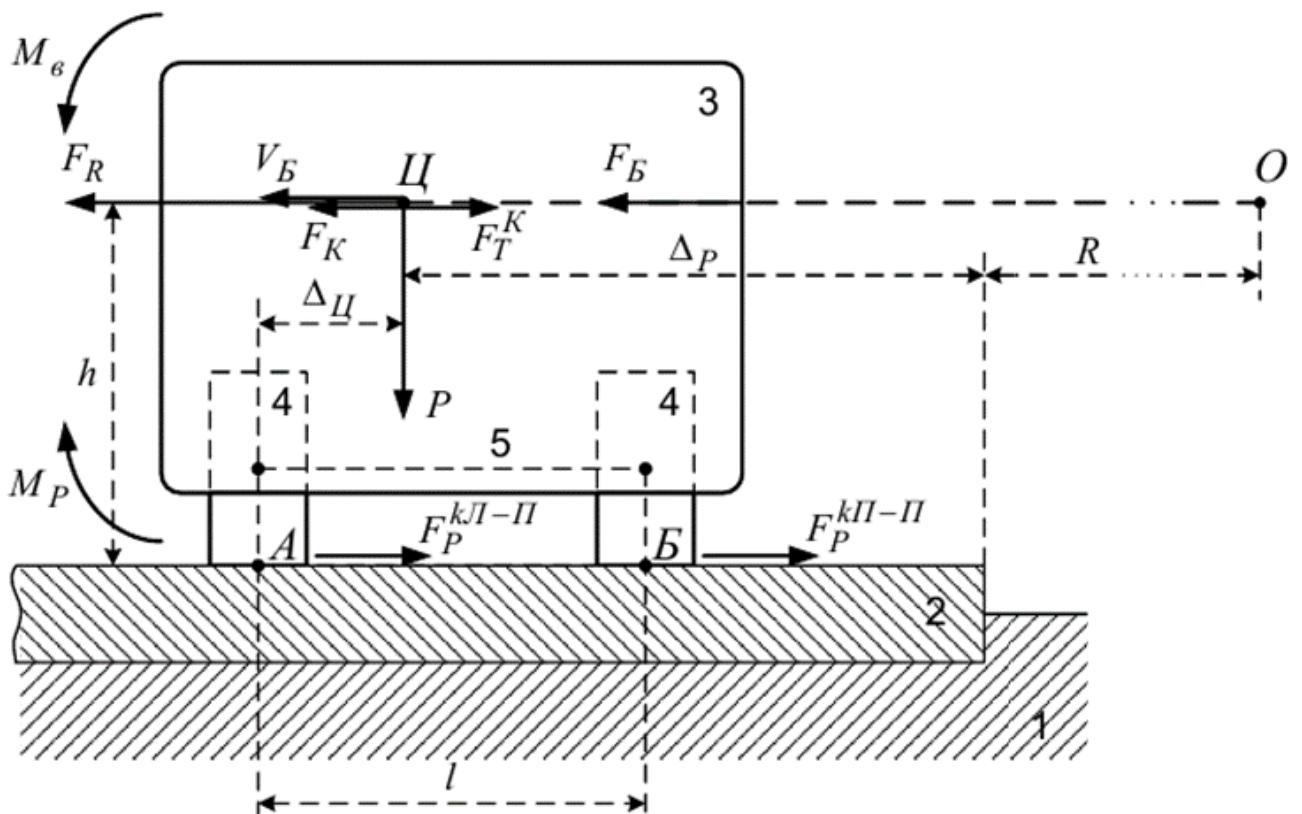


Рисунок 3.2 – Поперечний переріз двохосьового автомобіля площиною, яка проходить через його центр маси перпендикулярно до вектора лінійної швидкості, під час руху від нас по горизонтальному відрізку дороги

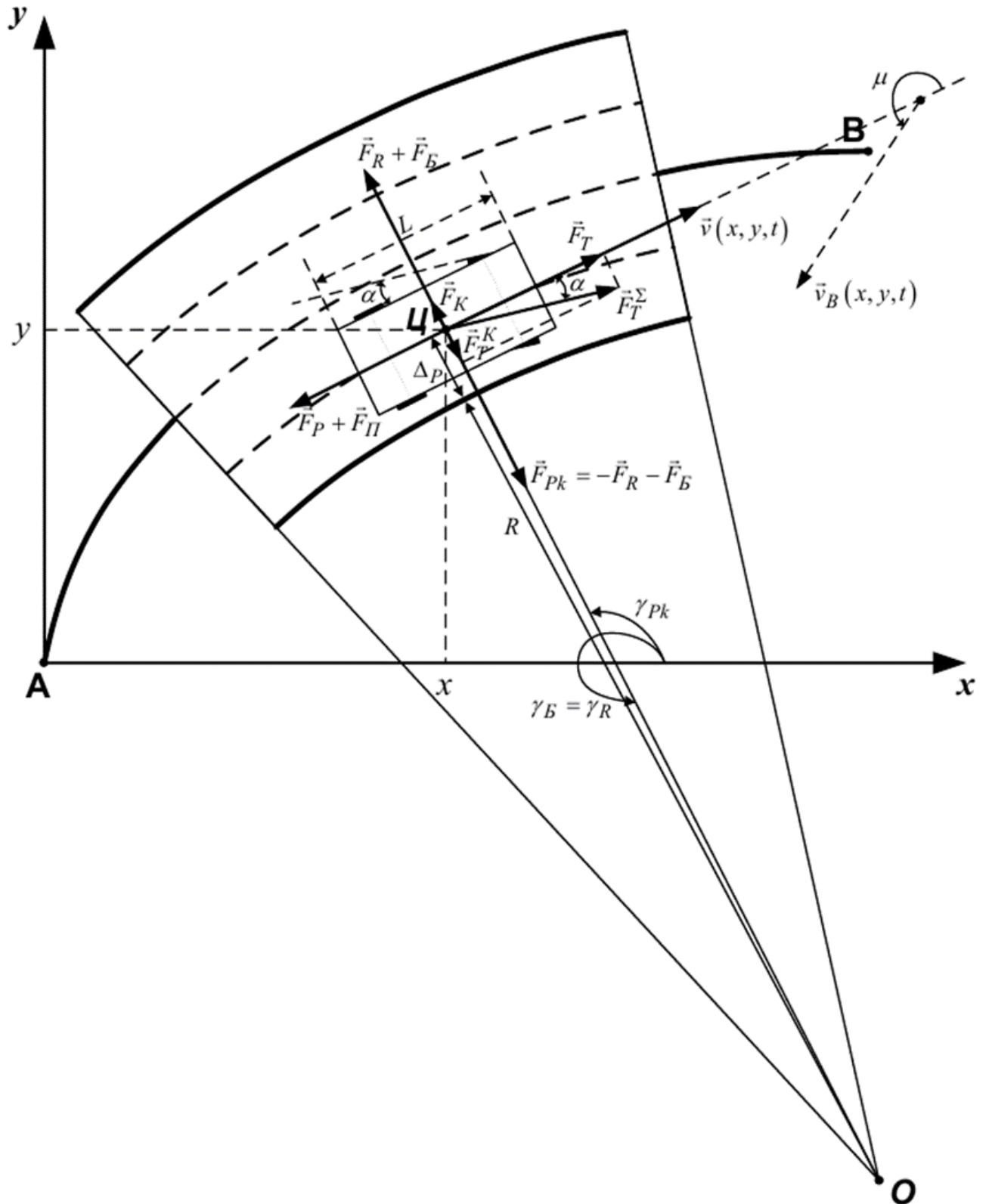


Рисунок 3.3 - Векторна діаграма сил, що діють на автомобіль, який рухається з лінійною швидкістю  $\vec{v}(x, y, t)$  закругленим відрізком дороги АВ з однією смугою руху в кожному напрямку



У тій же роботі [93] показано, що в разі, коли нерівність (3.24) буде виконуватись, а знак нерівності (3.23) зміниться на протилежний, автомобіль почне заносити. А в разі, якщо виконуватись буде нерівність (3.23), а знак нерівності (3.24) зміниться на протилежний, то автомобіль перекинетесь. При цьому мінімальне значення лінійної  $v^{гп}$  швидкості автомобіля як функції від кутової  $\omega$  відносно центра дуги кривої закруглення дороги, за якого почнеться занос, знаходяться із рівняння, яке отримується заміною знаку нерівності на знак рівності у виразі (3.23), а мінімальне значення лінійної  $v^{кп}$  швидкості автомобіля як функції від кутової  $\omega$ , за якого почнеться перевертання автомобіля, знаходяться із рівняння, яке отримується заміною знаку нерівності на знак рівності у виразі (3.24) – і ці функції за однакового значення коефіцієнта ковзання  $k_{**}(\omega, P)$  кожного із коліс мають вигляд:

$$v^{гп} = -\omega(R + \Delta p) + \left( \frac{R + \Delta p}{m} (k_{**}(\omega, P)P + F_T \operatorname{tg} \alpha - k_{ПЛ} S_B (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu))^2 - k_{ПБ} S_L (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu))) \right)^{0.5} = f_1(\omega), \quad (3.25)$$

$$v^{кп} = -\omega(R + \Delta p) + \left( \frac{R + \Delta p}{m} \left( \frac{\Delta \Pi}{h} P - k_{ПЛ} S_B (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu))^2 - k_{ПБ} S_L (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu)) \right) \right)^{0.5} = f_2(\omega), \quad (3.26)$$

в яких до уже визначених раніше величин додаються:  $m$  – маса автомобіля,  $h$  – висота центра маси автомобіля,  $\Delta p$  – відстань від центра маси автомобіля до внутрішньої дуги асфальтового покриття на закругленні дороги,  $\Delta \Pi$  – відстань від центра маси автомобіля до зовнішнього колеса на закругленні дороги,  $R$  – відстань від центра закруглення дороги до внутрішньої дуги асфальтового покриття,  $v_B$  – швидкість набігання потоку повітря на автомобіль на закругленні дороги,  $S_L, S_B, L$  – площі лобної і бокової поверхонь корпусу автомобіля та його довжина,  $k_{ПЛ}, k_{ПБ}$  – коефіцієнти, а  $\mu, \alpha$  – кути між векторами  $v_B$  та  $v$  з дотичною до траєкторії руху в точці, відносно якої складаються балансні рівняння (3.23), (3.24).

Аналіз функцій (3.25), (3.26) показав, що вони синтезовані із виразів (3.23), (3.24) шляхом попереднього перетворення цих виразів в балансні рівняння, які

являють собою кінематичні математичні моделі автомобіля для вибраної точки траєкторії у вибраний момент часу.

Але автори роботи [96] показали, що для визначення умов руху двохосьового автомобіля дорогою, прокладеною в горизонтальній площині, недостатньо враховувати лише його кінематику, а потрібно враховувати і його динаміку – і побудували математичну модель руху автомобіля у вигляді системи трьох диференціальних рівнянь другого порядку, що мають вигляд:

$$\begin{cases} mx_0'' = F_{AX} + F_{BX} + F_{CX} + F_{DX}, \\ my_0'' = F_{AY} + F_{BY} + F_{CY} + F_{DY}, \\ J_0\varphi'' = M_A + M_B + M_C + M_D, \end{cases} \quad (3.27)$$

в яких:  $m$ ,  $J_0$  – маса та момент інерції автомобіля, приведені до центру маси;  $\varphi$  – кут повороту повздовжньої осі корпусу автомобіля в горизонтальній площині;  $x_0''$ ,  $y_0''$  – проекції прискорення автомобіля на осі координат ОХ,ОУ;  $F_{AX}$ ,  $F_{BX}$ ,  $F_{CX}$ ,  $F_{DX}$ ,  $F_{AY}$ ,  $F_{BY}$ ,  $F_{CY}$ ,  $F_{DY}$  – проекції на осі ОХ,ОУ сил, прикладених до коліс А,В,С,Д;  $M_A$ ,  $M_B$ ,  $M_C$ ,  $M_D$  – моменти сил, прикладених до коліс, відносно центра маси автомобіля.

Наша задача – інтегрувати в математичні моделі умов (3.25), (3.26) неперевертання автомобіля на закругленні дороги, що отримані з балансних рівнянь (3.23), (3.24) його кінематики, динамічні характеристик автомобіля, відповідним чином перетворивши для цього математичну модель (3.27).

Розпочнемо зі звернення уваги на те, що балансні рівняння (10) та (13) в роботі [93], з яких отримані умови (3.25), (3.26), складені, виходячи з незмінності швидкості, з якою автомобіль (утому числі і з електричною тягою, тобто електромобіль) долає закруглення дороги, але більшість водіїв на закругленнях дороги зменшують подачу палива чи електроенергії в тяговий двигун, із-за чого лінійна швидкість їх автомобіля падає, супроводжуючи це падіння появою сили інерції, вектор якої завжди направлений в бік, протилежний цим змінам. Тож у цьому випадку до відцентрової сили, яка намагається знести чи перекинути автомобіль в кювет, додається ще й проекція на радіус – вектор точки траєкторії руху, для якої складається балансне рівняння, сили інерції цього автомобіля, яка

у вигляді, аналогічному лівій частині другого рівняння системи (3.27), додається в балансне рівняння (10) роботи [93], із-за чого воно набуває форми

$$m \frac{v^2 + \omega^2 (R + \Delta p)^2}{R + \Delta p} + \frac{1}{2} k_{\text{ПЛ}} S_B (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu))^2 + k_{\text{ПБ}} S_L (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu)) + 2mv\omega + m \frac{dv}{dt} \operatorname{tg} \alpha = k_{**}(\omega, P)P + F_T \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.28)$$

та у вигляді, аналогічному лівій частині третього рівняння системи (3.27) додається в балансне рівняння (13) роботи [93], із-за чого воно набуває форми

$$m \frac{v^2 + \omega^2 (R + \Delta p)^2}{R + \Delta p} + \frac{1}{2} k_{\text{ПЛ}} S_B (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu))^2 + k_{\text{ПБ}} S_L (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu)) + 2mv\omega + m \frac{dv}{dt} \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \Pi}{h} P, \quad (3.29)$$

Дивлячись на рівняння (3.28) та (3.29), бачимо, що на відміну від алгебраїчних рівнянь (10) та (13) із роботи [93], використаних нами у якості породжуючих, ці рівняння уже мають статус нелінійних диференціальних рівнянь 1-го порядку зі структурою

$$\frac{dv}{dt} = av^2 + bv + c, \quad (3.30)$$

які відрізняються лише вільними членами «с», оскільки коефіцієнти «а» і «b» в них однакові і дорівнюють:

$$a = -\frac{1}{(R + \Delta p) \operatorname{tg} \alpha}, \quad (3.31)$$

$$b = -\frac{2\omega}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (3.32)$$

а вільний член «с» для рівняння (3.28) – позначимо його  $c_6$  – задається виразом:

$$c_6 = \frac{1}{m \operatorname{tg} \alpha} \left( k_{**}(\omega, P)P + F_T \operatorname{tg} \alpha - m\omega^2 (R + \Delta p) - \frac{1}{2} k_{\text{ПЛ}} S_B (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu))^2 - k_{\text{ПБ}} S_L (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu)) \right), \quad (3.33)$$

а для рівняння (3.29) – позначимо його  $c_7$  – задається виразом:

$$c_7 = \frac{1}{m \operatorname{tg} \alpha} \left( \frac{\Delta \Pi}{h} P - m \omega^2 (R + \Delta p) - \frac{1}{2} k_{III} S_B (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu))^2 - k_{II} S_L (\omega L + v_B \sin(2\pi - \mu)) \right), \quad (3.34)$$

Приведемо рівняння (3.30) до вигляду

$$\frac{dv}{av^2 + bv + c} = dt, \quad (3.35)$$

та, скориставшись методикою, викладеною в роботі [97], до вигляду

$$\frac{1}{a} \frac{dv}{\left(v + \frac{b}{2a}\right)^2 + \left(\frac{c}{a} - \frac{b^2}{4a^2}\right)} = dt \quad (3.36)$$

Здійснимо у виразі (3.36) заміну змінної. Нехай

$$v + \frac{b}{2a} = \theta, \quad (3.37)$$

тоді матимемо

$$d\theta = dv \quad (3.38)$$

Підставляючи вирази (3.37) та (3.38) у вираз (3.36), матимемо

$$\frac{1}{a} \frac{d\theta}{\theta^2 + \left(\frac{c}{a} - \frac{b^2}{4a^2}\right)} = dt \quad (3.39)$$

або

$$\frac{1}{a} \frac{d\theta}{\theta^2 - \left(\frac{b^2}{4a^2} - \frac{c}{a}\right)} = dt \quad (3.40)$$

Спираючись на вирази (3.31)-(3.34), визначимо, який знак матиме вираз

$$\left( \frac{b^2}{4a^2} - \frac{c}{a} \right).$$

Використовуючи вирази (3.31), (3.32), знайдемо, що

$$\frac{b^2}{4a^2} = \omega^2 (R + \Delta p)^2 > 0, \quad (3.41)$$

а, використовуючи вирази (3.31), (3.33), (3.34), переконуємось, що і

$$-\frac{c_6}{a} > 0, \quad (3.42)$$

$$-\frac{c_7}{a} > 0, \quad (3.43)$$

оскільки коефіцієнт  $a$  має від'ємний знак, а коефіцієнти  $c_6, c_7$  при наближенні швидкості в режимі нормального руху до критичного значення, при якому може статись занос чи перекидання електромобіля, як видно з виразів (3.33), (3.34), мають знак додатній.

Отже, позначивши

$$\left(\frac{b^2}{4a^2} - \frac{c}{a}\right) = k^2, \quad (3.44)$$

вираз (3.40) ми можемо переписати у вигляді

$$\frac{1}{a} \frac{d\theta}{k^2 - \theta^2} = -dt \quad (3.45)$$

та проінтегрувати, скориставшись таблицею інтегралів із роботи [97].

В результаті інтегрування отримаємо вираз

$$\frac{1}{2ak} \ln \left| \frac{k + \theta}{k - \theta} \right| + C = -t, \quad (3.46)$$

підставляючи в який значення параметрів, матимемо:

$$\frac{1}{\sqrt{b^2 - 4ac}} \ln \left| \frac{\sqrt{b^2 - 4ac} + b + 2av}{\sqrt{b^2 - 4ac} - b + 2av} \right| + C = -t \quad (3.47)$$

Сталу інтегрування  $C$  у виразі (3.47) визначимо із умови, що в момент виїзду автомобіля на початок закруглення дороги ( $t=0$ ) його швидкість дорівнює  $v_0$ , тож підставляючи цю умову у вираз (3.47), отримаємо

$$C = -\frac{1}{\sqrt{b^2 - 4ac}} \ln \left| \frac{\sqrt{b^2 - 4ac} + b + 2av_0}{\sqrt{b^2 - 4ac} - b + 2av_0} \right| \quad (3.48)$$

А підставляючи вираз (3.48) у вираз (3.47), отримаємо розв'язок диференціального рівняння (3.45) у вигляді

$$\frac{1}{\sqrt{b^2 - 4ac}} \left( \ln \left| \frac{\sqrt{b^2 - 4ac} + b + 2av}{\sqrt{b^2 - 4ac} - b + 2av} \right| - \ln \left| \frac{\sqrt{b^2 - 4ac} + b + 2av_0}{\sqrt{b^2 - 4ac} - b + 2av_0} \right| \right) = -t, \quad (3.49)$$

із якого, застосовуючи відповідні перетворення, знайдемо, що

$$v(t, c) = \frac{v_0 \left( 2a\sqrt{b^2 - 4ac} \left( 1 + e^{-t\sqrt{b^2 - 4ac}} \right) + 2ab \left( 1 - e^{-t\sqrt{b^2 - 4ac}} \right) \right) + 4ac \left( 1 - e^{-t\sqrt{b^2 - 4ac}} \right)}{2a\sqrt{b^2 - 4ac} \left( 1 + e^{-t\sqrt{b^2 - 4ac}} \right) - 2ab \left( 1 - e^{-t\sqrt{b^2 - 4ac}} \right) - 4a^2 v_0 \left( 1 - e^{-t\sqrt{b^2 - 4ac}} \right)} \quad (3.50)$$

Підставляючи у вираз (3.50) замість параметра « $c$ » його значення  $c_6$  із (3.33), знайдемо, що

$$v^{TP} = v(t, c_6) = v^{TP}(t, \omega), \quad (3.51)$$

а підставляючи у вираз (3.50) замість параметра « $c$ » його значення  $c_7$  із (3.34), знайдемо, що

$$v^{KP} = v(t, c_7) = v^{KP}(t, \omega) \quad (3.52)$$

Перше, на що потрібно звернути увагу при аналізі отриманих результатів, це те як правильно використовувати розв'язок диференціального рівняння (3.45) у вигляді (3.50), який для умов заносу автомобіля на закругленні дороги набуває вигляду (3.51), а для умов неперевертання автомобіля на цьому закругленні набуває вигляду (3.52). Але спочатку нагадаємо, що алгебраїчні балансні кінематичні рівняння для сил, що діють на автомобіль на закругленні дороги, набули вигляд диференціальних після того, як ми допустили можливість зміни швидкості руху автомобіля на цьому закругленні, із-за чого до тих сил, які діяли на автомобіль в стаціонарному режимі за незмінної швидкості руху додалась ще й динамічна складова, що обумовлена змінами сили інерції, яка є пропорційною похідній від цієї швидкості. Отже, щоб узгодити між собою обидва ці режими руху автомобіля, необхідно початкову швидкість  $v_0$  для виразу (3.50) при його використанні у вигляді (3.51) визначати із виразу (3.25), який є розв'язком балансного рівняння, отриманого з виразу (3.23), а при використанні виразу (3.50) у вигляді (3.52) цю початкову швидкість необхідно визначати із виразу (3.26), який є розв'язком балансного рівняння, отриманого із виразу (3.24). І лише при виконанні цих умов ми матимемо можливість відслідковувати зміни значень граничної і критичної швидкостей, за яких під час руху по закругленню дороги автомобіль не буде знесено чи перевернуто в кювет при зміні в часі швидкості руху автомобіля по цьому закругленню.

А друге, на що потрібно звернути увагу при аналізі отриманих результатів, це те, що ці результати отримані за умови, що зчеплення усіх коліс з дорогою є однаковим, що є можливим лише за умови однакового стану дороги на усій її ширині та однакового ступеню зношення шин усіх чотирьох коліс. В разі ж якщо

це не відповідає дійсності, то, як показано в роботі [98], до кінематичних та динамічних моделей руху автомобіля по закругленню дороги потрібно додавати ще й модель у вигляді відповідної бази знань у просторі лінгвістичних змінних, що характеризують стан дорожнього покриття та ступінь зношеності шин кожного із коліс автомобіля.

### **3.3 Висновки за матеріалами третього розділу**

В розвиток методу синтезу та ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізьку дороги запропоновано метод синтезу та ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з аналогічним електроприводом, але під час руху на спуск та на підйом, за яким, як і за базовим методом, на першому етапі реалізації визначаються константи, котрі мають місце у цих моделях внаслідок використання двічі операції інтегрування в процесі їх синтезу, але з використанням граничних умов, що суттєво відрізняються від використаних в базовому методі, та іншої послідовності використання цих граничних умов, а на другому етапі реалізації як і у базовому методі теж пропонується прямий алгоритм визначення швидкості електромобіля на основі моделі його динаміки, але з використанням ітераційно обчислених попередньо значень оптимального струму, зв'язаного зі швидкістю електромобіля співвідношенням, отриманим як і у базовому методі в результаті розв'язання задачі оптимізації методом невизначених множників Лагранжа, та з використанням ще й вимірних відповідним пристроєм кутів нахилу повздовжньої осі рами електромобіля до горизонтальної площини, які під час руху на спуск та на підйом не залишаються незмінними, та які не використовуються в базовому методі.

Шляхом інтеграції математичних моделей кінематики та динаміки автомобіля розроблено алгоритм визначення таких значень швидкості руху по закругленню дороги автомобілів як з двигунами внутрішнього згорання так і з електричним приводом, не перевищення яких забезпечує цим автомобілям умови не опинитись в кюветі внаслідок заносу чи перевертання. Ці математичні моделі,

що враховують зміни швидкості автомобілів під час руху по закругленню дороги, синтезовані в класі диференціальних рівнянь, а тому їх розв'язки дозволяють бачити, як змінюються в часі значення граничної та критичної швидкостей руху автомобіля по закругленню дороги при зміні його поточної швидкості. Визначено за рахунок яких параметрів до процесу інтеграції математичних моделей кінематики та динаміки автомобіля може бути долучена і математична модель визначення умов відсутності заносу та неперевертання автомобіля під час руху по закругленню дороги, що синтезована в просторі лінгвістичних змінних, які характеризують невизначеність стану дорожнього покриття та різну ступінь зношення шин на різних колесах автомобіля.

При викладенні змісту третього розділу використані результати дослідження, опубліковані в роботах [99], [100] автора дисертації.



## РОЗДІЛ 4

ІМІТАЦІЙНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ  
АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З  
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗМІННОГО СТРУМУ ТА СИНТЕЗУ СППР**4.1 Імітаційні моделі для оцінювання адекватності моделей  
оптимального руху електромобіля у горизонтальній площині, на спуск та на  
підйом**

В підрозділі 2.2, розв'язуючи методом Лагранжа, викладеним в роботі [79], задачу мінімізації витрат електроенергії силової акумуляторної батареї електромобіля результати яких викладено в роботі [85], отримано систему двох рівнянь –

$$\begin{cases} 2a\sqrt{i^2+1}(1-2\alpha i) - \left( C_1 e^{(f_1\tau+2f_2\int v d\tau)} - \frac{C_2}{f_1+2f_2v} \right) \frac{(a^2+b^2)}{b} = 0, \\ \frac{dv}{d\tau} = \ln\left(i + \sqrt{i^2+1}\right) \frac{(a^2+b^2)}{2ab} - f_0 - f_1v - f_2v^2, \end{cases} \quad (2.36)$$

на розв'язки яких

$$i = i(C_1, C_2, C_3, \tau), \quad v = v(C_1, C_2, C_3, \tau) \quad (2.37)$$

досягатиметься мінімум витрат енергії силової акумуляторної батареї електромобіля в умовах дії обмежень

$$m \frac{dV}{dt} = F_T - k_0 F_G - k_1 V - k_2 V^2, \quad (2.3)$$

та

$$L_I = \int_0^{T_I} V dt, \quad (2.2)$$

В результаті ідентифікації математичних моделей оптимального руху (2.37) електромобіля з використанням початкових –

$$\begin{cases} i(0) = i_n, \\ v(0) = 0, \\ \int_0^0 v(\tau) d\tau = 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

та граничних –

$$\begin{cases} i(\tau_l) = 0, \\ v(\tau_l) = 0, \\ \int_0^{\tau_l} v(\tau) d\tau = l_l \end{cases} \quad (2.39)$$

умов, що здійснено в підрозділі 2.3 та опубліковано в роботі [86], отримано рівняння визначення значення відносної швидкості  $v_{k+1}$  в момент часу  $\tau_{k+1}$  у вигляді

$$v_{k+1} \approx v_k + \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln \left( i_k + \sqrt{i_k^2 + 1} \right) - (f_0 + f_1 v_k + f_2 v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k), \quad (2.49)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots; \quad \tau_0 = 0, \quad v_0 = 0, \quad i_0 = i_n$$

та рівняння для визначення значення відносного струму  $i_k(n)$  у вигляді

$$i_k(n) = i_k(n-1) - \frac{C_4}{n} \left\{ 2a \sqrt{(i_k(n-1))^2 + 1} (1 - 2ai_k(n-1)) - \right. \\ \left. - \left( \frac{a^2 + b^2}{b} \right) \left( C_1^* e^{(f_1 \tau_k + 2f_2 v_k (\tau_{k+1} - \tau_k))} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2 v_k} \right) \right\}, \quad (2.53)$$

ітераційний процес за яким слід зупиняти, коли виконуватиметься умова

$$|i_k(n) - i_k(n-1)| \leq \varepsilon, \quad (2.54)$$

де  $\varepsilon$  – прийняте нами числове значення відносної похибки визначення струму в ітераційному процесі, з оглядом на яку ми прийматимемо умову

$$i_k(n) = i_k \quad (2.55)$$

Ці математичні моделі і критеріальні обмеження і покладені нами в основу при здійсненні комп'ютерного моделювання процесу оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом горизонтальним відрізком дороги.

Для розрахунку необхідних параметрів комп'ютерної моделі необхідні деякі дані, що характеризуватимуть електромобіль. В таблиці 4.1 представлено такі дані, які відповідають найбільш поширеному на території України електромобілю Nissan Leaf, в якому синхронний електродвигун з постійними магнітами замінено на асинхронний аналогічної потужності як зазначено в таблиці 1.3.

Таблиця 4.1 – Технічні дані електромобіля

Параметр	Значення
Номінальна потужність АД, $P_N$ (кВт.)	80
Номінальний крутний момент АД, $M_N$ (кВт.)	280
Номінальний струм, $I_N$ (А)	135
Номінальна напруга силової АБ, $U_N$ (В)	410
Номінальне число обертання валу двигуна, $n_N$ (об/хв.)	2730
Значення номінального ковзання, $s_N$	0.02
Внутрішній опір силової АБ, $R_{bat}$ (Ом)	0.715
Номінальна швидкість руху електромобіля, $V_N$ (км/год.)	80
Опір обмотки статора АД, $R_S$ (Ом)	0.249
Опір обмотки ротора АД, $R_R$ (Ом)	0.204
Індуктивність обмотки статора АД, $L_S$ (Гн.)	0.004845
Індуктивність обмотки ротора АД, $L_R$ (Гн.)	0.004209
Маса електромобіля, $m$ (кг.)	1538
Радіус колеса, $R_K$ (м.)	0.324
Передаточне число трансмісії, $k_T$	8.1938
Коефіцієнти:	
матеріалу поверхні дороги, $k_0$	0.019
площі бічної поверхні автомобіля, $k_1$	0.8
площі лобової поверхні автомобіля, $k_2$	0.6

Використовуючи параметри електромобіля, представлених в таблиці 4.1, розрахуємо необхідні для комп'ютерної моделі параметри:  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$ ,  $f_0$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ .

Параметри  $a$  та  $b$  розраховуються із виразів:

$$a = \frac{1}{s_H}; b = \frac{x_p}{r_p}, \quad (2.18)$$

$$a = \frac{1}{0.02} = 50.$$

А для розрахунку параметра  $b$  попередньо потрібно знайти реактивний опір ротора АД –  $x_p$ , який визначається наступним чином:

$$x_p = \frac{n_N \cdot \pi}{30} \cdot L_R, \quad (4.1)$$

$$x_p = \frac{2730 \cdot 3.142}{30} \cdot 0.004209 = 1.203(\text{Ом});$$

$$b = \frac{1.203}{0.204} = 5.898.$$

Далі знайдемо крутний момент, що передається від електродвигуна до коліс через трансмісію:

$$M_T = M_N \cdot k_T, \quad (4.2)$$

$$M_T = 280 \cdot 8.1938 = 2294.264 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

І розрахуємо силу тяги електромобіля із

$$F_T = \frac{M_T}{R}, \quad (2.4)$$

$$F_T = \frac{2294.264}{0.324} = 7081.062(\text{Н}).$$

Маючи силу тяги розрахуємо електромеханічну сталу за виразом

$$T_M = \frac{mV_H}{F_H}; \quad (2.5)$$

$$T_M = \frac{1538 \cdot 80}{7081.062} = 17.376.$$

І також розрахуємо силу ваги автомобіля за величини прискорення вільного падіння  $g$ , яка становить  $9.807 \text{ (м/с}^2\text{)}$ :

$$F_G = m \cdot g, \quad (4.3)$$

$$F_G = 1538 \cdot 9.807 = 15083.166(\text{Н}).$$

Із виразів

$$f_0 = \frac{k_0 F_G T_M}{m V_H}; f_1 = \frac{k_1 T_M}{m}; f_2 = \frac{k_2 V_H T_M}{m}; \alpha = \frac{r_B I_H}{U_B}; l_i = \frac{L_I}{V_H T_M}, \quad (2.12)$$

розрахуємо усі інші необхідні для комп'ютерної моделі коефіцієнти, і зведемо їх до таблиці 4.2:

$$\alpha = \frac{0.715 \cdot 135}{410} = 0.235;$$

$$f_0 = \frac{0.019 \cdot 15083.166 \cdot 17.376}{1538 \cdot 80} = 0.04;$$

$$f_1 = \frac{0.0 \cdot 17.376}{1538} = 0.009038;$$

$$f_2 = \frac{0.6 \cdot 80 \cdot 17.376}{1538} = 0.542.$$

Таблиця 4.2 – Розраховані коефіцієнти комп'ютерної моделі

Коефіцієнт	$a$	$b$	$\alpha$	$f_0$	$f_1$	$f_2$
Значення	50	5.898	0.235	0.04	0.009038	0.5421

Наступним кроком буде синтез комп'ютерної програми яка здійснюватиме процес моделювання руху електромобіля по горизонтальному відрізку дороги. На рисунку 4.1 представлено алгоритм такої програми, яка здійснюватиме потрібний процес моделювання руху електромобіля із заданими параметрами, початковими і граничними умовами.

Початок роботи програми, показаному в алгоритмі рисунку 4.1, як і для будь-якої програми буде ініціалізація змінних, об'єктів тощо. В даному випадку це параметри моделі (таблиця 4.2), встановлені початкові та граничні умови, а також регулюючі коефіцієнти  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_4$ . Наступним буде формування даних завдання на основі якого почнеться процес моделювання. На основі сформованих даних (які є початковими умовами) спочатку формується масив даних стану руху електромобіля в момент часу  $\tau_0$  тобто 0 (варто нагадати, що розраховані параметри моделі і результати моделювання, які будуть представлені далі, є відносними одиницями).

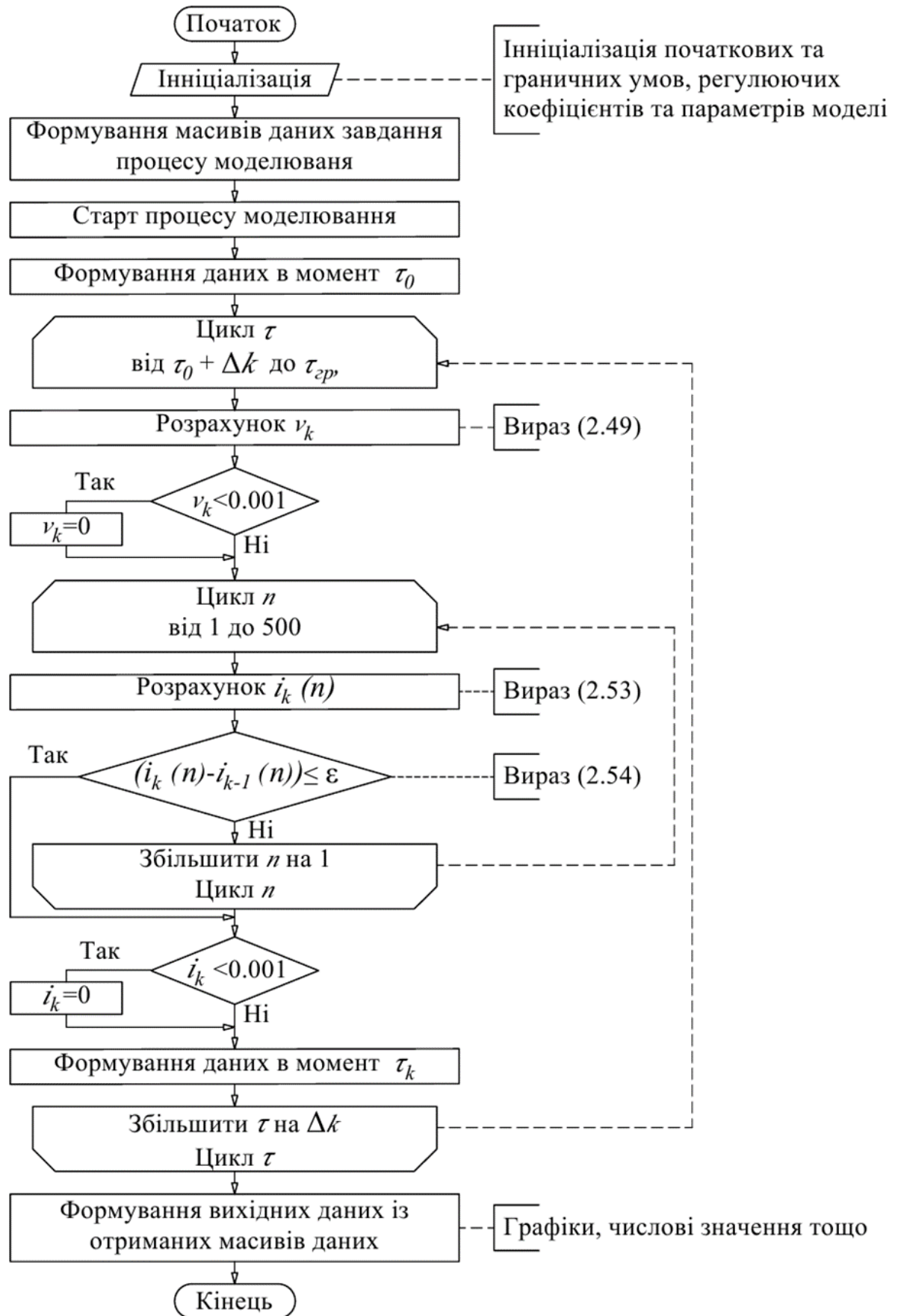


Рисунок 4.1 – Алгоритм виконання програми процесу моделювання при русі по горизонталі

Далі розпочнеться циклічний розрахунок значень струму, швидкості та пройденої відстані електромобіля починаючи з  $\tau_0 + \Delta k$  до  $\tau_{sp}$  із кроком в  $\Delta k$ .

Розрахунок швидкості виконується виходячи із виразу –

$$v_{k+1} \approx v_k + \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln(i_k + \sqrt{i_k^2 + 1}) - (f_0 + f_1 v_k + f_2 v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k), \quad (2.49)$$

після чого слідує необхідна перевірка на величину значення швидкості, якщо розрахована на поточній ітерації швидкість уже менше певного граничного значення (0.001 в даному випадку) то приймаємо, що швидкість зменшилась до нуля. Якщо цього не зробити значення буде коливатись між двома досить малими значеннями, що впливатимуть (хоча і не значно) на результат, чого варто уникнути оскільки це програмна особливість ітеративного розрахунку але не характерно реальному процесу руху. Аналогічна перевірка виконується і для струму.

Розрахунок струму виконується за виразом –

$$i_k(n) = i_k(n-1) - \frac{C_4}{n} \left\{ 2a \sqrt{(i_k(n-1))^2 + 1} (1 - 2\alpha i_k(n-1)) - \left( \frac{a^2 + b^2}{b} \right) \left( C_1^* e^{(f_1 \tau_k + 2f_2 v_k (\tau_{k+1} - \tau_k))} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2 v_k} \right) \right\}, \quad (2.53)$$

і виконується ітеративно поки значення струму не наблизиться до того, при якому виконається умова –

$$|i_k(n) - i_k(n-1)| \leq \varepsilon, \quad (2.54)$$

і цикл знаходження струму зупиниться. Кількість циклів також є обмеженим в 500 ітерацій (чого цілком достатньо для коректного розрахунку), щоб уникнути помилок безкінечного виконання циклу.

Остатніми діями в ітерації відбувається обчислення загальної пройденої відстань на поточний момент часу  $\tau_k$  і на основі розрахованих значень струму, швидкості і відстані формуються дані які вносяться в основний масив даних процесу моделювання руху електромобіля.

Після завершення усіх ітерацій розрахунків слідує формування, із отриманого масиву даних процесу моделювання руху електромобіля на усьому

проміжку часу, даних у вигляді графіків та числових значень струму, швидкості та пройденої відстані в момент часу  $\tau_{zp}$ , тобто фактичних граничних значень.

Виконано 4 варіанти моделювання процесу руху електромобіля горизонтальним відрізком дороги. Числові значення для усіх варіантів представлено у таблиці 4.3, а на рисунках 4.2 – 4.4 графіки зміни струму, швидкості та пройденої відстані на проміжку часу від  $\tau_0$  до  $\tau_{zp}$  із кроком в  $\Delta k$ .

Таблиця 4.3 – Результати моделювання чотирьох варіантів руху електромобіля горизонтальним відрізком дороги

	Параметр	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Початкові умови	$i_k(0)$	1	1	1	1
	$v_k(0)$	0	0	0	0
	$l(0)$	0	0	0	0
Граничні умови	$i_k(\tau_{zp})$	0	0	0	0
	$v_k(\tau_{zp})$	0	0	0	0
	$l(\tau_{zp})$	80	60	60	60
	$\tau_{zp}$	50	40	50	60
Результат	$i_k(\tau_{zp})$	0.0	0.0	0.0	0.0
	$v_k(\tau_{zp})$	0.0	0.0	0.0	0.0
	$l(\tau_{zp})$	80.004	60.002	60.0	60.001
	$C_1$	0.0	0.0	-14.4	-15650
	$C_2$	-0.001307	-0.001307	-0.001307	-0.001307
	$C_4$	0.013667	0.01838	0.0000282	0.000000026
	$\int_{\tau_0}^{\tau_{zp}} i_k d\tau$	22.288	16.586	14.403	14.399



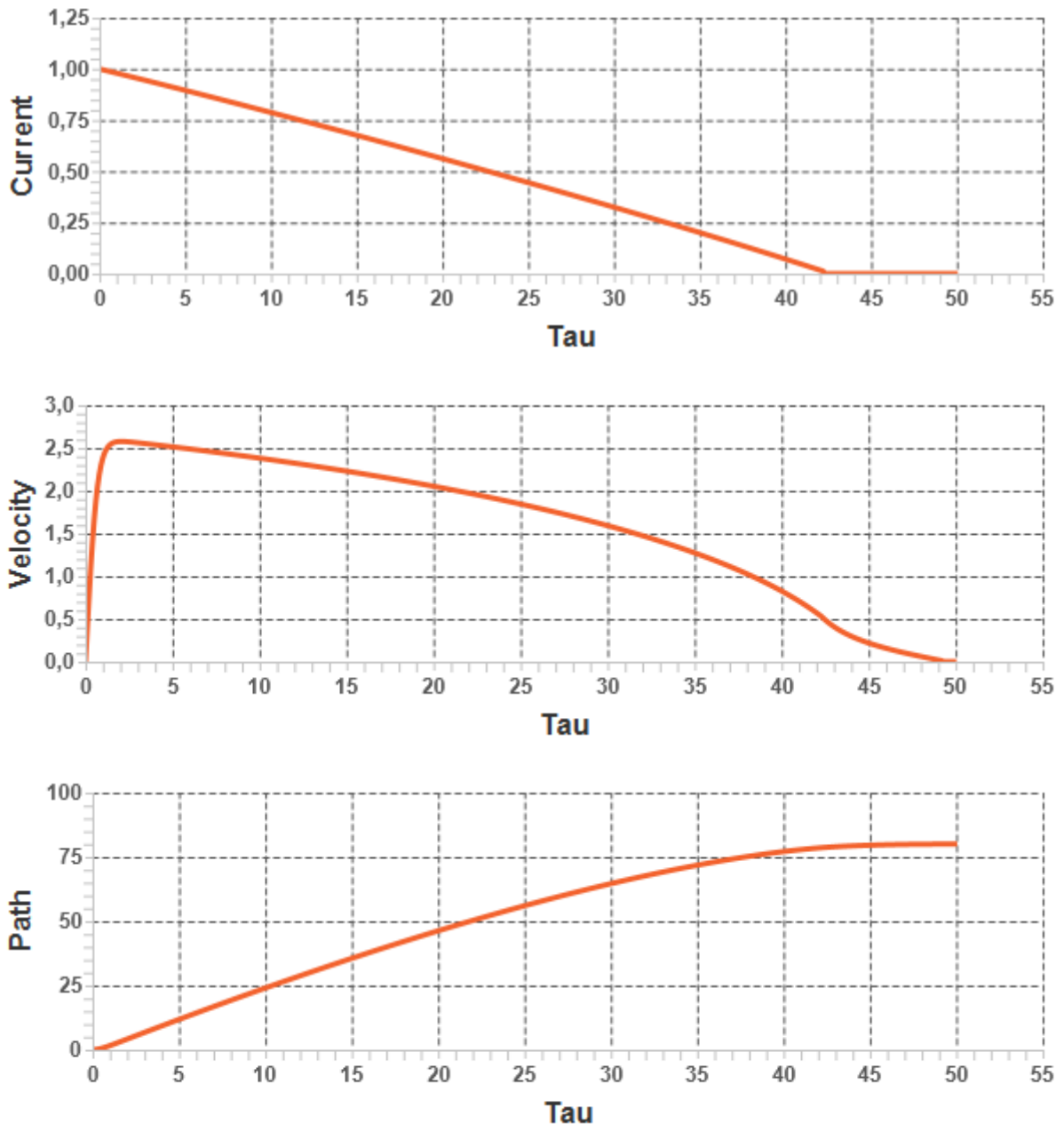


Рисунок 4.2 – Графіки зміни струму, швидкості та шляху при моделюванні руху електромобіля по горизонтальному відрізку дороги. Варіант 1

Із графіків варіанту 1 можна бачити результати моделювання, які характеризують зв'язок між пройденою відстанню та часом, що близький до мінімально можливого, тобто характеризують наближене до максимально швидкого проходження заданої відстані. Також, як для представлених графіків варіанту 1 і для усіх наступних, легко бачити, що має місце певна інерційність виконання процесів. Так у момент часу, коли струм уже дорівнює нулю швидкість ще має певну залишкову величину, котра поступово зменшується до

нуля. Це є характерним і для реальних автомобілів, які після припинення подання на колеса тягового зусилля від двигуна за відсутності примусового гальмування продовжуватимуть рухатись із від'ємним прискоренням, яке зумовлене реактивними силами (опір повітря, опір кочення тощо), до повної зупинки. На інерційність моделі впливає величина коефіцієнта  $C_2$ .

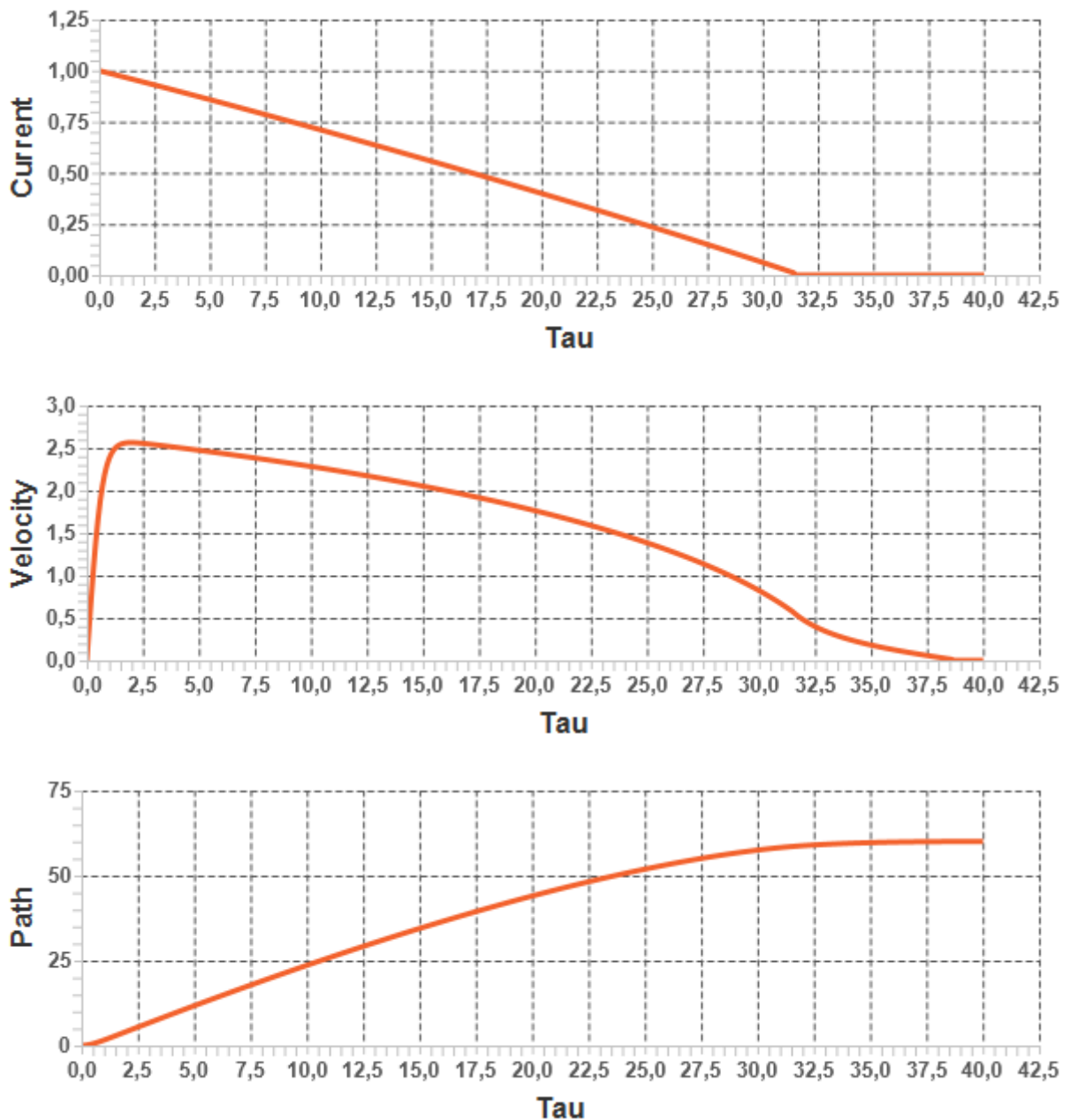


Рисунок 4.3 – Графіки зміни струму, швидкості та шляху при моделюванні руху електромобіля по горизонтальному відрізку дороги. Варіант 2

На графіках варіанту 2 спостерігається аналогічна ситуація як і для варіанту 1, максимально швидке проходження заданої відстані, тільки для інших

граничних умов часу та відстані. Для перших двох варіантів регулювання здійснюється тільки за допомогою коефіцієнта  $C_4$ , який задає пологість кривої струму, чим він більший тим крутіший нахил кривої, таким чином здійснюється регуляція відстані, яка досягається.

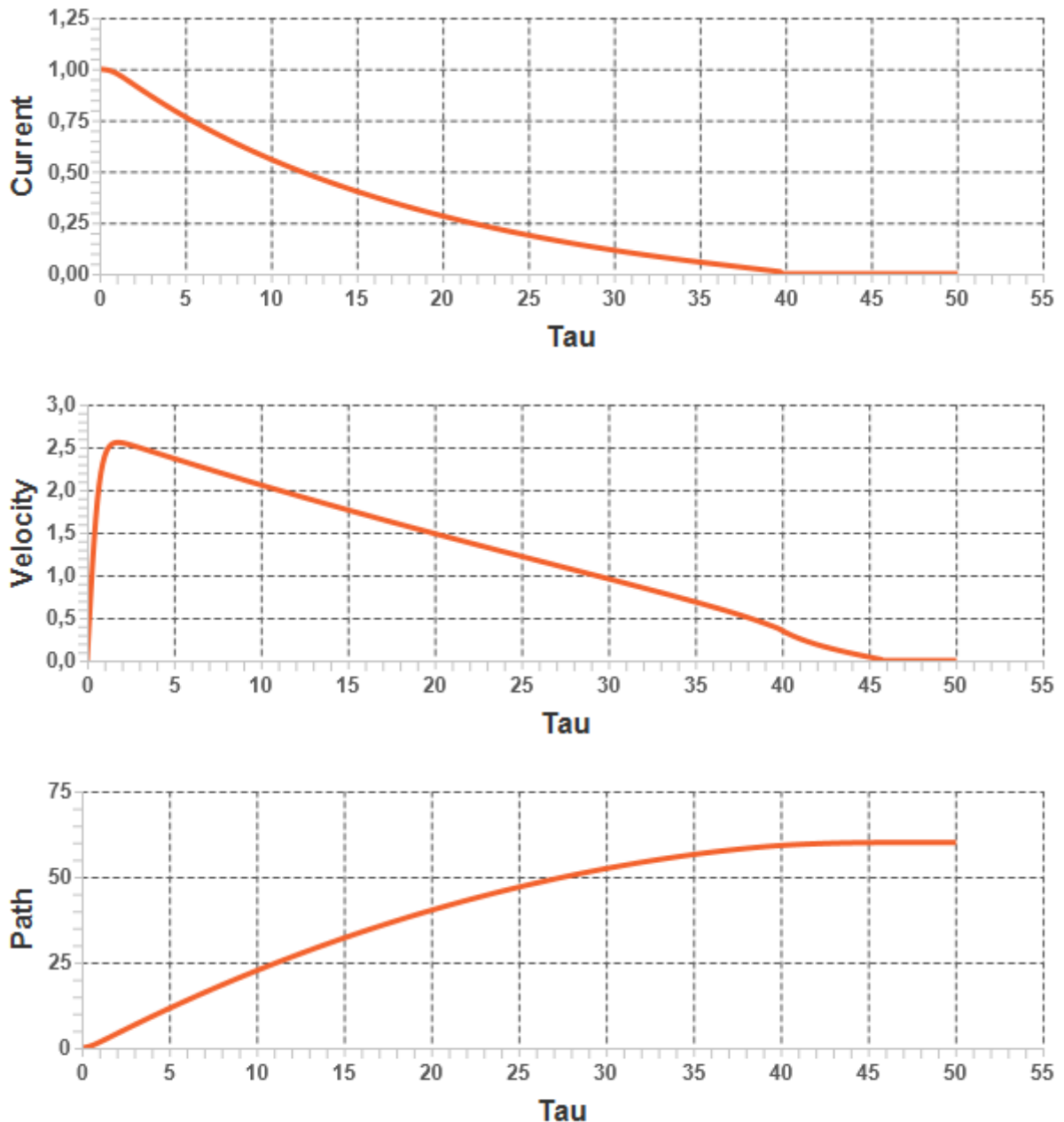


Рисунок 4.4 – Графіки зміни струму, швидкості та шляху при моделюванні руху електромобіля по горизонтальному відрізку дороги. Варіант 3

На графіках результату моделювання варіанту 3 уже видно результат впливу коефіцієнту  $C_1$ , оскільки часу на проходження відстані, що задані граничними умовами, є більше ніж необхідно при регулюванні лише за допомогою

коефіцієнта  $C_4$ . Чим більше абсолютне значення коефіцієнта  $C_1$  тим більш вигнута буде крива струму і відповідно менше енергії буде затрачено на проходження заданої відстані із більшою затратою по часу.

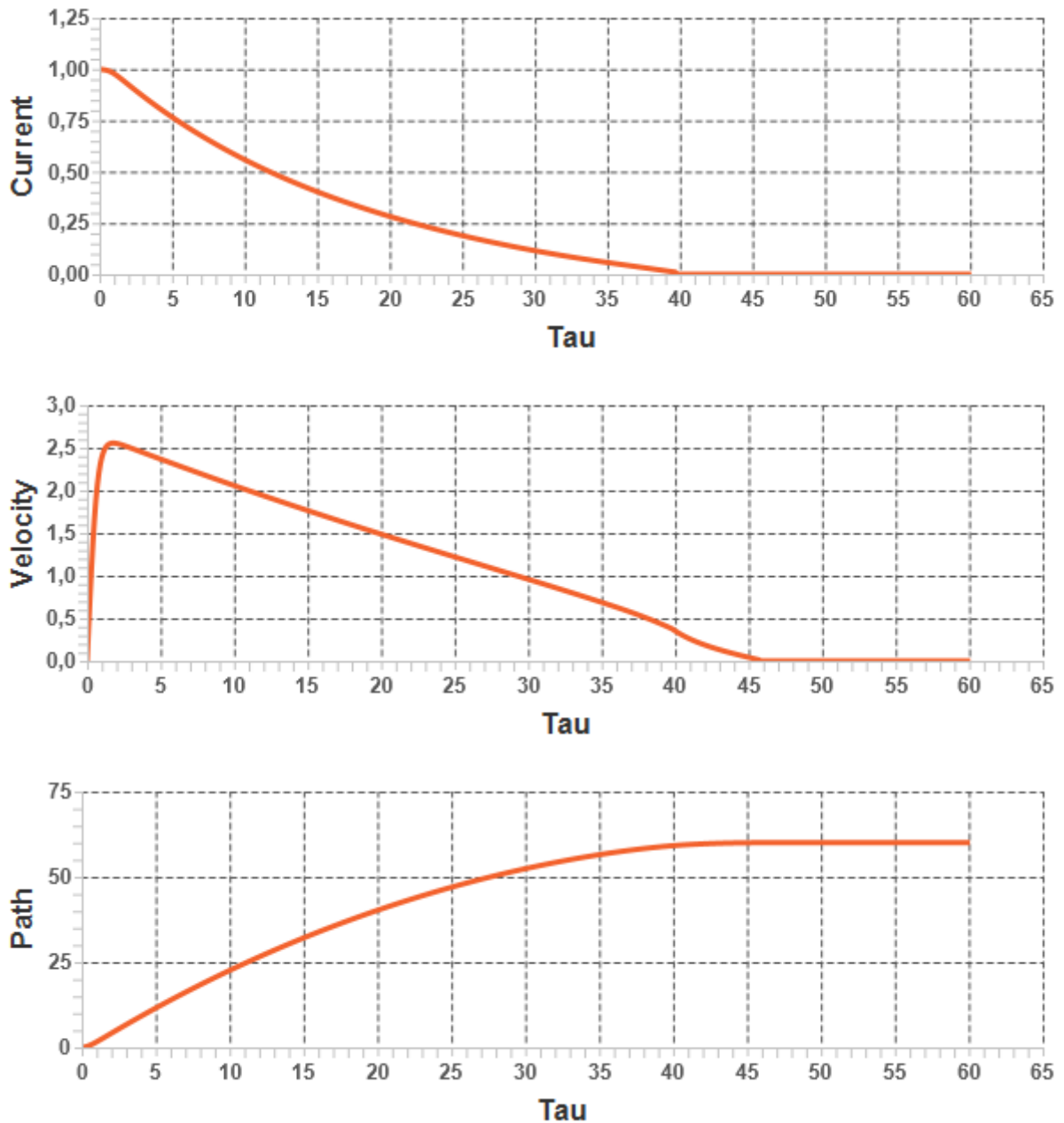


Рисунок 4.5 – Графіки зміни струму, швидкості та шляху при моделюванні руху електромобіля по горизонтальному відрізку дороги. Варіант 4

У варіанті 4 як і у варіанті 3 присутній вплив регулюючого коефіцієнта  $C_1$ , який зменшує витрати енергії за рахунок збільшення часу на подолання заданої відстані.

При порівнянні варіантів 2 та 3 видно, що із більшим запасом по часу для варіанту 3 були підібрані такі коефіцієнти які дозволили подолати ту ж саму відстань як і для варіанту 2 але витративши менше енергії, що можна бачити візуально наклавши графіки варіантів 2 та 3, як це зроблено на рисунку 4.6, та проінтегрувавши значення кривої струму по усьому діапазоні часу процесу руху, результати якого внесені до таблиці 4.3 для кожного із варіантів.

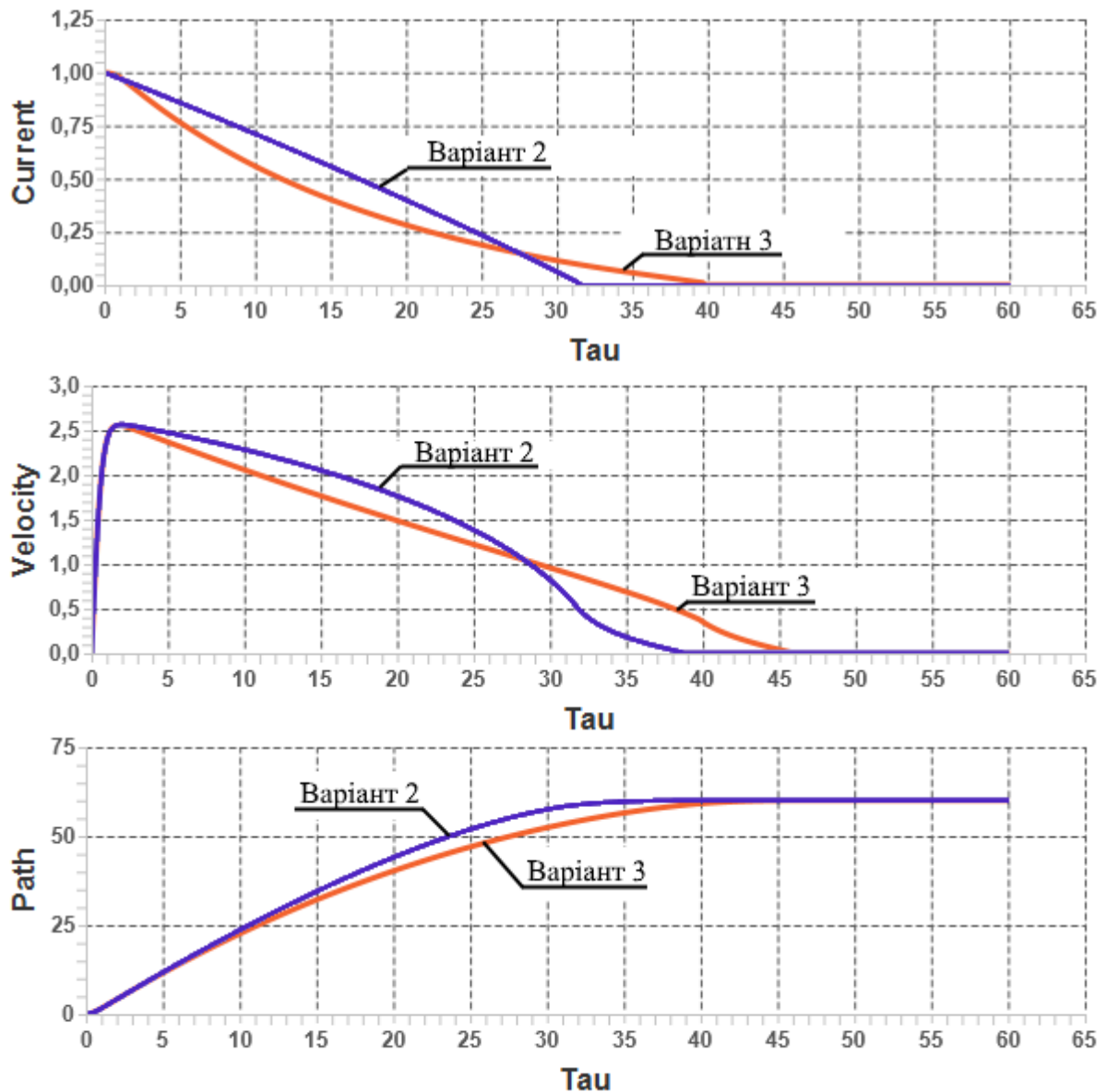


Рисунок 4.6 – Порівняння результатів моделювання варіантів 2 та 3

Однак, якщо порівняти варіанти 3 та 4, то графіки цих варіантів візуально накладаються один на одного. Тобто навіть при суттєвій подальшій зміні регулюючих коефіцієнтів  $C_1$  та  $C_4$  (навіть на порядки), як це зроблено для варіанту 4, вплив буде практично відсутній, оскільки «вигин» кривої струму,

який створюється коефіцієнтом  $C_1$  компенсується коефіцієнтом  $C_4$  для того щоб досягти значення пройденої відстані заданої граничними умовами. Таким чином визначено, що є певна межа ефективності регулюючих коефіцієнтів. Це видно також із значень площ кривих струмів варіантів 3 та 4 із таблиці 4.3.

Варто відзначити також, що для усіх варіантів значення коефіцієнта  $C_2$ , від числового значення якого залежить інерційність, є однаковим для обраних граничних умов цих варіантів. Розраховувався він так, як і описано в роботі [86]. Однак, якщо для комп'ютерного моделювання використовувати розрахований як описано в [86] коефіцієнт  $C_1$ , то він буде однаковим для усіх випадків окрім тих, для яких значення заданого граничного часу і необхідної відстані, яку потрібно подолати, є невеликими (не більше 5-7 відносних одиниць, як для часу так і для відстані). Такі варіанти не розглядалися через те, що тривалість вибігу займе майже весь виділений час на проходження заданої відстані і таким чином не буде задоволено граничні умови при врахованні початкових. Тому необхідне числове значення регулюючого коефіцієнта  $C_1$  знаходилось, як і  $C_4$ , шляхом послідовного наближення для кожного варіанту.

Отже, результати моделювання свідчать про те, що існує можливість забезпечення виконання критерію оптимального енергоспоживання шляхом підбору відповідних регулюючих коефіцієнтів.

Результатам моделювання руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізку дороги присвячено роботу [101].

Для моделювання процесу руху електромобіля на спуск та підйом в підрозділі 3.1 рівняння визначення швидкості –

$$v_{k+1} \approx v_k + \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln \left( i_k + \sqrt{i_k^2 + 1} \right) - (f_0 + f_1 v_k + f_2 v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k), \quad (2.49)$$

і рівняння визначення струму –

$$i_k(n) = i_k(n-1) - \frac{C_3}{n} \left\{ 2a \sqrt{(i_k(n-1))^2 + 1} (1 - 2\alpha i_k(n-1)) - \right. \\ \left. - \left( \frac{a^2 + b^2}{b} \right) \left( C_1^* e^{(f_1 \tau_k + 2f_2 v_k)(\tau_{k+1} - \tau_k)} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2 v_k} \right) \right\}, \quad (2.53)$$

руху електромобіля по горизонталі перетворено в рівняння для визначення швидкості та струму при русі на підйом –

$$\begin{aligned}
 v_{k+1} &\approx v_k + \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln(i_k + \sqrt{i_k^2 + 1}) - (-f_0^* \sin \beta_k + \\
 &\quad + f_0 \cos \beta_k + f_1 v_k + f_2 v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k), \\
 k &= 0, 1, 2, \dots; \quad \tau_0 = 0, \quad v_0 = v_{0s}, \quad i_0 = i_{0s}, \quad \beta_k \in \left[ 0, \beta_{\max} < \frac{\pi}{2} \right], \\
 i_k(n) &= i_k(n-1) - \frac{C_4}{n} \{ 2a \sqrt{(i_k(n-1))^2 + 1} (1 - 2\alpha i_k(n-1)) - \\
 &\quad - \left( \frac{a^2 + b^2}{b} \right) \left( C_1^* e^{(f_1 \tau_k + 2f_2 v_k)(\tau_{k+1} - \tau_k)} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2 v_k} \right) \}, \\
 n &= 1, 2, \dots, N \Rightarrow |i_{N-1} - i_N| \leq \varepsilon,
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

та в рівняння для визначення швидкості та струму при русі на спуск –

$$\begin{aligned}
 v_{k+1} &\approx v_k + \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} (\tau_{k+1} - \tau_k) \ln(i_k + \sqrt{i_k^2 + 1}) - (f_0^* \sin \beta_k + \\
 &\quad + f_0 \cos \beta_k + f_1 v_k + f_2 v_k^2) (\tau_{k+1} - \tau_k), \\
 k &= 0, 1, 2, \dots; \quad \tau_0 = 0, \quad v_0 = v_{0p}, \quad i_0 = i_{0p}, \quad \beta_k \in \left[ 0, \beta_{\max} < \frac{\pi}{2} \right], \\
 i_k(n) &= i_k(n-1) - \frac{C_4}{n} \{ 2a \sqrt{(i_k(n-1))^2 + 1} (1 - 2\alpha i_k(n-1)) - \\
 &\quad - \left( \frac{a^2 + b^2}{b} \right) \left( C_1^* e^{(f_1 \tau_k + 2f_2 v_k)(\tau_{k+1} - \tau_k)} - \frac{C_2^*}{f_1 + 2f_2 v_k} \right) \}, \\
 n &= 1, 2, \dots, N \Rightarrow |i_{N-1} - i_N| \leq \varepsilon.
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

В рівняннях (3.11) і (3.12) введено додатковий коефіцієнт  $f_0^*$  та кут нахилу поверхні покриття дороги  $\beta$  по якому рухатиметься електромобіль. Коефіцієнт знаходиться  $f_0^*$  із виразу:

$$\begin{aligned}
 f_0^* &= \frac{F_G T_M}{m V_H}. \\
 f_0^* &= \frac{15083.166 \cdot 17.376}{1538 \cdot 80} = 2.13.
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Відповідні зміни розрахунку швидкості будуть і у алгоритмі комп'ютерної програми, який представлено на рисунку 4.7. Результати моделювання руху на спуск та підйом представлено на рисунках 4.8-4.11 та в таблицях 4.4-4.7.

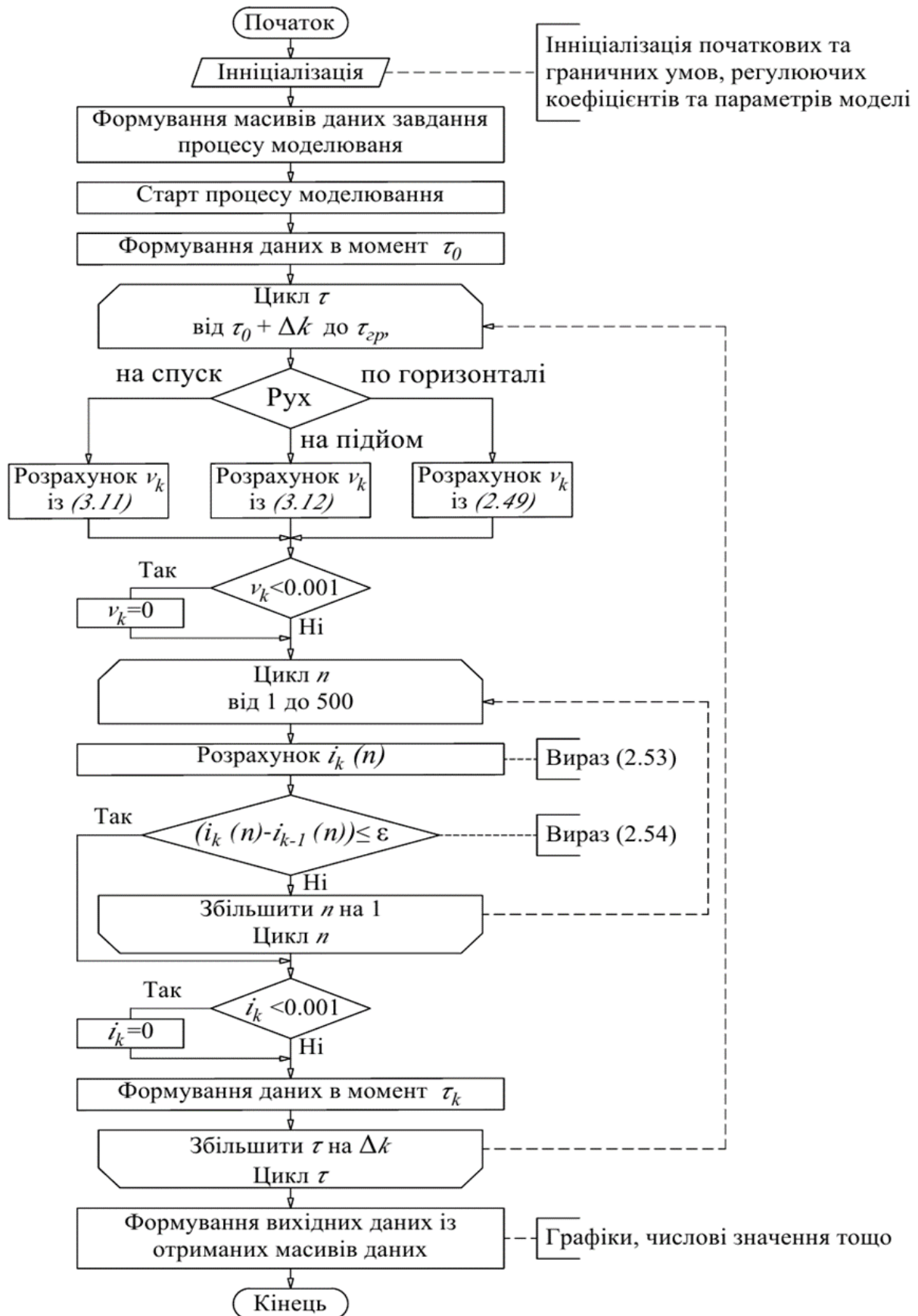


Рисунок 4.7 – Алгоритм виконання програми процесу моделювання при русі по горизонталі, на спуск та на підйом



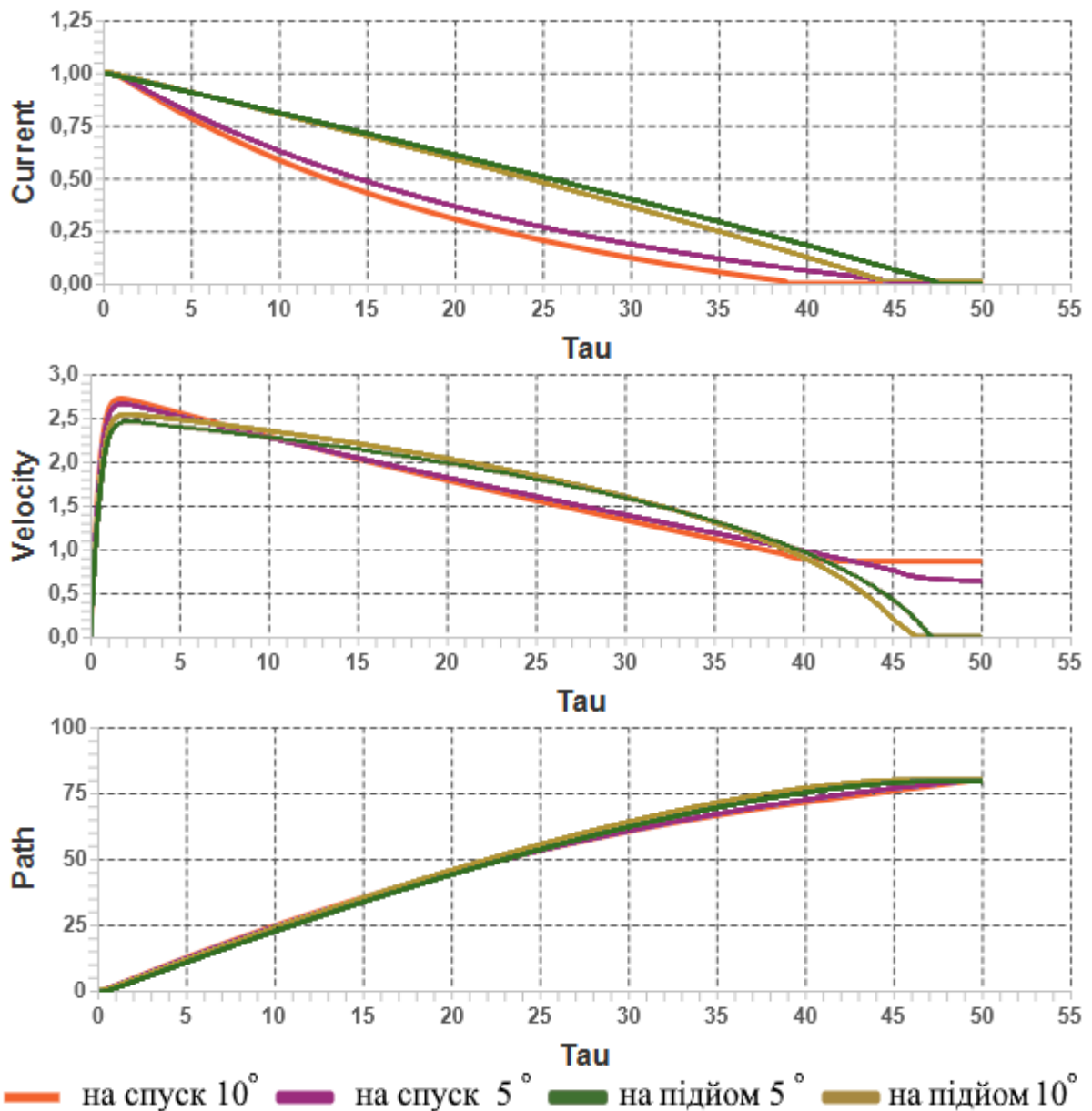


Рисунок 4.8 – Графіки зміни струму, швидкості та шляху при моделюванні руху електромобіля на спуск та підйом із граничними умовами варіанту 1

Таблиця 4.5 – Результати моделювання руху електромобіля на спуск та підйом із початковими та граничними умовами варіанту 2

Параметр	Спуск 10°	Спуск 5°	Підйом 5°	Підйом 10°
$i_k(\tau_{zp})$	0.0	0.0	0.0	0.0
$v_k(\tau_{zp})$	0.861	0.637	0.011	0.0
$l(\tau_{zp})$	60.003	60.004	59.999	60.001
$C_1$	-2	-1.11	-0.054	-0.01285
$C_2$	-0.001307	-0.001307	-0.001307	-0.001307
$C_4$	0.0002315	0.0003732	0.00487	0.01
$\int_{\tau_0}^{\tau_{rp}} i_k d\tau$	10.401	12.335	16.158	18.203

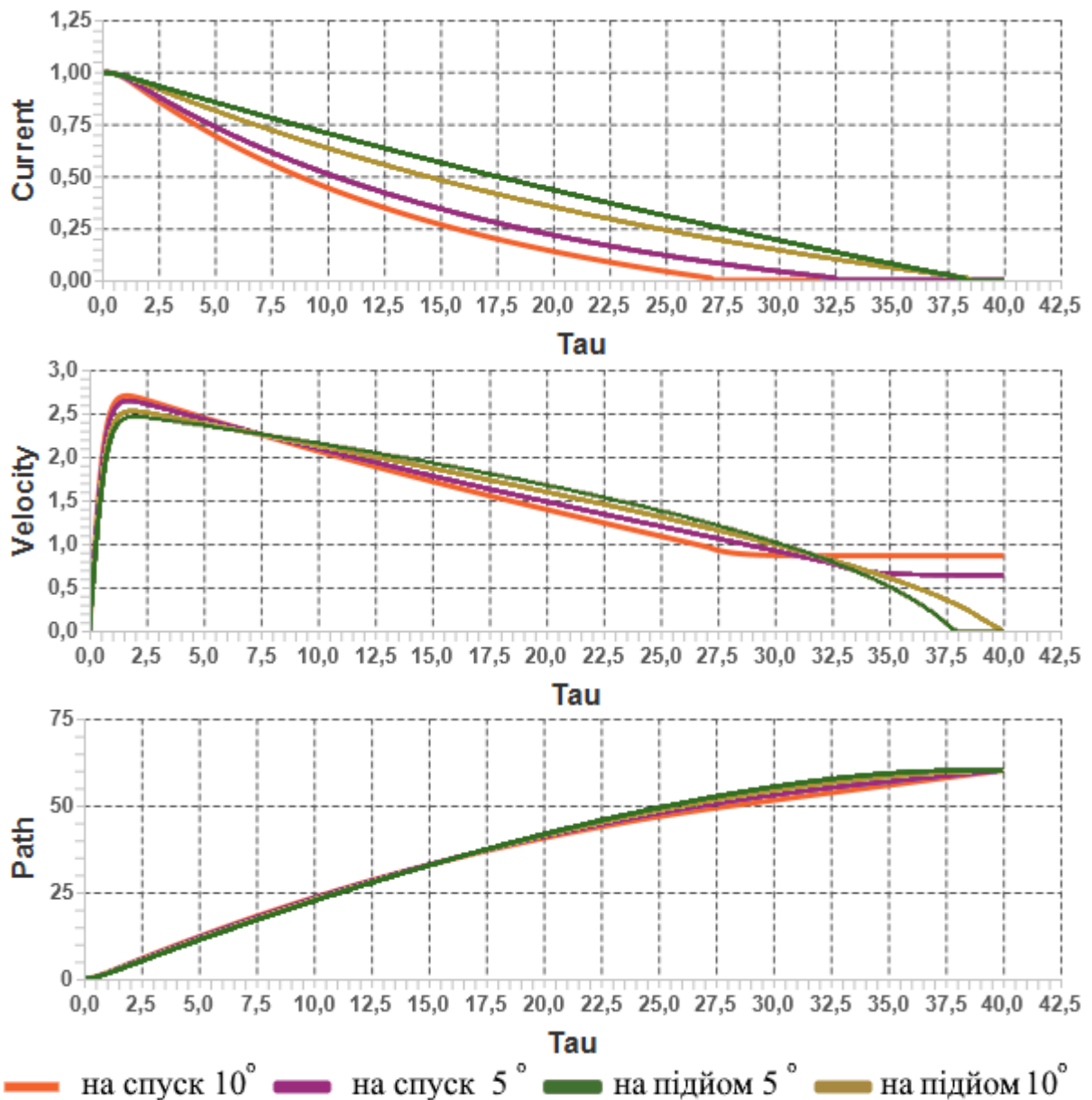


Рисунок 4.9 – Графіки зміни струму, швидкості та шляху при моделюванні руху електромобіля на спуск та підйом із граничними умовами варіанта 2

Таблиця 4.6 – Результати моделювання руху електромобіля на спуск та підйом із початковими та граничними умовами варіанта 3

Параметр	Спуск 10°	Спуск 5°	Підйом 5°	Підйом 10°
$i_k(\tau_{zp})$	0.0	0.0	0.0	0.0
$v_k(\tau_{zp})$	0.861	0.637	0.0	0.0
$l(\tau_{zp})$	60.002	60.006	60.004	59.999
$C_1$	-154	-74.9	-4.9	-0.5
$C_2$	-0.001307	-0.001307	-0.001307	-0.001307
$C_4$	0.000004742	0.000007085	0.0000809	0.0007315
$\int_{\tau_0}^{\tau_{rp}} i_k d\tau$	6.966	10.049	15.424	17.346

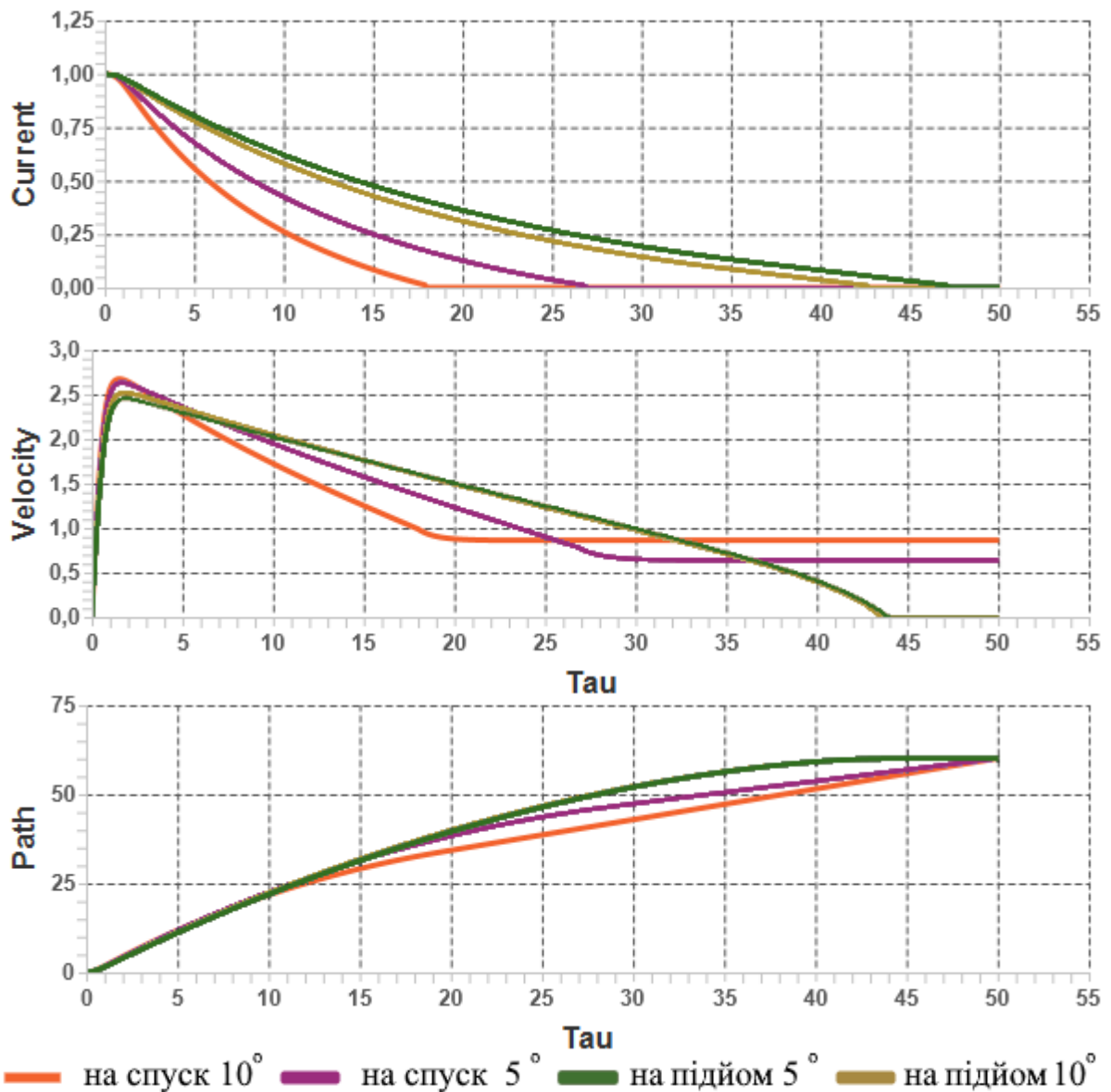


Рисунок 4.10 – Графіки зміни струму, швидкості та шляху при моделюванні руху електромобіля на спуск та підйом із граничними умовами варіанта 3

Таблиця 4.7 – Результати моделювання руху електромобіля на спуск та підйом із початковими та граничними умовами варіанта 4

Параметр	Спуск 10°	Спуск 5°	Підйом 5°	Підйом 10°
$i_k(\tau_{zp})$	0.0	0.0	0.0	0.0
$v_k(\tau_{zp})$	0.861	0.637	0.0	0.0
$l(\tau_{zp})$	60.0	60.0	60.0	60.006
$C_1$	-400.3	-200.4	-275.37	-275
$C_2$	-0.001307	-0.001307	-0.001307	-0.001307
$C_4$	0.0000039	0.00000351	0.000001448	0.000001409
$\int_{\tau_0}^{\tau_{rp}} i_k d\tau$	3.558	7.8	15.411	17.26

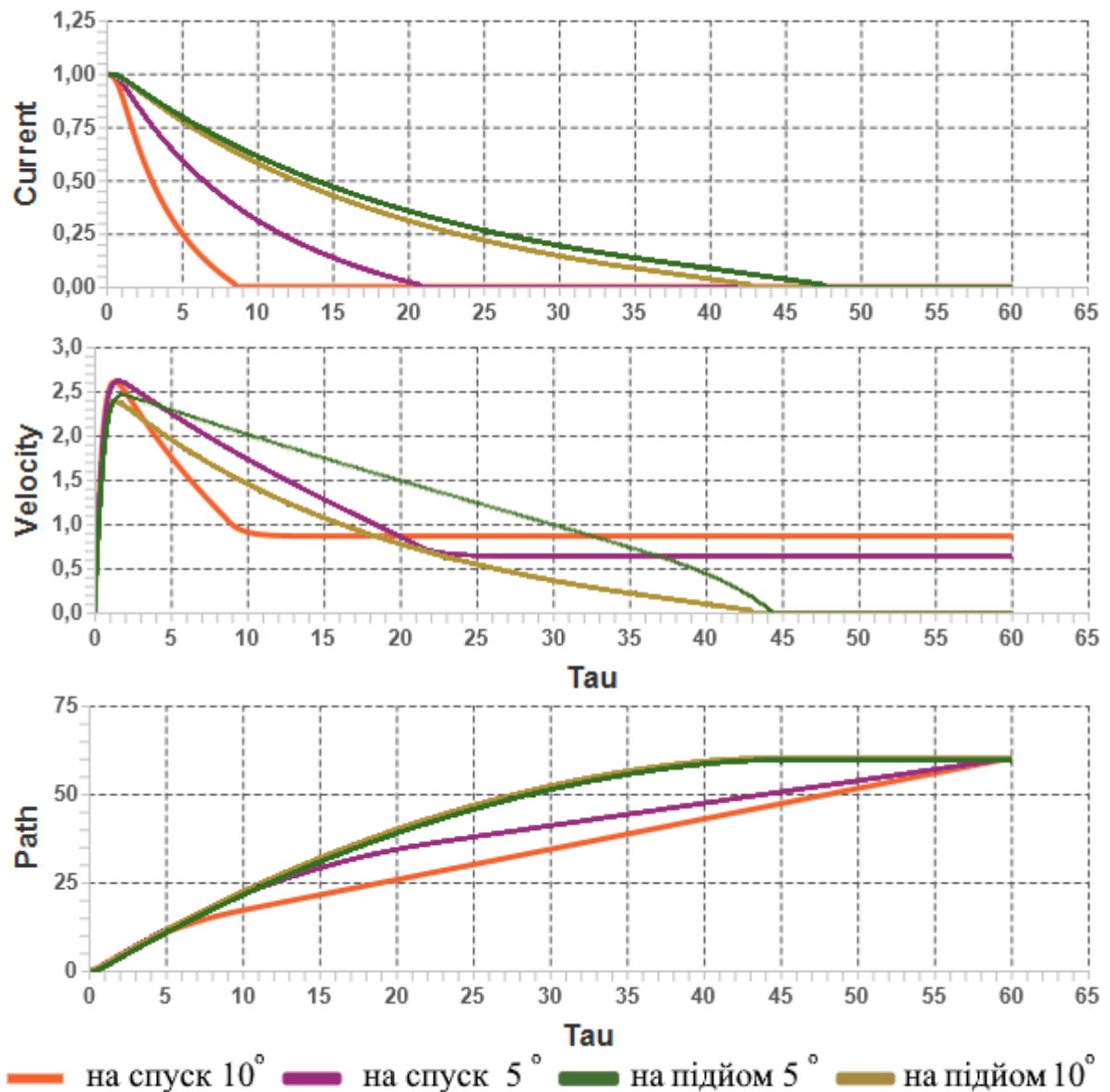


Рисунок 4.11 – Графіки зміни струму, швидкості та шляху при моделюванні руху електромобіля на спуск та із граничними умовами варіанта 4

Як і для моделювання руху лише по горизонтальному відрізку дороги для моделювання на спуск та підйом спостерігаються ті ж умови руху (інерційність автомобіля, опір кочення, опір зустрічного потоку повітря тощо), що присутні і для реального автомобіля. Коефіцієнт  $C_2$  також незмінний для усіх представлених випадків моделювання руху. Також варто відзначити певні особливості щодо процесу моделювання, як і для горизонтального руху так і для інших варіантів (особливо для руху на спуск), щоб на даному етапі надмірно не ускладнювати модель, гальмування відсутнє. І ще одна особливість яка

спостерігається, але тільки у випадках руху на підйом, це те, що швидкість може бути тільки додатною, тобто автомобіль з часом не покотиться назад при нульовому (та близькому до нього) значенні струму.

І дещо повертаючись до моделювання руху по горизонталі, якщо подивитись його результати варіанту 2 із таблиці 4.3 і порівняти значення площі кривої струму із значеннями руху на підйом в 5 градусів варіанту 2 із таблиці 4.6, то видно більші енергетичні витрати при русі по горизонталі. Проте це пояснюється тим, що для горизонтального руху не використовувалась в повній мірі оптимізація руху, оскільки вплив коефіцієнта  $C_l$  було виключено. І це також наводить на думку, що можна підібрати декілька комбінацій регулюючих коефіцієнтів, використавши які, можна задовільнити граничні умови і уточнюючи які, можна зменшити різницю між бажаним та отриманим значеннями, здійснивши таким чином більш ефективну оптимізацію. Проте, як це було зазначено вище, до певної межі, після якої подальша зміна коефіцієнтів уже не дає необхідного ефекту.

Із результатів моделювання руху на спуск, можна помітити – це швидкість після моменту досягнення пройденої відстані до значення граничної, вона не зменшується до нуля, а тримається певного значення. Оскільки кут нахилу в усіх випадках незмінний на протязі усього циклу моделювання, то буду цілком очевидно, що при русі на спуск без гальмування автомобіль буде рухатись далі під дією сили тяжіння із швидкістю що залежить від кута схилу (це і спостерігається, для руху зі схилу із кутом в 10 градусів швидкість після досягнення граничної відстані буде триматись на рівні вищому ніж для 5 градусного схилу). І площа кривої струму буде меншою для схилу із більшим кутом, відповідно модель забезпечуватиме зниження витрат електроенергії за умови сприяючої рухові автомобіля силі тяжіння.

В умовах руху на підйом сила тяжіння вчиняє на автомобіль зустрічну його рухові силу тому для досягнення граничних умов потрібно затрати більше електроенергії, що і спостерігається на графіках. Для даного типу руху, на відмінну від руху на спуск та по горизонталі, ще збільшує енергоспоживання і

значне гасіння руху вільним вибігом автомобіля по інерції силою тяжіння і, як видно, значення струму і швидкості майже одночасно досягають нульового значення або навіть значення швидкості досягає нульового значення раніше за струм.

Дивлячись на характери зміни кривих струму для усіх представлених результатів моделювання руху для кожного із варіантів видно що завдяки алгоритму моделі менше енергії витрачено на спуск, більше – на підйом. Відповідно, збільшення кута нахилу для спуску буде зменшувати потребу в додатковому тяговому зусиллі приводу електромобіля, а для підйому навпаки збільшувати, що характерно реальним умовам руху на спуск та підйом.

Таким чином, підібравши відповідні регулюючі коефіцієнти, модель здатна забезпечити оптимізацію енергоспоживання і для умов руху на спуск, які сприяють зменшенню витрат електроенергії силової акумуляторної батареї електромобіля, і для умов руху на підйом, що навпаки накладають додаткові супротивні руху електромобіля сили враховуючи обмеження задані умовами граничних відстані і часу.

## **4.2 Реалізація системи підтримки прийняття рішення для водія електромобіля**

Орієнтуючись на отримані в розділі 2 математичні моделі для оптимізації руху електромобіля при русі по горизонтальному відрізку дороги за критерієм мінімізації витрат енергії, на їх узагальнення для умов руху електромобіля по дорозі на спуск та на підйом і на способи визначення таких значень швидкостей руху електромобіля, при проходженні ним поворотів, за яких його не буде заносити чи перевертати, що отримані в розділі 3, в дисертації запропоновано структуру системи підтримки прийняття рішення (СППР) для водія електромобіля, яка собою являє трирівневу предметно-інформаційну сукупність, із першим рівнем у вигляді автоматизованих датчиків, другим – у вигляді бортового комп'ютера, із встановленим програмним забезпеченням для взаємодії із третім рівнем, який у вигляді застосунку встановлюється у смартфон

водія електромобіля та в якому у реальному часі розраховуватиметься оптимальні значення струму для електропривода електромобіля відповідно до синтезованих математичних моделей оптимізації його руху та визначення швидкісних обмежень для уникнення заносу чи перевертання при проходженні ним поворотів, які будуть виводитись на інформаційне табло електромобіля, тим самим інформуючи водія про поточні параметри руху, пропоновані параметри руху, які оптимізовані за критерієм зменшення витрат енергії акумуляторної батареї електромобіля, та швидкісні обмеження для уникнення заносу чи перевертання електромобіля. На рисунку 1 зображено функціональну схему такої структури. На схемі, що зображена на рисунку 1, елемент із номером 1 – силова акумуляторна батарея, 2 – блок керування двигуном (інвертором), 3 – інвертор постійного струму в змінний, 4 – асинхронний двигун, 5 – бортовий комп'ютер електромобіля, 6 – бортовий дисплей (інформаційне табло), водій електромобіля – 7, 8 – акселератор, 10 – частотомір, 11,12,13 – сенсори струму, напруги і швидкості відповідно, 14 – сенсор кута нахилу електромобіля (тангажу), 15 – сенсор кута повороту електромобіля (рискання), 16-21 – аналогово-цифрові перетворювачі.

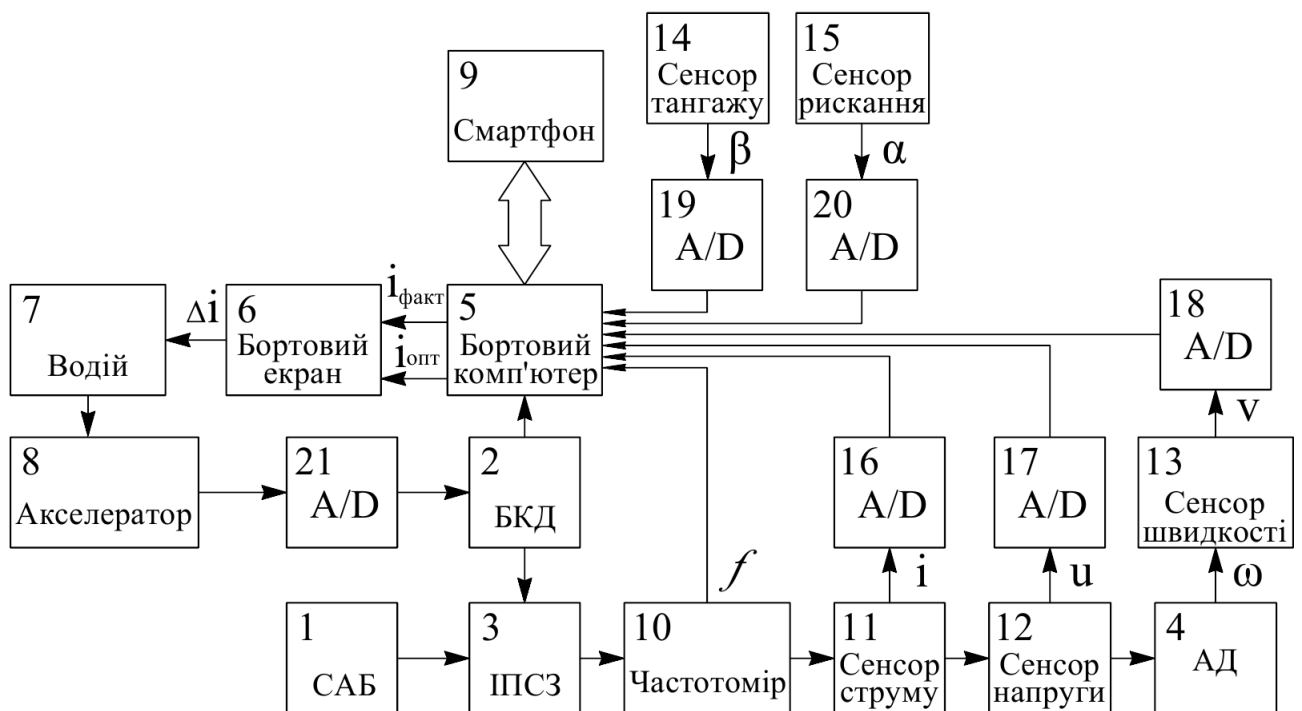


Рисунок 4.12 – Функціональна схема системи підтримки прийняття рішення

Необхідні для роботи системи параметри: струм та напруга статора АД, частота живлення АД, швидкість руху електромобіля, кут тангажу та кут рискання автомобіля і для зчитування даних параметрів у сучасних автомобілях як правило є встановлені усі необхідні сенсори які зчитують необхідні значення та пристрої які сигнали від сенсорів перетворюють у необхідну форму для їх сприйняття бортовою електронікою. Якщо ж якихось із них не вистачатиме то у сучасному світі не буде суттєвою проблемою додаткового встановлення необхідних сенсорів та периферії. Щодо програмного забезпечення, як зазначено вище, необхідна реалізація програмних модулів для інтеграції СППР у бортовий комп'ютер транспортного засобу які слугуватимуть вузлом для транслявання даних між сенсорами та застосунком на смартфоні водія, який буде вузлом для усіх необхідних обчислень, а також і транслявання даних поточного і оптимального значень струмів від сенсорів та застосунку смартфона відповідно до бортового дисплея.

Виходячи із інформації почерпнутої із посібника для проектування тягового інвертора від Texas Instruments [101] із схеми трифазного дворівневого інвертора, яка зображена на рисунку 4.13, електричні (струм, напруга та частота) та механічні (позиція або швидкість обертання валу електричного двигуна) параметри можна отримати із блоку управління двигуном (MCU – Motor Control Unit), оскільки ці параметри він отримує за зворотними зв'язками від сенсорів електродвигуна і які можуть бути передані через внутрішні інформаційні канали від блоку управління двигуном до бортового комп'ютера автомобіля, які у свою чергу передаватимуться до смартфона водія електромобіля із встановленим застосунком СППР.



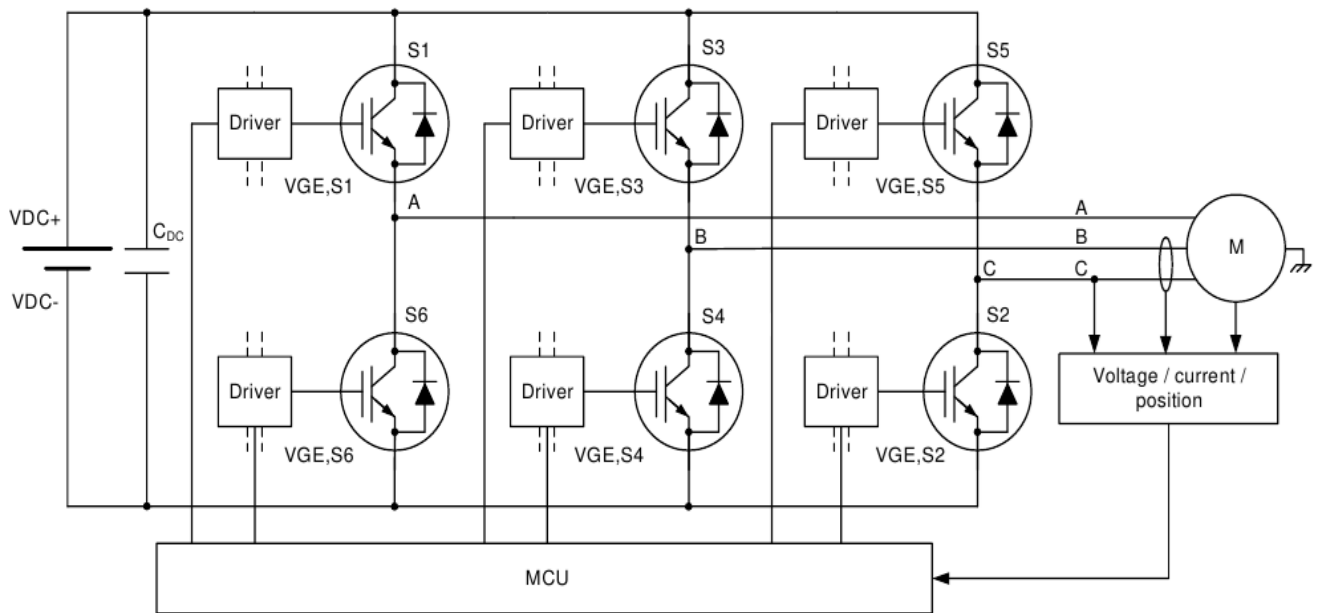


Рисунок 4.13 – Схема трифазного дворівневого IGBT інвертора

Значення кутів рискання та тангажу автомобіля для системи СППР можна отримати від сенсорів системи Електронного Контролю Стійкості – ЕКС (англ. ESC – Electronic Stability Control або ESP – Electronic Stability Program) яка, відповідно до постанови Європейського Союзу від 1 листопада 2014 року, є обов’язковою системою для нових автомобілів. Як зазначено у специфікації [102] найбільшого виробника систем ЕКС – Bosch, сучасні системи ЕКС мають інерційні сенсори, що здатні вимірювати прискорення у 6 вимірах (прискорення: крену, тангажу, рискання, повздовжні, поперечні та вертикальні).

Для організації встановлення комунікації між бортовим комп’ютером та смартфоном водія компанія Bosch пропонує рішення для інтеграції мобільних застосунків в автомобіль із назвою mySPIN і має сумісність великою кількістю сучасних легкових автомобілів та 2-х колісних транспортних засобів. Представлений технічний концепт системи інтеграції зображено на рисунку 4.14.

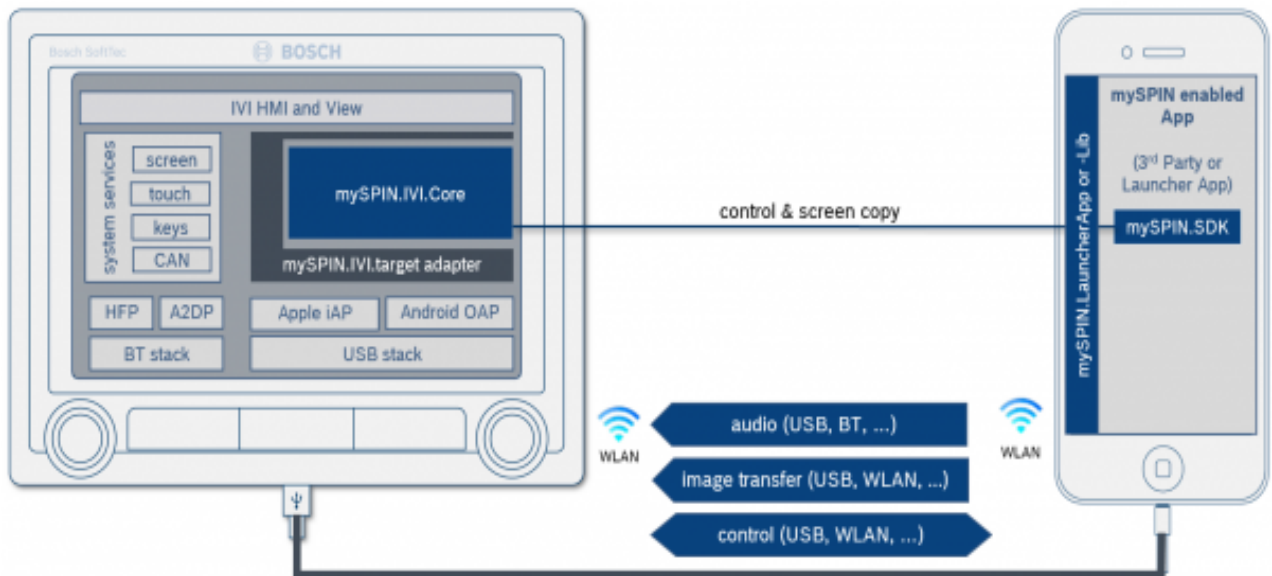


Рисунок 4.14 – Технічна концепція mySPIN

MySPIN доступний для Android та iOS пристроїв і він дозволяє зареєстрованим застосункам 3-х сторін встановлювати з'єднання із бортовою інформаційною системою (бортовим комп'ютером) автомобіля і отримувати доступ до певних типів його технічних даних та оточуюче навколишнє середовище (наприклад, інформацію про рух транспортного засобу, інформацію про технічне обладнання транспортного засобу та його статус, інформацію про фізичне середовище автомобіля та умови навколишнього середовища).

Щодо реалізації застосунку смартфона, який буде являти собою програмний комплекс для визначення оптимальних параметрів керування рухом транспортного засобу на основі отриманих даних від сенсорів автомобіля і виведення результатів на бортовому інформаційному табло, можна і варто закладати не тільки розроблені моделі оптимального руху, а і інші системи, наприклад розширити функціональні можливості шляхом інтеграції елементів навігації на основі OSRM (англ. Open Source Routing Machine), що є маршрутизатором з відкритим кодом, який розроблений для використання з даними з проекту OpenStreetMap. А OpenStreetMap – є публічним відкритим проектом для збору, збереження та розповсюдження загальнодоступних геопросторових даних, створення інструментів для роботи з ними силами спільноти волонтерів і охоплює всю поверхню Землі. Таким чином елементи

навігації дозволять, при імплементації відповідних систем та даних, визначати не тільки початкові умови стану руху транспортного засобу в конкретний момент часу опитуючи його сенсори, а і граничні умови, шляхом визначення маршруту за яким рухається транспортний засіб, і його поділом на ділянки (наприклад від повороту до повороту, між початком схилу та його кінцем, прямолінійним відрізком дороги тощо) і відповідно обчислюючи на кожній такій ділянці оптимальні параметри руху. Елементи навігації також дозволять до визначення необхідних початкових та граничних умов визначати і обмеження які накладатимуться під час руху дорожніми знаками, розміткою та транспортним потоком.

Для представленої сукупності систем програм важливим етапом під час їх розробки буде реалізація високоефективних алгоритмів які будуть оптимально споживати обмежені обчислювальні ресурси смартфонів, оскільки для СППР необхідно буде в реальному часі виконувати велику кількість розрахунків та опрацьовувати чималу кількість вхідних даних від сенсорів автомобіля та офлайн чи онлайн служб навігації.

Враховуючи вище перелічене на рисунку 4.15 представлено базову концепцію рішення реалізації СППР, в якій вказані елементи систем та їх взаємозв'язки.

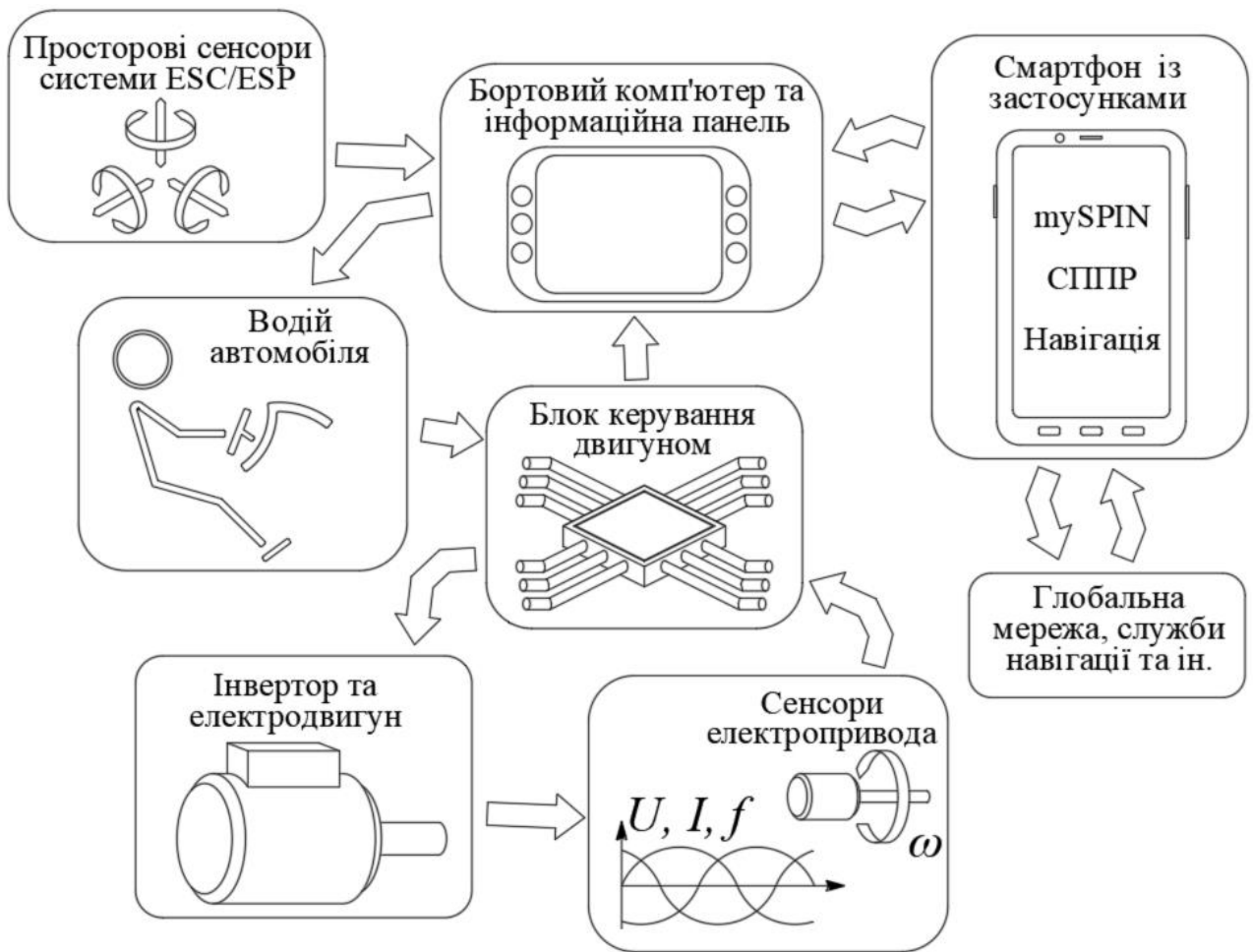


Рисунок 4.15 – Базова концепція структури СППР інтегрованої до систем автомобіля

### 4.3 Висновки за матеріалами четвертого розділу

1. Розроблено алгоритм та комп'ютерну програму для моделювання процесу руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізку дороги, оптимального за критерієм мінімуму електричних втрат, на основі синтезованих моделей, в основу яких покладено математичну модель кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса та варіаційний варіант методу невизначених множників Лагранжа.

2. Використовуючи розроблену програму здійснено процес моделювання руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізку дороги за чотирьох різних граничних умов та представлено графіки кривих струму, швидкості та пройденої відстані для кожного із змодельованих варіантів процесу руху, а також числові значення

струму, швидкості та пройденої відстані в момент часу заданого граничними умовами.

3. Здійснено детальний аналіз отриманих графічних та числових результатів моделювання, який свідчить про здатність синтезованих моделей, що використані для комп'ютерного моделювання, в разі їх покладення в основу законів керування електромобілем, забезпечувати виконання критерію оптимальності споживання електричного заряду САБ електроприводом електромобіля та задовольняти обмеження, задані початковими та граничними умовами, шляхом встановлення відповідних регулюючих коефіцієнтів, чим підтверджено теоретичні виклади та доведено ефективність синтезованих моделей.

4. Розроблену комп'ютерну програму, для моделювання процесу руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізьку дороги, узагальнено для можливості здійснити моделювання процесу руху на схилах та підйомах.

5. Використовуючи узагальнену програму, здійснено процес моделювання руху електромобіля з асинхронним електроприводом під час руху на спуск та на підйом із різним ступенем нахилу для варіантів граничних умов використаних при моделюванні горизонтального руху електромобіля умов та представлено графіки кривих струму, швидкості та пройденої відстані для кожного із змодельованих варіантів процесу руху та кожного ступеня нахилу на спуск та на підйом, а також числові значення струму, швидкості та пройденої відстані в момент часу заданого граничними умовами.

6. Детально проаналізовано отримані результати моделювання руху на спуск та підйом, які і для даних умов руху підтверджують ефективність синтезованих моделей забезпечувати виконання критерію оптимальності споживання електричного заряду САБ електроприводом електромобіля та задовольняти обмеження, задані початковими та граничними умовами шляхом встановлення відповідних регулюючих коефіцієнтів.

7. Запропоновано перспективний варіант реалізації структури системи підтримки прийняття рішення для водія електромобіля під час його керування при русі дорогою по горизонталі, на спуск та на підйом, а також при подоланні ним поворотів для досягнення оптимальних витрат енергії силової акумуляторної батареї електроприводом електромобіля та забезпечення стійкості його руху на поворотах, в якому використані синтезовані авторами математичні моделі. Проведено огляд та аналіз сучасних систем керування електромобілями, на основі яких визначені перспективи реалізації СППР, та можливості інтеграції програмного забезпечення систем на базі операційних систем Android та iOS до інформаційних систем електромобілів та можливості по розширенню їх функціоналу для підвищення ефективності роботи системи.

При викладені змісту четвертого розділу використані результати дослідження, опубліковані в роботах [104], [105], [106] автора дисертації.

## ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційного дослідження отримані такі результати:

1. Показано, що результати, отримані в дослідженнях ряду вчених, присвячених розв'язанню задачі частотного керування режимами роботи короткозамкнутого асинхронного електродвигуна, оптимального за критерієм мінімуму електричних втрат, вимагають суттєвої корекції, оскільки вони отримані з використанням спрощених математичних моделей електричних машин, які не враховують їх нелінійну магнітну характеристику, що не відповідає фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин і вимагає стабілізації магнітного потоку в зазорі на рівні, який задається горизонтальним відрізком кривої намагнічування, незалежно від змін частоти струму в обмотці статора.

2. Вперше запропоновано розв'язувати задачу оптимального за критерієм мінімуму втрат електричної енергії частотного керування режимами роботи короткозамкнутого асинхронного електродвигуна, який є тяговим в системі привода електромобіля, з використанням варіаційного варіанту методу Лагранжа та математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса, яка з високою точністю зв'язує між собою електричний струм в обмотці статора асинхронного двигуна з магнітним потоком, який створюється полем цього струму, а тому відповідає фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин і дозволяє отримати поле екстремалей в координатах відносний час, відносна швидкість руху електромобіля та відносний струм в обмотці статора його приводного електродвигуна.

3. Удосконалено метод ідентифікації моделей руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізку дороги, оптимальних за критерієм мінімуму електричних втрат, синтезованих з використанням математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса, яка з високою точністю зв'язує між собою

електричний струм в обмотці статора асинхронного двигуна з магнітним потоком, який створюється полем цього струму, а тому відповідає фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин, та з застосуванням варіаційного варіанту методу Лагранжа, що приводить до поля екстремалей в координатах відносний час, відносна швидкість руху електромобіля та відносний струм в обмотці статора його приводного електродвигуна, на першому етапі реалізації якого визначаються константи, котрі мають місце у цих моделях внаслідок використання двічі операції інтегрування в процесі їх синтезу, на другому етапі реалізації пропонується прямий алгоритм визначення швидкості електромобіля на основі моделі його динаміки, а на третьому етапі синтезується ітераційний алгоритм визначення струму, зв'язаного зі швидкістю електромобіля співвідношенням, отриманим в результаті розв'язання задачі оптимізації методом невизначених множників Лагранжа. А також визначені умови, які накладаються на ітераційний процес ідентифікації моделі оптимального струму, що подається з силової акумуляторної батареї електромобіля через перетворювач постійного струму в змінний в обмотку статора приводного асинхронного електродвигуна, та умови, яким повинен задовольняти процес визначення моментів часу, в які здійснюється процес ідентифікації цієї моделі, від яких залежить точність визначення координат траєкторії оптимального руху електромобіля.

4. Удосконалено метод синтезу та ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом під час руху дорогою на спуск та на підйом, в якому використано той же підхід, що й запропонований нами під час розроблення методу синтезу та ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізку дороги, але з іншими граничними умовами, з іншою процедурою їх використання для визначення констант, котрі мають місце у цих моделях внаслідок використання двічі операції інтегрування в процесі їх синтезу методом невизначених множників Лагранжа, а також з іншою процедурою реалізації прямого алгоритму визначення швидкості електромобіля на основі моделі його



динаміки, яка у випадку руху на спуск та на підйом в якості параметрів містить в собі ще й кут нахилу повздовжньої осі рами електромобіля до горизонтальної площини, який є величиною змінною у просторі, тож для електромобіля, що рухається, є величиною змінною і в часі, а тому вимагає вимірювання відповідним пристроєм. Показано також, що в разі, якщо електромобіль виїжджає на горизонтальну ділянку дороги зі спуску чи підйому без зупинки, то для визначення констант в моделях його оптимального руху горизонтальною ділянкою дороги стають непридатними вирази, що отримані нами раніше для випадку, коли визначались моделі оптимального руху електромобіля горизонтальною ділянкою дороги від зупинки до зупинки, оскільки змінюються граничні умови, а тому і вирази, за якими визначаються ці константи стають за своєю структурою наближеними до тих, які отримані нами для моделей оптимального руху електромобіля на спуск чи підйом.

5. Для визначення швидкості руху по закругленню дороги автомобілів як з двигунами внутрішнього згорання так і з електричним приводом, не перевищення якої унеможлиблює їх занос чи перевертання, вперше здійснена інтеграція математичних моделей руху автомобіля по закругленню дороги, синтезованих як на основі балансних рівнянь його кінематики, так і на основі балансних рівнянь його динаміки. Визначено перспектив інтеграції до цієї сукупності математичних моделей автомобіля і ще однієї математичної моделі, що синтезована в просторі лінгвістичних змінних, які характеризують невизначеність стану дорожнього покриття та ступінь зношення шин на різних колесах автомобіля.

6. Для оцінювання адекватності моделей оптимального руху електромобіля з тяговими електродвигунами змінного струму здійснене імітаційне моделювання руху електромобіля з асинхронним електроприводом по горизонтальному відрізку дороги та по відрізку дороги на спуск і підйом, оптимального за критерієм мінімуму електричних втрат, з використанням синтезованих моделей, в основу яких покладено математичну модель кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса та варіаційний

варіант методу невизначених множників Лагранжа. Виконано чотири варіанти моделювання процесів руху на відрізку дороги по горизонталі та різного ступеня нахилу відрізку дороги на спуск та на підйом з різними значеннями граничних умов. Проведено аналіз результатів усіх чотирьох варіантів моделювання з використанням синтезованих моделей, на основі якого встановлено, що рух електромобіля як горизонтальним відрізком дороги так і дорогою на спуск чи на підйом в разі, якщо його системою керування буде реалізуватись закон, в основу якого будуть покладені алгоритми, що базуються на синтезованих моделях, то для покриття електромобілем однієї і тієї ж відстані за один і той же час використовуватиметься мінімальне споживання електричного заряду силової акумуляторної батареї, від якої отримує електроенергію електропривод електромобіля. Отримані результати моделювання та їх аналіз підтверджують теоретичні виклади і ефективність синтезованих математичних моделей оптимального руху електромобіля горизонтальним відрізком дороги.

7. На основі синтезованих математичних моделей та розроблених алгоритмів запропоновано перспективний варіант реалізації структури системи підтримки прийняття рішення для водія електромобіля для досягнення оптимального руху за критерієм мінімізації витрат заряду САБ та забезпечення стійкості його руху на поворотах. Проведено огляд та аналіз сучасних систем керування електромобілями, на основі яких визначені перспективи реалізації СППР, та можливості інтеграції програмного забезпечення систем на базі операційних систем Android та iOS до інформаційних систем електромобілів та можливості по розширенню їх функціоналу для підвищення ефективності роботи системи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Motor vehicle. [Online] Available:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Motor\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_vehicle)
- [2] Global EV Outlook 2021 [Online] Available:  
<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
- [3] 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] CO<sub>2</sub> equivalents. [Online] Available: <https://www.myclimate.org/information/faq/faq-detail/what-are-co2-equivalents/>

[17] Our World in Data. CO<sub>2</sub> 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](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country)

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

[24] Electric car. [Online] Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_car](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](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](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/](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](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](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/](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](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/rav4evdisman2nd.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/](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://d3d6mf6ofxeyve.cloudfront.net/wieckautodeadline60/files/2020%20Audi%20e-tron%2055%20quattro%20\(265kW\)%20Tech%20Data%20Aue71b2fc896464b519648ae70774f701d.pdf](http://d3d6mf6ofxeyve.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/](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](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/](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](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 футуристичний "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/](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](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 ОБҐРУНТУВАННЯ 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](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-roczy/>

[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](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.iaras.org/iaras/filedownloads/ijcsr/2017/011-0031\(2017\).pdf](http://www.iaras.org/iaras/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](https://cdn.intechopen.com/pdfs/19572/InTech-Modeling_and_simulation_of_high_performance_electrical_vehicle_powertrains_in_vhdl_ams.pdf)

[64] Erik Scholtz - 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](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](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](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](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] О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, В. А. Лобатюк, і О. П. Кубрак, «ДЕКОМПОЗИЦІЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З КОМБІНОВАНИМ ПРИВОДОМ», *НаукПраці ВНТУ*, вип. 3, Лис. 2015.

[76] О. Б. Мокін, О. Д. Фолюшняк, Б. І. Мокін, і В. А. Лобатюк, «ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИМ ВІДРІЗКОМ АВТОМАГІСТРАЛІ», *Вісник ВПІ*, вип. 1, с. 107–111, Лют. 2014.

[77] В.В. Горенюк, «ОГЛЯД НАУКОВИХ ПРАЦЬ ПРИСВЯЧЕНИХ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯМ З ТЯГОВИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЗМІННОГО СТРУМУ». XLVIII Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2019) <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/26864/7287.pdf?sequence=3>

[78] В. А. Лобатюк, О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, *Математичні моделі оптимального руху електромобілів з електроприводом постійного струму*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2019.

[79] Ю. П. Петров, *Вариационные методы теории оптимального управления*. Москва-Ленинград: Энергия, 1965, 220 с.

[80] 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.

[81] 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.

[82] В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинського, Л. А. Жукова и др., *Электротехнический справочник в 3-х т. Т.2. Электромеханические устройства*. 6-е изд., испр, и доп. Под общ. ред. проф. МЭИ В. Г. Герасимова М.: Энергоиздат, 1981, 640 с.

[83] И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев, *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов*. М.: Наука, 1967, 608 с.

[84] Я.З. Цыпкин. *Адаптация и обучение в автоматических системах*, Москва: Наука, 1968, 400 с.

[85] 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.

[86] 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.

[87] В. А. Лобатюк, О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, *Математичні моделі оптимального руху електромобілів з електроприводом постійного струму*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2019.

[88] Schofield, V., Hagglund, T., & Rantzer, A. (2006). 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: 10.1109/CACSD-CCA-ISIC.2006.4776639.

[89] Reński, A. (2015). 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>

[90] Long, V.H., & Phong, D.V. (2007). 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>

[91] Lu, D., Ma, Y., Yin, H., Deng, Z., Qi, J. (2020). 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>

[92] Jin, H., & Li, S. (2015). 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>

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

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

[95] Павловський, М.А., (2002) Теоретична механіка. Київ: Техніка, 512 с.

[96] Ненайденко, А.С., & Поддубный, В.И., (2018) «Математическое моделирование движения колесной машины в горизонтальной плоскости» Вестник КрасГАУ, (3), с.72-77.

[97] Пискунов, Н.С., (1976). Дифференциальное и интегральное исчисление, (1), Москва: Наука, 456 с.

[98] Мокін, О. Б., & Фолюшняк, О. Д. (2010). МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ В ПРОСТОРІ ЛІНГВІСТИЧНИХ ЗМІННИХ УМОВ НЕПЕРЕВЕРТАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА ПОВОРОТІ ДОРОГИ. Вісник Вінницького політехнічного інституту, (1), 85–88. Отримано з <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1161>

[99] 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>

[100] 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>

[101] 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>

[102] 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/sl原因963a/sl原因963a.pdf?ts=1653198250507&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/sl原因963a/sl原因963a.pdf?ts=1653198250507&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)

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

[104] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і В. В. Горенюк, «МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНИМ ВІДРІЗКОМ ДОРОГИ», Вісник ВПІ, вип. 5, с. 26–33, Лис. 2020

[105] В. В. Горенюк, «МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА СХИЛАХ І ПІДЙОМАХ ДОРОГИ», Вісник ВПІ, вип. 5, с. 43–49, Жовт. 2021

[106] 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>

## ДОДАТКИ

## Додаток А

## АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ





ПІДТВЕРДЖУЮ  
 Директор ТОВ «АТП Слободянюк»

Слободянюк О.А.

«29» березня 2022 р.

### АКТ

підтвердження намірів впровадження у ТОВ «АТП Слободянюк» окремих результатів, одержаних Горенюком Вадимом Вікторовичем у дисертації на здобуття наукового ступеню доктора філософії за темою "Синтез моделей оптимального руху електромобілів з тяговими електродвигунами змінного струму"

Ми, що нижче підписались, заступник директора ТОВ «АТП Слободянюк» Магас А. Т. та головний інженер Рачук В. Ф., підтверджуємо, що після ознайомлення з дисертацією Горенюка Вадима Вікторовича на тему "Синтез моделей оптимального руху електромобілів з тяговими електродвигунами змінного струму" на здобуття наукового ступеню доктора філософії за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка, керівництвом ТОВ «АТП Слободянюк» було прийняте рішення, що в процесі розширення автобусного парку підприємства шляхом закупівлі кількох автобусів з електричною тягою на основі електродвигунів змінного струму буде здійснюватися впровадження рекомендацій, запропонованих Горенюком В.В. у розділах 2 та 3 його дисертації. А рекомендації Горенюка В.В. стосовно режимів проходження поворотів дороги, які є справедливими не лише для електромобілів, а і для автомобілів з двигунами внутрішнього згорання, почнуть впроваджуватись з дня ознайомлення з ними.

Заступник директора  
 ТОВ «АТП Слободянюк»

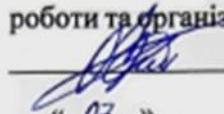
Магас А. Т.

Головний інженер  
 ТОВ «АТП Слободянюк»

Рачук В. Ф.

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної  
роботи та організації освітнього процесу

 Олександр ПЕТРОВ

« 07 » 06 2022 р.

## А К Т

впровадження в навчальний процес результатів,  
отриманих Горенюком Вадимом Вікторовичем під час навчання в аспірантурі  
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка в  
дисертації на здобуття наукового ступеню доктора філософії на тему:  
«Синтез моделей оптимального руху електромобілів з тяговими  
електродвигунами змінного струму»

Комісія у складі декана факультету електроенергетики та електромеханіки (ФЕЕЕМ) к.т.н., доц. Розводюка М.П., заступника декана ФЕЕЕМ з навчально-методичної роботи к.т.н., доц. Ведміцького Ю.Г., в.о. завідувача кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів к.т.н., доц. Мошноріза М.М. підтверджує, що при викладанні теоретичних основ навчальних дисциплін «Математичні методи ідентифікації та оптимізації електромеханічних процесів» та «Моделювання електромеханічних систем», а також в дипломному проектуванні студентами, які навчаються за освітніми програмами «Електромеханіка» та «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, використовується частина результатів, отриманих аспірантом Горенюком В.В. в процесі написання ним дисертації на здобуття наукового ступеню доктора філософії, а саме:

- 1) математична модель оптимального руху горизонтальним відрізком дороги електромобіля з тяговими асинхронними електродвигунами змінного струму;
- 2) математичні моделі оптимального руху на спуск та на підйом електромобіля з тяговими асинхронними електродвигунами змінного струму;
- 3) математичні моделі оптимального руху електромобіля з тяговими асинхронними електродвигунами змінного струму на поворотах дороги;

- 4) алгоритми та реалізовані на їх основі комп'ютерні програми для моделювання процесів руху електромобіля на горизонтальному відрізку дороги, а також дорогою на спуск та на підйом.

Декан факультету електроенергетики  
та електромеханіки, к.т.н, доцент

Михайло РОЗВОДУК

Заступник декана факультету  
електроенергетики та  
електромеханіки з навчально-  
методичної роботи к.т.н, доцент

Юрій ВЕДМІЦЬКИЙ

В.о. завідувача кафедри  
комп'ютеризованих електромеханічних  
систем і комплексів, к.т.н, доцент

Микола МОШНОРИЗ

## Додаток Б

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові статті у фахових виданнях:*

[1] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і В. В. Горенюк, «ДО ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ», Вісник ВПІ, вип. 3, с. 32–39, Чер. 2019. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-144-3-32-39>

[2] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і В. В. Горенюк, «МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ», Вісник ВПІ, вип. 1, с. 32–38, Лют. 2020. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-148-1-32-38>

[3] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і В. В. Горенюк, «МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНИМ ВІДРІЗКОМ ДОРОГИ», Вісник ВПІ, вип. 5, с. 26–33, Лис. 2020.

[4] 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>

[5] В. В. Горенюк, «МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА СХИЛАХ І ПІДЙОМАХ ДОРОГИ», Вісник ВПІ, вип. 5, с. 43–49, Жовт. 2021.

[6] 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>

*Апробація результатів дослідження:*

[7] В.В. Горенюк, «ОГЛЯД НАУКОВИХ ПРАЦЬ ПРИСВЯЧЕНИХ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯМ З ТЯГОВИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЗМІННОГО СТРУМУ». XLVIII Науково-технічна конференція факультету

електроенергетики та електромеханіки (2019). Отримано з <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/26864>

[8] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В. В. Горенюк, «ОПТИМІЗАЦІЯ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ». МАТЕРІАЛИ XII МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ “СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ”, 21 – 23 жовтня 2019.

[9] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В.В. Горенюк, «СИМУЛЯЦІЯ МОДЕЛІ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ В ППП МАТЛАВ». Контроль і управління в складних системах (КУСС-2020). Отримано з <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30628>

[10] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В. В. Горенюк, «ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ТЯГОВИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ», НТКП ВНТУ. Факультет електроенергетики та електромеханіки (2020). Отримано з <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/28763>

[11] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В. В. Горенюк, «КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З МЕТОЮ ОЦІНЮВАННЯ АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ», КОНФЕРЕНЦІЇ ВНТУ електронні наукові видання, І Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2021). Отримано з <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2021/paper/view/11764>

[12] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В. В. Горенюк, «МЕТОДОЛОГІЯ ІНТЕГРАЦІЇ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДВОХОСЬОВОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ В ЗАДАЧІ ОЦІНКИ ЙОГО СТІЙКОСТІ НА ПОВОРОТАХ», V міжнародно науково-технічна конференція «ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ» (ОКЕУ 2021). Отримано з

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2022/paper/view/14902/12672>

[13] Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, В. В. Горенюк, «КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА СХИЛАХ І ПІДЙОМАХ ДОРОГИ З МЕТОЮ ОЦІНЮВАННЯ АДЕКВАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ», LI Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2022). Отримано з <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feem/all-feem-2022/paper/view/14588/12329>

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