

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ПРИ
ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ
ПРИ РІЗНИХ ЦИКЛАХ ВОДІННЯ
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-Е23мг-
2

спеціальності : 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____ / Дмитро ХОЛКІН
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Анатолій ТАРАСЕНКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та

прізвище)

Харків – 2024 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія

Кафедра електротехніки та електроенергетики

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу дипломну роботу

другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу вищої освіти Дмитро ХОЛКІН

1. Тема «ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ПРИ РІЗНИХ ЦИКЛАХ ВОДІННЯ»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Рівень напруги, умови експлуатації, характеристика струмоведучих частин, типи кабельних ліній, метод апарат дослідження, завдання, параметри обладнання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

Вступ. Перелік умовних позначень. Методологія стратегування стану енергетичної безпеки. Адаптивний підхід до синтезу стратегічних орієнтирів. Стратегічне планування енергетичної безпеки України на середньо- та (або) довгострокову перспективу. Порівняльний міжнародний аналіз сценаріїв розвитку на прикладі деяких індикаторів, що мають комплексний інтегральний характер. Внутрішні характеристики прямого імітаційного моделювання електромобіля для аналізу енергії.. Висновки. Список посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал): Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «_12_» _____ 10 _____ 2024__р.

Керівник

(підпис)

Анатолій ТАРАСЕНКО
(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис) (ім'я, прізвище)

Дмитро ХОЛКІН

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи**

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Дмитро ХОЛКІН
(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ
до магістерської роботи на тему

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ПРИ
ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТРАНСПОРТ-НОГО
ЗАСОБУ ПРИ РІЗНИХ ЦИКЛАХ ВОДІННЯ»**

Дмитро ХОЛКІН

Магістерська робота виконана на 69 стор., містить 7 таблиці, 30 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано 74 літературних посилань.

Об’єкт дослідження – параметри роботи електромобіля.

Предмет дослідження – електромобіль.

Мета роботи – ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ПРИ РІЗНИХ ЦИКЛАХ ВОДІННЯ.

Ступінь впровадження: проектні інститути.

Економічна ефективність значимість роботи: дана робота має високу значимість теоретичного й практичного рівня.

В роботі запропонован прямий метод моделювання електромобілів, який є одним із найбільш придатних для оцінки споживання енергії в різних циклах водіння. Однак детальний опис методології, що використовується для розробки моделей електромобілів, необхідний і його мало в поточній літературі. Щоб заповнити цю прогалину, це дослідження зосереджено на висвітленні внутрішніх характеристик через теоретичне дослідження з математичною моделлю, доповнене демонстративним моделюванням у Matlab/Simulink. Результати показують, що прямий метод можна оцінити більш точно на основі споживання енергії електромобіля. Крім того, це дослідження має на меті бути чітким описом для розробки більш складних моделей електромобілів, щоб включати реальні цикли водіння, маючи можливість визначати розмір трансмісії самого транспортного засобу або розробляти екологічні маршрути.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА, МОДЕЛЮВАННЯ, ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ, ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, ПАРАМЕТРИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ, РЕЖИМИ РОБОТИ, ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ, ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА, ВИПРЯМЛЯЧІ, ЦИКЛИ ВОДІННЯ

ABSTRACT
to the master's thesis on the topic

**"STUDY OF THE PARAMETERS OF THE OPERATION OF AN
ELECTRIC VEHICLE WHILE ENSURING THE ENERGY SAFETY OF A
VEHICLE IN VARIOUS DRIVING CYCLES"**

Dmytro KHOLKIN

The master's thesis is completed on 69 pages, contains 7 tables, 30 figures characterizing the results of the study, 74 literary references are used.

The object of the study is the parameters of the operation of an electric vehicle.
The subject of the study is an electric vehicle.

The purpose of the work is STUDY OF THE PARAMETERS OF THE OPERATION OF AN ELECTRIC VEHICLE WHILE ENSURING THE ENERGY SAFETY OF A VEHICLE IN VARIOUS DRIVING CYCLES.

The level of implementation: design institutes.

Economic efficiency significance of the work: This work has high significance at the theoretical and practical levels.

The paper proposes a direct method for modeling electric vehicles, which is one of the most suitable for estimating energy consumption in different driving cycles. However, a detailed description of the methodology used to develop electric vehicle models is needed and is scarce in the current literature. To fill this gap, this study focuses on highlighting the intrinsic characteristics through a theoretical study with a mathematical model, complemented by demonstrative simulation in Matlab/Simulink. The results show that the direct method can be evaluated more accurately based on the energy consumption of an electric vehicle. In addition, this study aims to be a clear description for the development of more complex electric vehicle models to include real driving cycles, having the ability to determine the size of the transmission of the vehicle itself or develop eco-friendly routes.

KEYWORDS: ENERGY SECURITY, MODELING, ELECTRIC TRANSPORT, ELECTRIC VEHICLE, ELECTRIC VEHICLE OPERATING PARAMETERS, OPERATING MODES, OPERATING EFFICIENCY, CONVERTING TECHNOLOGY, RECTIFIER, DRIVING CYCLES

ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. Методологія стратегування стану енергетичної безпеки	11
1.1. Адаптивний підхід до синтезу стратегічних орієнтирів	11
1.2. Стратегічне планування енергетичної безпеки України на середньо- та (або) довгострокову перспективу	13
1.3. Порівняльний міжнародний аналіз сценаріїв розвитку на прикладі деяких індикаторів, що мають комплексний інтегральний характер	19
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	27
РОЗДІЛ 2. ВНУТРИШНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕНЕРГІЇ	29
2.1. Вступ	29
2.2. Матеріали та методи	31
2.2.1. Фон	32
2.2.2. Математичне моделювання форвардного методу	34
2.2.2.1. Модель водіння	34
2.2.2.2. Модель водія	36
2.2.2.3. Модель гальма	39
2.2.2.4. Модель електродвигуна	40
2.2.2.5. Модель трансмісії	41
2.2.2.6. Модель батареї	42
2.2.2.7. Глобальна модель EV	44
2.3. Симуляція роботи автомобіля за допомогою прямого методу	48
2.4. Аналіз результатів моделювання	50
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	58

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

60

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

61

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ECE 15 – 15-режимний цикл випробувань Європейської економічної комісії

EV – енергії електромобіля

SOC – оцінки стану заряду

UDDS – міський динамометр

NEDC – новий європейський цикл водіння

WLTP – всесвітній гармонізований легкий робочий цикл

ІННМ – штучні нейронні мережі

ВСТУП

Відомі підходи щодо стратегічного планування застосовують переважно методи прогнозування інтегральних індексів – «минуле визначає майбутнє». Цілком очевидно, що класичні методи прогнозування тут недоречні. По-перше, прогнозування дає продовження існуючих тенденцій (соціально-економічного розвитку, моделей управління, технологій) на майбутнє. По-друге, прогнозування завжди містить помилку. По-третє, необхідно знати, як повинні змінюватися складові частини системи та вибрані з метою її опису індикатори для досягнення бажаного стану. Отже, потрібні зовсім інші підходи. Саме такий підхід пропонується в цій доповіді. Він базується на принципі «майбутнє визначається траєкторією в майбутнє» [11].

Стратегічне бачення сталого розвитку передбачає спочатку визначення стратегічних цілей, які зумовлюють бажані сценарії сталого розвитку та оцінки відхилення інтегрального індексу рівня енергетичної безпеки (та/або його складників) від траєкторії сталого розвитку, а потім – застосовування теоретичних підходів до обґрунтування стратегічних орієнтирів досягнення сценаріїв сталого розвитку.

Прямий метод моделювання електромобілів є одним із найбільш придатних для оцінки споживання енергії в різних циклах водіння. Однак детальний опис методології, що використовується для розробки моделей електромобілів, необхідний і його мало в поточній літературі. Щоб заповнити цю прогалину, це дослідження зосереджено на висвітленні внутрішніх характеристик через теоретичне дослідження з математичною моделлю, доповнене демонстративним моделюванням у Matlab/Simulink. Результати показують, що прямий метод можна оцінити більш точно на основі споживання енергії електромобіля. Крім того, це дослідження має на меті бути чітким описом для розробки більш складних моделей електромобілів, щоб включати реальні цикли водіння, маючи можливість визначати розмір трансмісії самого транспортного засобу або розробляти екологічні маршрути.

У зв'язку з цим метою цієї магістерської роботи є ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ПРИ РІЗНИХ ЦИКЛАХ ВОДІННЯ.

Об'єкт дослідження – параметри роботи електромобіля.

Предмет дослідження – електромобіль.

РОЗДІЛ 1. Методологія стратегування стану енергетичної безпеки

1.1. Адаптивний підхід до синтезу стратегічних орієнтирів

Після одержання динаміки інтегрального індексу стану системи необхідно вибрати сценарії досягнення стратегічних цілей (реалістичний, оптимістичний, сценарій збалансованого сталого розвитку) залежно від співвідношення значення інтегрального індексу з інтегральними пороговими значеннями, які характеризують оптимальний, передкризовий, кризовий або критичний стан системи. Відповідно, дослідник (управлінець) зможе сформулювати політику в певній сфері та оцінити необхідні затрати й механізми усунення відхилення динаміки вибраних індикаторів від цільової траєкторії.

У площині пропонованого дослідження обрано три сценарії розвитку політики у сфері енергетичної безпеки, наприклад до 2030 р. (рисунок 1.1.):

1. реалістичний – досягнення середнього рівня між нижнім пороговим та нижнім оптимальним значеннями;
2. оптимістичний – досягнення рівня нижнього оптимального значення (входження в оптимальну зону країн ЄС);
3. сценарій збалансованого сталого розвитку – досягнення рівня середнього оптимального значення (гомеостатичного плато) – критерію сталого розвитку.

Знання стратегічних цілей зумовлює необхідність вирішення завдання декомпозиції інтегрального індексу, тобто синтезу необхідних значень складників та їх індикаторів для знаходження інтегрального індексу в заданих межах. Розв’язання такої задачі (оберненої) для кожної складової частини сталого розвитку, коли відомо (або задано) його необхідне значення, уможливорює, ураховуючи чутливості складників або індикаторів, вагових коефіцієнтів впливу та адаптивних методів регулювання [11], визначити необхідні значення складників та їх індикаторів упродовж періоду прогнозування в кожному році (рисунок 1.2.).

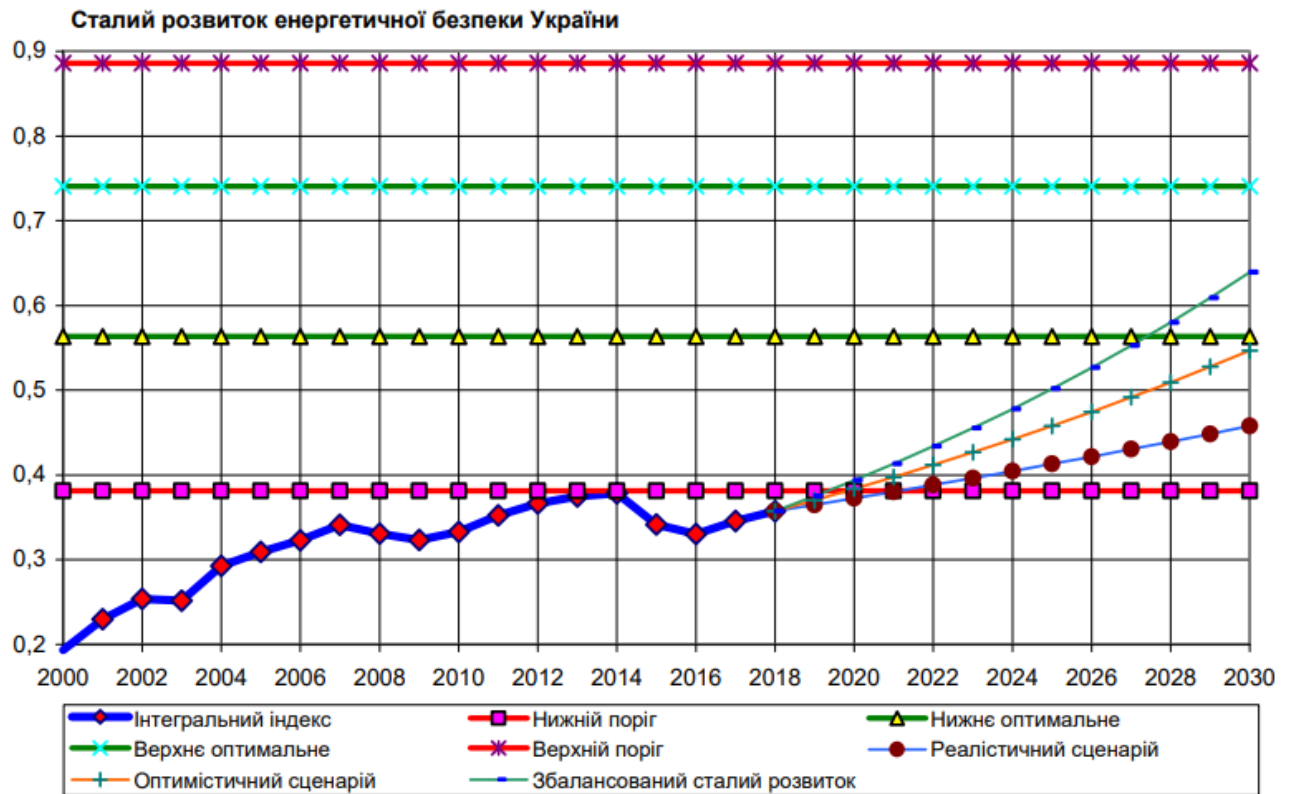


Рисунок 1.1. – Динаміка інтегрального індексу рівня енергетичної безпеки

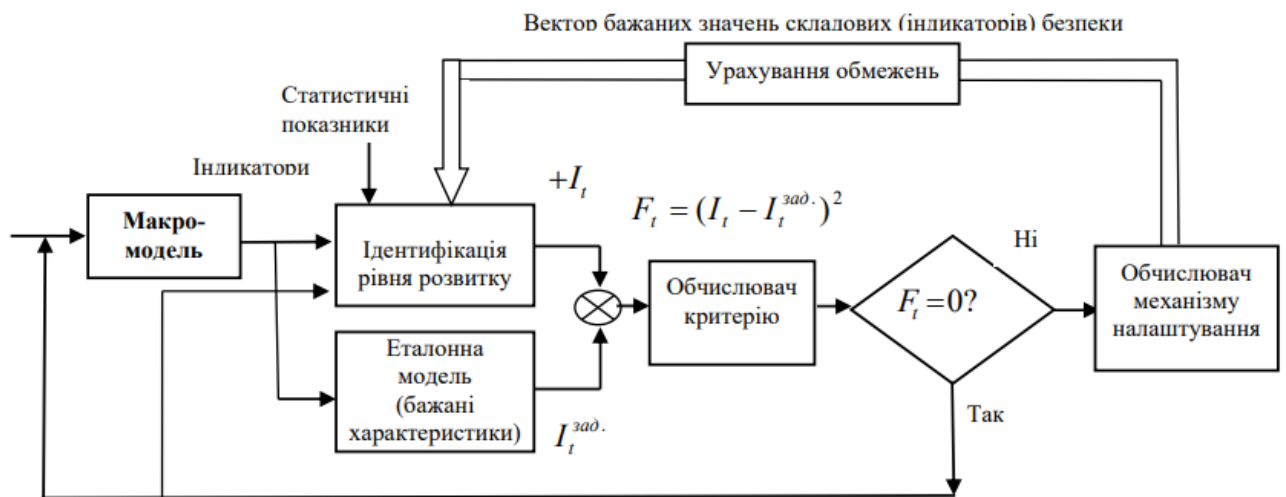


Рисунок 1.2. – Узагальнена схема адаптивної системи регулювання з еталонною моделлю [11]

Еталонна модель є аналоговою моделлю бажаної динамічної або статичної характеристики всієї системи регулювання. Адаптивність системи досягається включенням, крім еталонної моделі, також механізму налаштування її параметрів з урахуванням обмежень значень індикаторів за максимальними та мінімальними значеннями. Подальші завдання управління

полягають у порівнянні вихідної величини вибраного індикатора I_t з вихідною величиною еталонної моделі зад $I_t^{\text{зад}}$ та прийнятті рішень щодо усунення чинників, які зумовлюють відхилення від цільової траєкторії – завдання зменшити сигнал похибки F_t до нуля («0»).

Отже, задача регулювання складників інтегрального індексу та їх індикаторів – визначити такі їхні значення у сукупності, щоб забезпечити знаходження значень інтегрального показника в межах заданих (порогових/оптимальних) значень на кожному етапі трансформації (розвитку системи). Звичайно, у механізмі налаштування параметрів моделі використовуються методи, засновані, зокрема, на градієнті функції похибки. Основним принципом роботи механізму налаштування є мінімізація квадратичної функції похибки та її похідних, при цьому передбачається, що всі функції – безперервні та, як мінімум, двічі диференційовані:

$$F_t = (I_t - I_t^{\text{зад}})^2 \quad (1.1)$$

Слід відзначити той факт, що F – звичайна функція параметрів x_i (під параметрами x розуміють як складові частини сталого розвитку, так і їх індикатори). Наведене формулювання задачі оптимізації дає змогу розглядати її як задачу зі сфери звичайного математичного аналізу (пов'язану з максимізацією/мінімізацією функцій), а не зі сфери варіаційного числення.

1.2. Стратегічне планування енергетичної безпеки України на середньо- та (або) довгострокову перспективу

Стратегічне планування досягнення цільового рівня енергетичної безпеки здійснюється з огляду на траєкторію переведення системи з поточного рівня у цільовий (рисунок 1.3). Стратегічні значення інтегрального індексу енергетичної безпеки, стратегічних значень складників та окремих індикаторів будуть синтезовані за допомогою адаптивних методів регулювання (рисунок 1.4).

Для вирішення завдань стратегічного планування використовувалась універсальна стандартна процедура стратегування «STRATEGY» на мові

програмування C++, розроблена автором запропонованого методу [11], яка реалізує адаптивний метод регулювання з коротким циклом зворотного зв'язку (без макромоделі).

Звернення до стандартної процедури «STRATEGY» здійснюється так:

$$F_{\min} = \text{strategy}(P, f, n_1, n_2, x, f_{\text{zad}}, p_{\max}, p_{\min}, \text{eps}, \text{func}); \quad (1.2)$$

де:

$F_{\min}$ – результуюча похибка рішення;

P – вектор нормованих індикаторів інтегрального індексу, з якого починається стратегування (вихідний вектор шуканих значень індикаторів, що відповідають заданому значенню інтегрального індексу);

f – поточне значення інтегрального індексу;

n_1 – початковий номер індикатора;

n_2 – кінцевий номер індикатора;

f_{zad} – задане значення інтегрального індексу;

$p_{\max}$ – вектор нормованих максимальних значень настрювальних індикаторів;

$p_{\min}$ – вектор нормованих мінімальних значень настрювальних індикаторів;

eps – задана похибка рішення;

func – покажчик на функцію, що викликається для обчислення критерію оптимізації.

Початковий вектор нормованих індикаторів, вихідний вектор нормованих шуканих значень індикаторів, а також вихідний вектор шуканих значень індикаторів у природних (фізичних, натуральних) одиницях виміру через застосування зворотної процедури нормування вводиться у модель аналізу для подальших розрахунків макропоказників у кожному році майбутньої траєкторії.

Проведені розрахунки дають таку динаміку стратегічних значень складників та їхніх індикаторів за визначеними сценаріями розвитку: 1) реалістичний; 2) оптимістичний; 3) збалансованого сталого розвитку (рисунок 1.3., таблиця 1.1.).

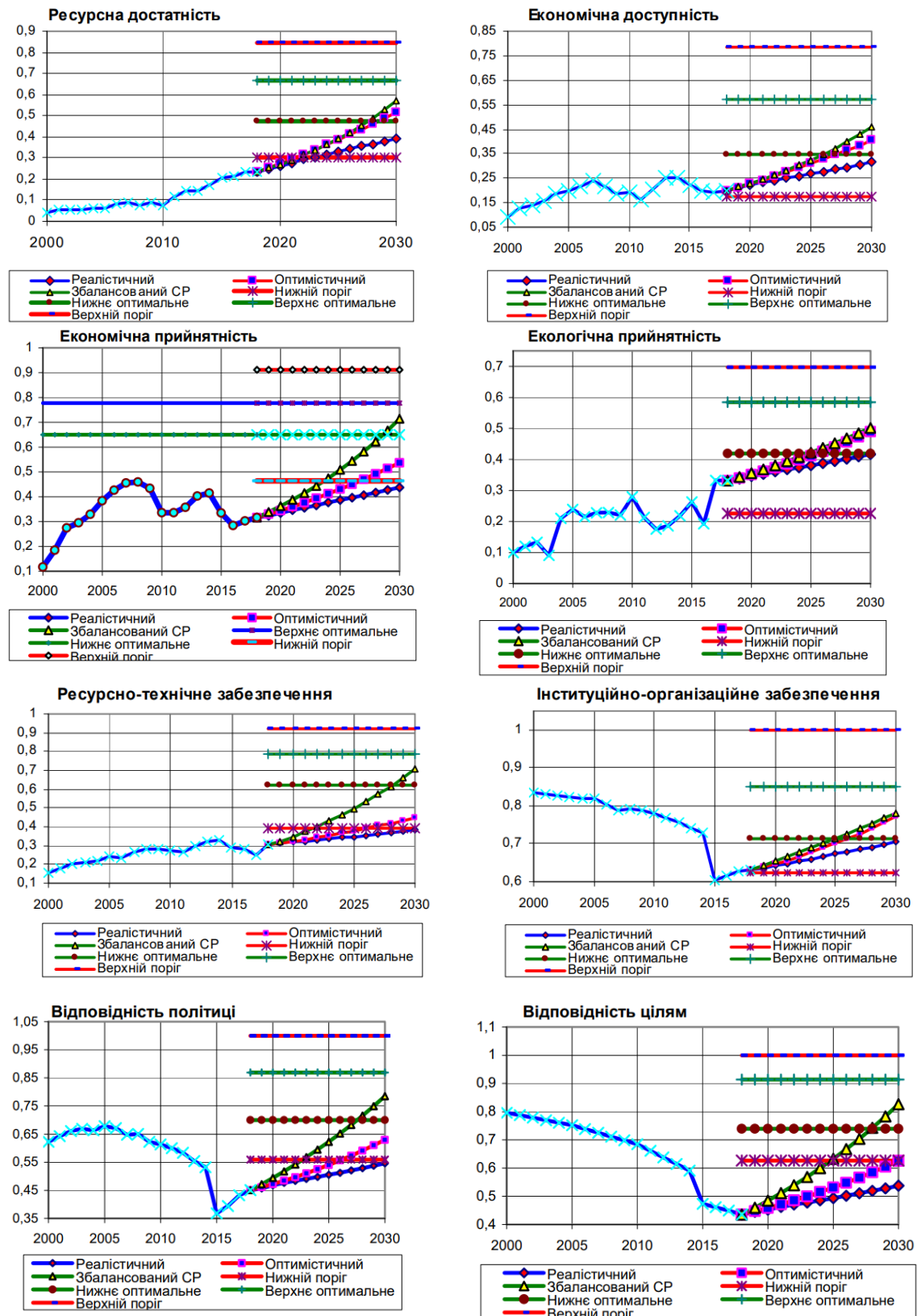


Рисунок 1.3. – Майбутня динаміка складників енергетичної безпеки України до 2030 р.

Таблиця 1.1. – Оцінка стратегічних значень складників та індикаторів енергетичної безпеки на кінець 2030 р.

Індикатори	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
I. Ресурсна достатність	0,3941	0,5159	0,5691
1) нафта та нафтопродукти, %, (D);	13,607	11,378	8,3
2) природний газ, %, (D);	26,118	22,082	23,43
3) вугілля, %, (D);	28,023	23,921	22,35
4) ядерна та термоядерна енергія, %, (S);	24,49	26,476	17,45
5) гідроенергетика, %, (S);	0,9698	0,9858	0,95
6) сонячна та вітрова енергетика, %, (S);	3,5258	7,313	9,9
7) біоенергетика, %, (S)	3,6136	4,1435	4,79
II. Економічна доступність	0,3141	0,4034	0,4579
8) ВВП на 1 особу, тис. дол. США/ос. (за поточним обмінним курсом), (S);	16,733	27,279	35
9) енергоспоживання на 1 особу, т.н.е./рік, (S);	2,537	3,246	4,7
10) споживання електроенергії на 1 особу, МВт*год/рік, (S);	4,1	5,386	7,25
11) рівень витрат на забезпечення житлово-комунальних послуг, % від сукупних ресурсів, (D);	11,964	10,621	8,5
12) частка енергетики у ВВП, %, (D);	9	8,387	8,6
13) вартість витрат енергоресурсів для країни, % ВВП, (D)	26,888	24,08	25
III. Економічна прийнятність	0,4376	0,5372	0,7137
14) енергоемність ВВП, т.н.е./1000 дол. США, (D);	0,235	0,195	0,11
15) рівень інвестування підприємств ПЕК, % випуску ПЕК, (S);	11,989	13,021	13,7
16) рівень оновлення основних засобів ПЕК, %, (S);	4,639	6,558	8
17) рівень тінізації ПЕК, % ВДВ ПЕК, (D);	34,66	28,161	12,5
18) рівень оплати праці ПЕК, % випуску ПЕК, (S);	0,1817	0,2137	0,29
19) рівень тінювого завантаження капіталу ПЕК (добувна галузь та виробництво електроенергії, газу і води), % офіційного, (D);	23,97	19,442	8,5
20) рівень тінювого споживання ПЕР, % ВВП України, (D);	10,142	9,483	4
21) концентрація ринків за індексом Герфіндала – Гіршмана (за постачальниками), (D);	2353,5	2012	1397,5
22) рівень залученості до ринків ЄС (експертна оцінка), %, (S)	43,473	52,533	55
IV. Екологічна прийнятність	0,4167	0,4897	0,5017
23) рівень викидів CO ₂ на ТРЕС, т CO ₂ /т.н.е., (D);	1,645	1,476	1,59
24) рівень викидів CO ₂ на одиницю ВВП, кг/дол. США, (D);	1,259	1,117	0,42
25) кінцева вуглеємність енергії, г CO ₂ /МДж, (D)	72,256	63,597	70
V. Ресурсно-технічне забезпечення	0,3817	0,4494	0,705
26) задоволення потреб з власних джерел за видами ПЕР, % заг. спож., (S);	65,354	67,2	87
27) вартість імпорту енергоресурсів для країни, % ВВП, (D);	9,649	8,87	7,5
28) частка домінуючої країни (постачальника) в загальному обсязі імпорту за видами ПЕР, % імпорту ПЕР, (D);	38,697	35,443	30
29) рівень технологічної залежності імпорту/експорту з одного джерела (за видами енергетичних технологій), % (експертна оцінка), (D);	58,383	52,918	35
30) рівень запасів/резервів від обсягів річного/місячного споживання за видами ПЕР, %, (S);	31,926	39,036	90
31) індекс тривалості довгих перерв в електропостачанні на одного споживача (SAIDI), хв/рік, (D)	610,0	533,6	200
VI. Інституційно-організаційна забезпеченість	0,7046	0,7724	0,7809
32) виробничі процеси та інфраструктура, %, (експертна оцінка), (S);	52,872	61,923	68
33) управлінські процеси та інфраструктура, %, (експертна оцінка), (S);	73,54	79,984	78
34) допоміжні та сервісні процеси і інфраструктура, % (експертна оцінка), (S);	89,22	94,275	87,5
35) процеси та інфраструктура з підтримки об'єктів на всіх етапах життєвого циклу, % (експертна оцінка), (S);	70,661	77,271	75
36) інформаційно-комунікаційні процеси та інфраструктура, %, (експертна оцінка), (S)	72,128	76,812	87,5

Індикатори	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
VII. Відповідність політики	0,5461	0,6299	0,7849
37) наявність законодавства, % (експертна оцінка), (S);	59,178	65,487	80
38) прогнозованість та послідовність змін політики та регуляторних змін, % (експертна оцінка), (S);	62,355	66,737	70
39) якість державної політики, % (експертна оцінка), (S)	50,47	58,121	85
VIII. Відповідність цілям	0,5373	0,6256	0,8263
40) якість послуг (первинних ресурсів, продуктів та енергії), % (експертна оцінка), (S);	73,944	79,615	80
41) якість кадрів (управлінських, технічних та допоміжних), % (експертна оцінка), (S);	51,953	60,125	80
42) відповідність політичних лідерів завданням, що постають перед системою, % (експертна оцінка), (S)	40,615	51,372	90

Приймаючи деякі припущення щодо майбутніх значень чисельності населення, обмінного курсу, коефіцієнта технологічності виробництва (відношення ВВП до випуску), дефляторів ВВП по країні та паливно-енергетичному комплексі та інших (таблицю 1.2.), можна отримати значення ВВП та випуску, відносно яких обчислюються інші макропоказники енергетичної безпеки (таблиця 1.3.).

Таблиця 1.2. – Припущення щодо деяких макропоказників

Показн. Рік	Чисельність населення, млн осіб	Обмінний курс, грн за дол. США	Коефіцієнт технологічності виробництва			Дефлятор ВВП	Дефлятор ВДВ ПЕК
			Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3		
2019	42,028	25,8436	0,4118	0,4147	0,4188	1,081	1,121
2020	41,854	26,3088	0,4129	0,4179	0,4262	1,075	1,115
2021	41,68	26,7823	0,4141	0,4212	0,4335	1,1	1,14
2022	41,506	27,2644	0,4152	0,4244	0,4409	1,1	1,14
2023	41,333	27,7552	0,4164	0,4276	0,4483	1,1	1,14
2024	41,161	28,2548	0,4175	0,4308	0,4557	1,1	1,14
2025	40,99	28,7634	0,4186	0,434	0,4631	1,1	1,14
2026	40,819	29,2811	0,4197	0,4372	0,4705	1,1	1,14
2027	40,649	29,8082	0,4209	0,4405	0,4778	1,1	1,14
2028	40,48	30,3447	0,422	0,4437	0,4852	1,1	1,14
2029	40,311	30,8909	0,4232	0,4469	0,4926	1,1	1,14
2030	40,144	31,447	0,425	0,45	0,5	1,1	1,14

Таблиця 1.3. – Оцінка стратегічних орієнтирів ключових індикаторів та макропоказників енергетичної безпеки України на кінець 2030 р.

Показник	2018 р.	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
Номінальний ВВП, <i>млрд грн</i>	3558,7	21324	34784	44025
Темп приросту реаль. ВВП, % <i>щорічно</i>	3,3	5,9	10,3	12,5
ВВП на 1 ос., <i>тис. дол. США</i>	3,113	16,96	27,67	35
ВДВ ПЕК, <i>млрд грн</i>	336,2	1921,4	2925,7	3787,2
Темп приросту реаль. ВДВ ПЕК, % <i>щорічно</i>	1	1,76	5,39	7,68
Рівень тінізації, % <i>ВДВ ПЕК</i>	42,3	34,7	28,2	12,5
Тіньова ВДВ ПЕК, <i>млрд грн</i>	142,2	666,7	825,0	473,4
Капітальні інвестиції ПЕК, <i>млрд грн</i>	90,85	534,3	832,2	1036,8
Обсяг тіньового споживання ПЕР, <i>млрд грн</i>	380,9	2133,5	3252,3	1760
Частка оплати праці у випуску ПЕК, %	0,15	0,1817	0,2137	0,29
Номінальна заробітна плата ПЕК, <i>грн</i>	11424	110619	133088	187105
Обсяг викидів CO ₂ , <i>Mt</i>	183,2	842,6	1217,9	580,6
Споживання електроенергії на 1 особу, <i>MBt*год/рік</i>	3,1	4,1	5,38	7,25
Енергоємність ВВП, <i>т.н.е./1000 дол. США</i>	0,27	0,235	0,195	0,11
Концентрація ринків за індексом Герфіндаля – Гіршмана (за постачальниками)	2641,9	2353,5	2012	1397,5
Рівень викидів CO ₂ на TPES,	1,9	1,675	1,476	1,59
<i>т CO₂/т.н.е</i>				
Індекс тривалості довгих перерв в електропостачанні на одного споживача (SAIDI), <i>хв/рік</i>	696	610	533,6	200

Як засвідчують розрахунки, всі запропоновані сценарії забезпечують наближення різного ступеня до рівня сталого розвитку та відповідне щорічне економічне зростання: реалістичний сценарій (1) – 5,34 % приросту реального ВВП та 1,23 % – приросту реальної ВДВ ПЕК; оптимістичний сценарій (2) – 9,72 та 4,83 % відповідно; сценарій збалансованого сталого розвитку (3) – 11,93 та 7,15 % відповідно. Перші два сценарії зменшують, але залишають дисбаланси розвитку складників та індикаторів, на відміну від сценарію збалансованого сталого розвитку.

Розраховані стратегічні орієнтири інтегрального індексу енергетичної безпеки, складників та їхніх індикаторів можна вважати науково-обґрунтованим стратегічним планом забезпечення енергетичної безпеки та сталого розвитку країни. Моніторинг індикаторів фактичного стану енергетичної безпеки зі стратегічними орієнтирами визначених сценаріїв дасть змогу об'єктивно визначати поточний стан і траєкторію рівня енергетичної безпеки країни та, відповідно, ефективність державної політики.

1.3. Порівняльний міжнародний аналіз сценаріїв розвитку на прикладі деяких індикаторів, що мають комплексний інтегральний характер

Заслужують на увагу міжнародні порівняння розроблених сценаріїв за економічними та енергетичними показниками. Виконуючи прогнози розрахунки показника ВВП на одну особу (тис. дол. США) за поточним обмінним курсом для низки країн світу (табл. 3.6) з урахуванням середніх темпів зростання⁶⁴, динаміки дефлятора ВВП за останні 10 років та девальвації обмінного курсу на 1,8 % за рік, можна порівняти стратегічні цілі для України на середньострокову перспективу (до 2030 р.) для різних сценаріїв розвитку (рис. 3.14).

Таблиця 1.4. – Усереднені темпи приросту реального ВВП деяких провідних країн світу

Країна	США	Німеччина	Франція	РФ	Китай	Польща
Темп приросту ВВП, %	2	1,9	1,2	1,8	7,6	3,7
Дефлятор ВВП	1,0167	1,018	1,01	1,0898	1,0265	1,0245

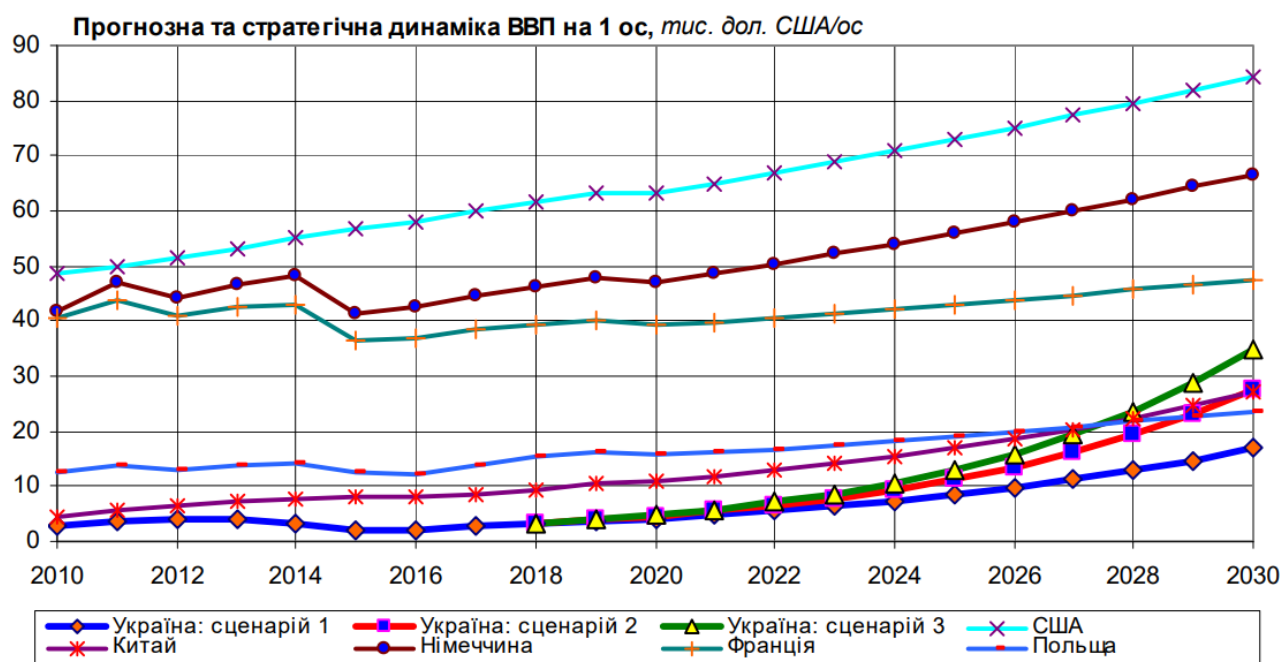


Рисунок 1.4. – Показники динаміки ВВП на одну особу деяких країн ЄС та світу до 2030 рр.

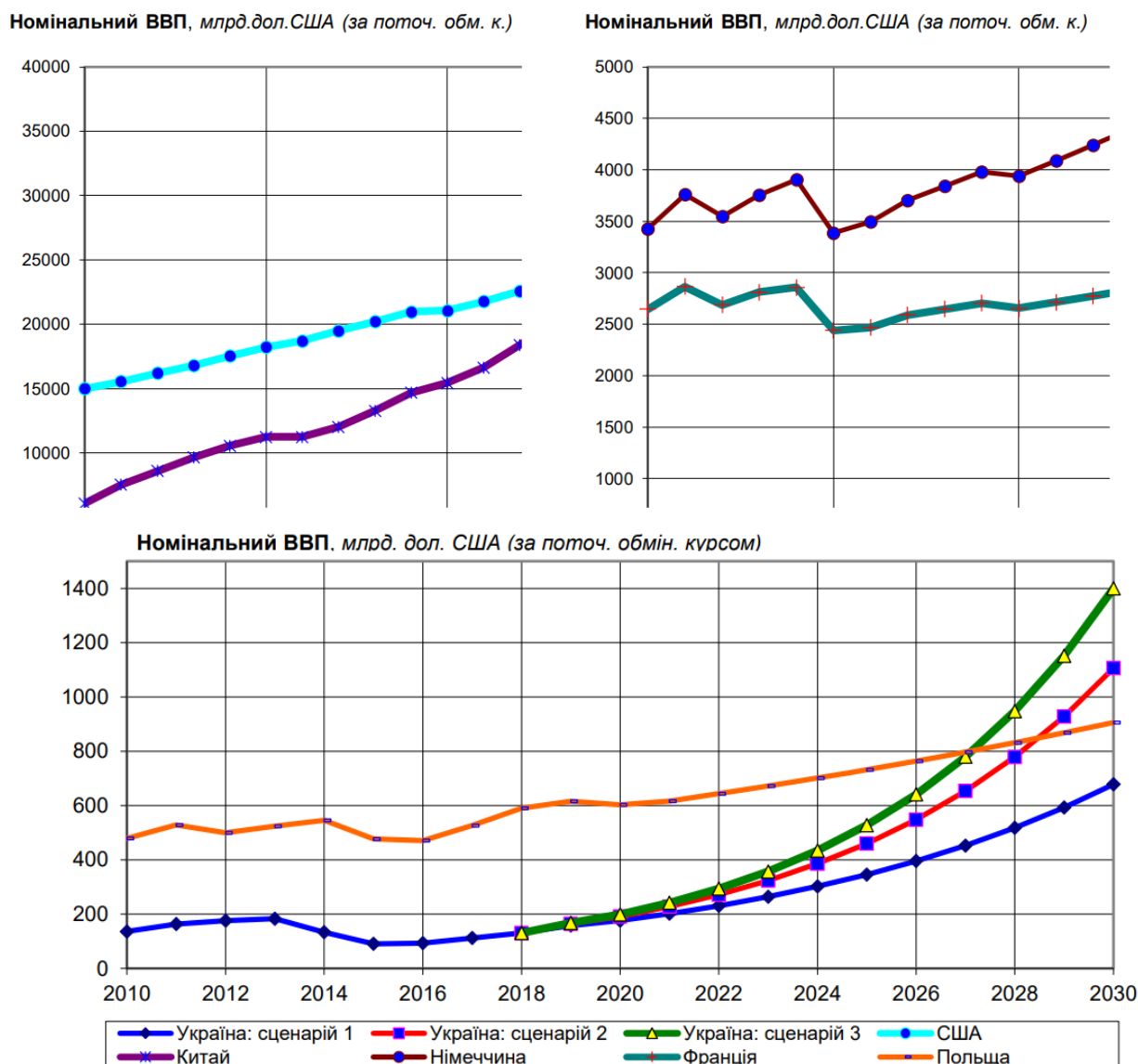


Рисунок 1.5. – Показники динаміки номінального ВВП деяких країн світу до 2030 р.

Для розуміння стану безпеки в Україні за енергетичними показниками порівняно з провідними країнами світу наведемо результати розрахунків за кількома найбільш комплексними, інтегральними показниками (рисунок 1.6. – 1.10), за якими можна порівняти стратегічні сценарії України та дані інших держав:

- енергоємність ВВП (макропоказник, що характеризує рівень витрат ПЕР на одиницю ВВП);

- споживання електроенергії на одну особу (свідчить про рівень економічного та технологічного розвитку країни, доступності для населення сучасного обладнання);
- рівень викидів CO₂ на TPES (характеризує рівень негативного впливу на довкілля процесу перетворення залучених первинних енергоресурсів у добробут країни);
- індекс тривалості довгих перерв в електропостачанні на одного споживача (SAIDI);
- концентрація ринків за індексом Герфіндаля – Гіршмана (за постачальниками).

Енергоємність ВВП (рисунок 1.6.) є узагальнюючим макроекономічним показником, що характеризує рівень витрат паливно-енергетичних ресурсів на одиницю виробленого валового внутрішнього продукту та є однією з фундаментальних характеристик для економіки кожної країни. Цей індикатор характеризує ефективність перетворення залучених енергоресурсів у добробут країни, що є відображенням взаємовідносин між елементами системи економічних відносин, виробничих процесів та процесу енергозабезпечення.

Поточне значення індикатора станом на 2018 р. становить 0,269 т.н.є./1000 дол. США. Цільове значення індикатора (0,1 т.н.є./1000 дол. США) визначене віджповідно до значень індикаторів подібних за рівнем розвитку країн і проєктного бачення бажаної структури економіки країни, воно відповідає середині гомеостатичного плато (оптимального діапазону).

Споживання електроенергії на одну особу (рисунок 1.7.) характеризує рівень добробуту та технологічного розвитку країни, свідчить про споживчий потенціал населення (з точки зору 89 енерговикористання), рівень економічного та технологічного розвитку країни, доступності для населення сучасних технологічних пристроїв.

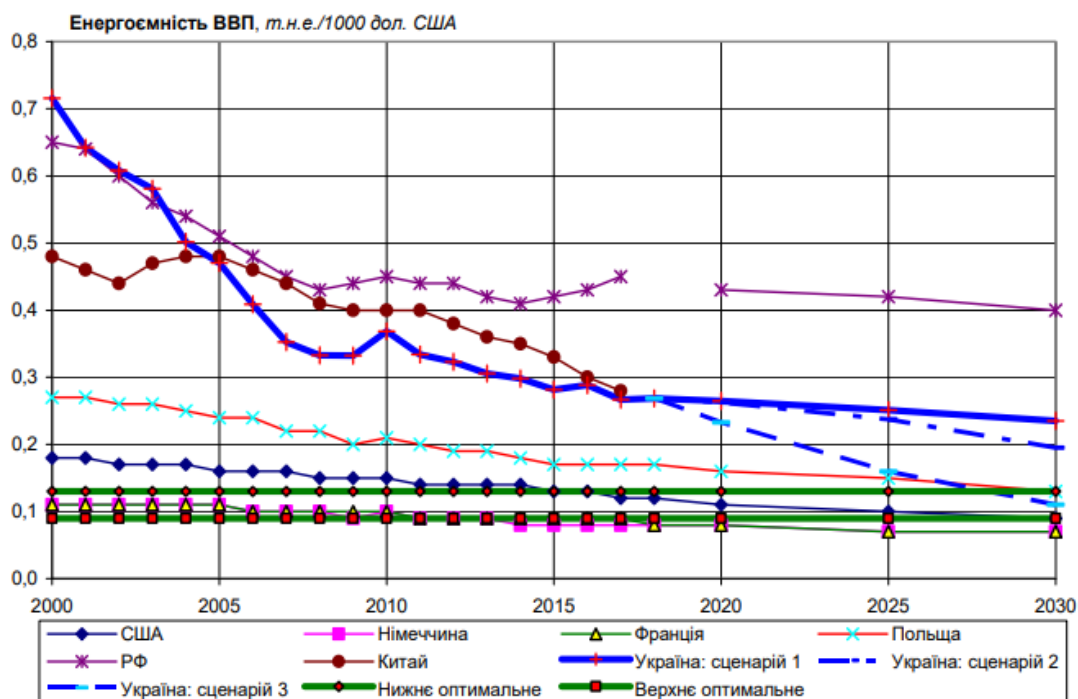


Рисунок 1.6. – Показники динаміки енергоємності ВВП деяких країн світу до 2030 р.

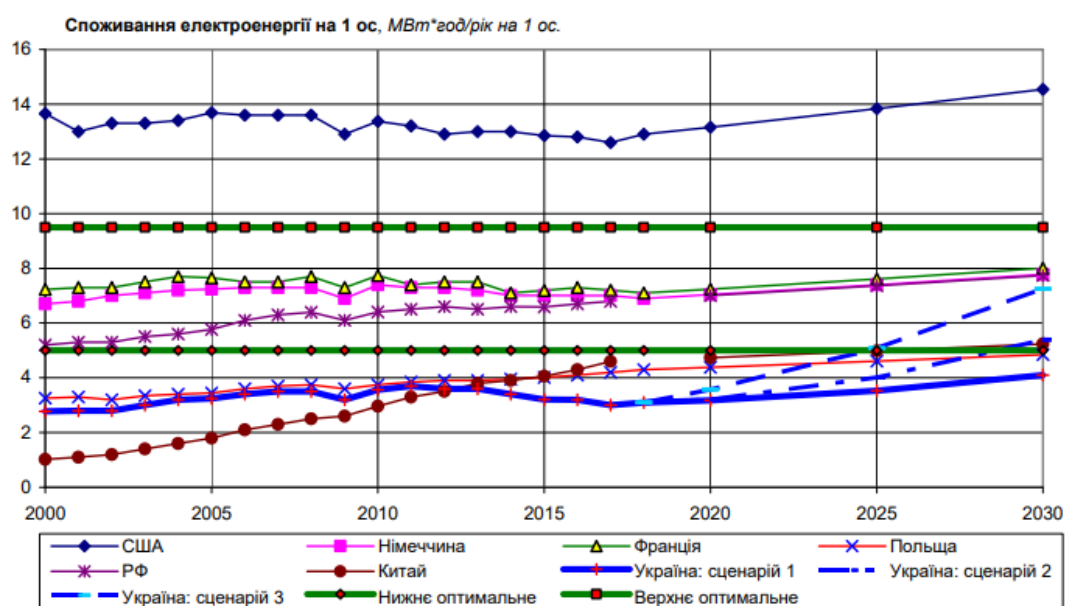


Рисунок 1.7. – Показники динаміки споживання електроенергії на одну особу в деяких країнах світу

Поточні значення індикатора споживання електроенергії на особу (МВт*год/рік на 1 ос.) в Україні станом на 2018 р. становлять 3,1 МВт*год/рік на 1 ос. Цільові значення індикаторів обрані з урахуванням значень

енергоспоживання країн з подібними природно-географічними та економічно-технологічними параметрами розвитку та відповідають середині оптимального діапазону 7,25 МВт*год/рік на 1 ос.

На жаль, за реалістичним сценарієм Україні до 2030 р. не вдасться наблизитися до оптимального діапазону цього показника. За оптимістичним сценарієм Україна в 2028 р. може перетнути нижню межу оптимального діапазону та наздогнати Польщу. І лише за сценарієм збалансованого сталого розвитку Україна може в 2030 р. досягти сучасного рівня споживання електрики у Німеччині та Франції.

Ще одним показником, відносно якого можна здійснити на міжнародному рівні порівняння стратегічних сценаріїв України, є рівень викидів CO₂ на TPES (рисунок 1.8.). Цей індикатор характеризує рівень негативного впливу на довкілля під час процесу перетворення залучених первинних енергоресурсів у добробут країни.

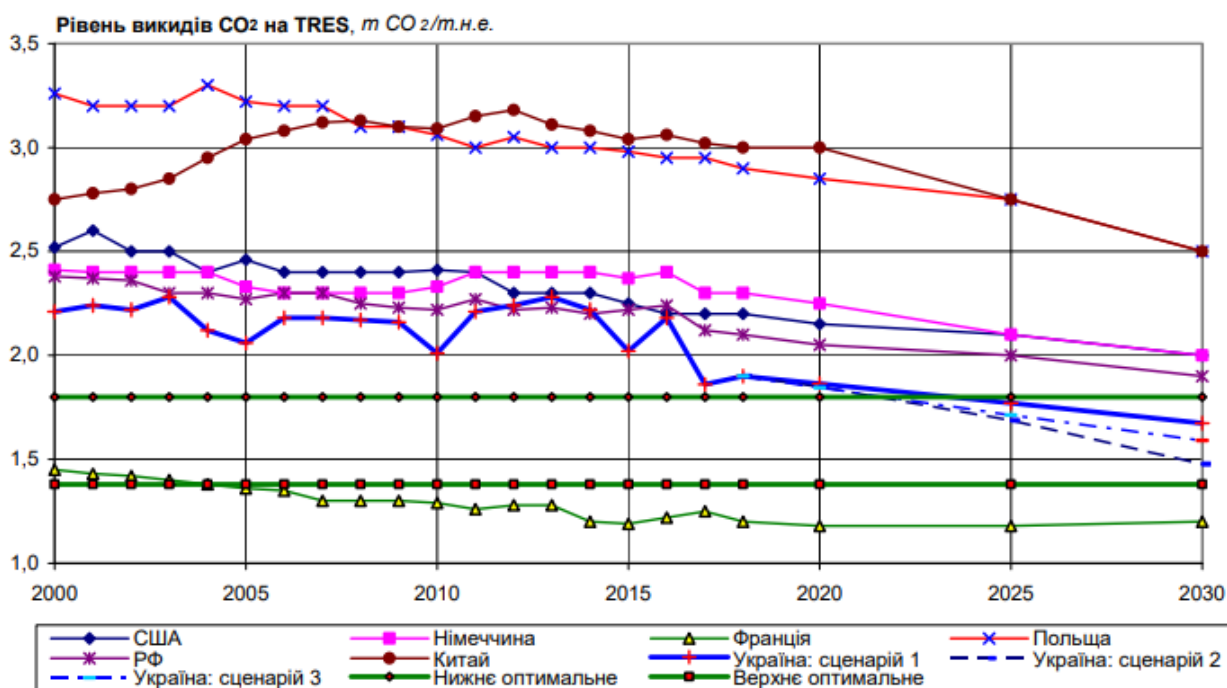


Рисунок 1.8. – Показники динаміки викидів CO₂ на TPES деяких країн світу до 2030 р.

Слід зазначити, що трансформація економіки суттєво знизила рівень викидів CO₂ в «енергетичній суміші» – уже з 2014 р. цей показник в Україні

був нижчим від загальносвітового (2,25 та 2,4 т CO₂/т.н.е. відповідно) та нижчий ніж у багатьох країн-сусідів із близькою структурою економіки (РФ, Польща), а також провідних країн світу (Німеччина, США, Китай). І лише у Франції за рахунок найбільшої у світі частки атомної генерації (більше 80 %) показник викидів CO₂ в «енергетичній суміші» нижчий за той, що в Україні. Вже зараз викиди CO₂ в Україні перебувають на межі оптимального діапазону і за будь-якого сценарію розвитку до 2025 р. увійдуть у цей оптимальний діапазон. Цьому сприяє як третя у світі частка атомної генерації у виробництві електроенергії (більше 50%), так і розвиток відновлюваних джерел енергії [11].

Індекс тривалості довгих перерв в електропостачанні на одного споживача (SAIDI) (рисунок 1.9) відображає спроможність країни забезпечити визначений рівень та якість постачання електричної енергії споживачам. Індикатор може слугувати мірилом стійкості (відновлення) електропостачання при блокуванні постачання енергоресурсів/технологій/послуг тощо [11].

Поточне значення індикатора станом на 2018 р. за даними Регулятора становить 696 хв/рік. Цільове значення індикатора на рівні 200 хв/рік встановлене з огляду на пріоритети національної безпеки (забезпечення національної стійкості), стан технологічного розвитку електроенергетики, готовність учасників ринку реалізувати відповідні заходи та відповідає середині експертно визначеного оптимального діапазону.

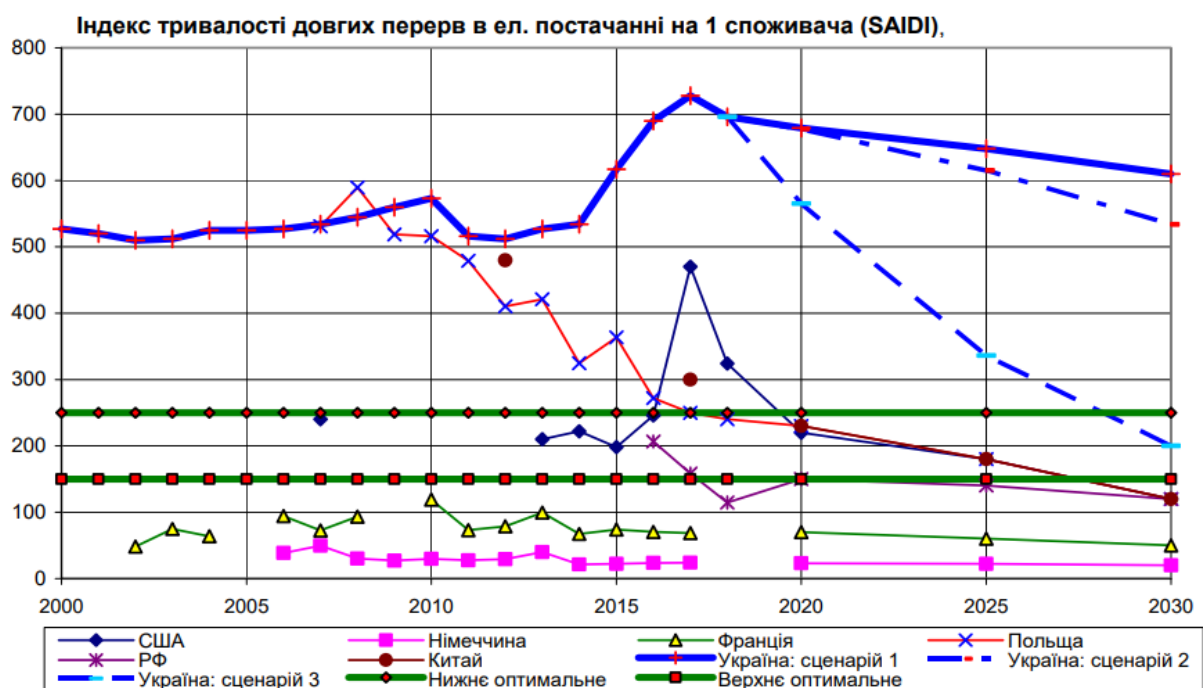


Рисунок 1.9. – Показники динаміки індексу тривалості довгих перерв в електропостачанні на одного споживача в деяких країнах світу до 2030 р.



Рисунок 1.10. – Показники динаміки концентрації ринків за індексом Герфіндаля – Гіршмана

За рахунок заходів з диверсифікації, що проводилися в Україні з 2014 р., вдалося суттєво покращити цей показник. До 2030 р. за оптимістичним

сценарієм можна очікувати, що цей показник досягне оптимального діапазону, а за сценарієм сталого розвитку – досягне цільового значення індикатора.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Стратегічні орієнтири сталого розвитку та його складові частини, визначені з урахуванням чутливості впливу кожного окремого складника на інтегральний індекс, є метою стратегічного планування на середньо- або довгострокову перспективу. Цілком очевидно, що розраховані стратегічні значення індикаторів (це відносні величини), які визначаються відношенням макропоказників, можна отримати за безліччю їхніх значень. Тому для порівняння отриманих сценаріїв необхідно зробити прив'язку до стратегічних значень якогось найважливішого макропоказника, відносно якого можна порівняти стратегічні сценарії України. Таким макропоказником може бути «ВВП на одну особу» (за поточним обмінним курсом).

Запропонований підхід до розроблення стратегічних сценаріїв сталого розвитку з позицій безпеки є універсальним та може бути застосований для окремих сфер національної безпеки будь-якої країни, окремих сфер чи галузей національної економіки під час стратегічного планування на середньо- та довгострокову перспективу.

На жаль, і реалістичний, і оптимістичний сценарій розвитку не забезпечують бажаного досягнення оптимального діапазону індексу перерв в електропостачанні в середньостроковій перспективі.

Концентрація ринків за індексом Герфіндаля – Гіршмана (за постачальниками) (рисунок 1.10) – це об'єктивний критерій загрозливих для національної енергетики ситуацій на міжнародних ринках ПЕР. Розраховується як сума квадратів часток ринку, що належать k-му постачальнику j-го енергетичного енергоносія.

Індикатор характеризує процес взаємодії постачальників та споживачів на енергетичних ринках, що визначає легкість зміни постачальника, гнучкість постачання, конкурентність відносин в енергетиці [11]. Вища конкуренція свідчатиме про створення стимулів до підвищення ефективності

господарювання та встановлення мінімально можливих цін на ринках і недопущення зловживань монопольним становищем з боку окремого суб'єкта.

Поточне значення індикатора наведене станом на 2018 р. Цільове значення (1400) визначене відповідно до показників економічно розвинених країн ЄС та світу, відповідає середині оптимального діапазону.

РОЗДІЛ 2. ВНУТРИШНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕНЕРГІЇ

2.1. Вступ

Чисельне моделювання на основі математичного моделювання є загальним методом оцінки споживання енергії електромобіля (EV) на певному маршруті. Чисельні методи широко застосовуються, починаючи від статистичних моделей для оцінки викидів CO₂, кінематичних моделей для моделювання мікроскопічних слідів або складних динамічних моделей для визначення впливу компонентів [21]. Існує безліч обчислювальних інструментів, які дозволяють перевірити роботу електромобілів, зосереджуючись на реакції на цикли водіння [22]. Процес моделювання може бути «назад» або «вперед» або навіть їх поєднанням. Перший відносно легший у використанні/впровадженні, тоді як другий є більш складним при адаптації до реальних циклів водіння. Хоча було проведено численні дослідження, які стосуються «прямого» методу розробки моделей електромобілів, ці дослідження не стосуються чіткого та короткого опису компонентів, залучених до розробки моделей, і оцінки їх споживання енергії на основі встановленого циклу водіння. Дослідження внутрішніх характеристик прямого методу створює відправну точку для розробки обчислювальних моделей на основі штучних нейронних мереж (ШНМ) з метою визначення зв'язків між низкою факторів, які впливають на енергоспоживання електромобілів як функцію від вхідні параметри.

У літературі (наприклад, див. [23 , 24 , 25 , 26 , 27 , 28 , 29] і посилання в них) доступна велика різноманітність моделей електромобілів , які, залежно від необхідних деталей кожного компонента, можуть бути стаціонарними , квазістаціонарний або динамічний. посилання [23] представляє моделювання та симуляцію гібридного електромобіля, тоді як [24] фокусується на акустичному

модельованні двигунів. У [25] автори представляють плоску динамічну симуляцію транспортних засобів на основі реального циклу водіння. У [26 , 27] модельовання та оцінка споживання енергії електромобілем здійснюється з використанням акумуляторних накопичувачів [26] і точної оцінки енергетичної моделі електромобіля [27]. Так само в [28 , 29] автори зосереджуються на модельованні високопродуктивних силових агрегатів, враховуючи модельовання та перевірку [28], а також параметри трансмісії [29]. Більшість моделей EV можуть бути стаціонарними, квазістаціонарними або динамічними, залежно від деталей, необхідних для кожного компонента трансмісії [30]. ADVISOR – це симулятор, розроблений Національною лабораторією відновлюваної енергетики (NREL), який поєднує зворотний і прямий методи [31]. AUTONOMIE – це симулятор, розроблений Аргонської національною лабораторією (ANL), який використовує прямий метод [32 , 33]. посилання [32] виконує модель перевірки з даними випробувань на динамометрі за допомогою AUTONOMIE, тоді як [33] вивчає життєвий цикл і викиди парникових газів, що є результатом роботи різних трансмісій транспортних засобів. Ці симулятори просто дозволяють вводити дані через графічний інтерфейс, показуючи результати після модельовання моделі, без деталізації процесу розробки моделей електромобілів. Інші дослідження використовують декілька програм програмного забезпечення для коригування моделі відповідно до необхідних результатів [34], навіть поширюючись на системи громадського транспорту, такі як електричні автобуси [35], на управління енергією силових агрегатів [36] і на моделі гібридних двигунів. транспортних засобів [37 , 38]. У [39] представлено комплексне модельовання гібридних електромобілів із прямою передачею в Simulink та його використання для досліджень енергоменеджменту. Подібним чином автори [30] досліджували ефективність гібрида з різними стратегіями рекуперативного гальмування. З іншого боку, вих. [31] представляє порівняння між підходами, спрямованими вперед і назад, для модельовання електромобіля, тоді як [32] проводить порівняльний аналіз між орієнтованими вперед і назад моделями, спрямованими назад, у розмірах

компонентів трансмісії. Однак немає жодних досліджень, які демонструють методологію розробки моделі електромобілів на основі прямого методу, який є методом, який найкраще відповідає реальності. Більшість існуючої літератури зосереджено на представленні результатів енергетичного аналізу на основі вже виконаних моделей електромобілів або навіть на порівнянні цього аналізу з різними методами моделювання (зворотним або комбінованим), тобто стан навантаження порівнюється в кінці циклу з Моделювання викидів електромобілів методами «вперед» і «назад». Однак жодна з цих моделей не дозволяє ідентифікувати задіяні компоненти та вхідні змінні для отримання функціональної моделі «прямим» методом. Щоб заповнити прогалини в доступній літературі, це дослідження висвітлює всі ці внутрішні характеристики форвардного методу. Крім того, це дослідження розробляє модель для оцінки стану заряду (SOC) наприкінці їздового циклу. Ця модель має на меті слугувати еталоном для аналізу більш складних систем. У зв'язку з цим у цій роботі виконано теоретичне дослідження математичної моделі кожного з залучених компонентів (наприклад, цикл водіння, модель водія, трансмісія та модель багатокузовного транспортного засобу), що слугує для розробки моделей реальних циклів водіння, отримані через GPS з більш точними та реальними результатами, а також оцінка автономності та енергоспоживання допоміжних елементів електромобілів у будь-який час. Для простоти основні внески цієї роботи перераховані нижче:

- Виділення внутрішніх характеристик форвардного методу;
- Надання систематичного опису задіяних блоків разом із їхніми рівняннями та необхідними міркуваннями для розробки моделі;
- Моделювання, імітація та валідація електромобіля прямим методом;
- Енергетичний аналіз електромобіля перед циклом водіння з міським динамометром (UDDS).

2.2. Матеріали та методи

Методологія, використана в цьому дослідженні, схематично зображена на рисунку 2.1. По-перше, представлено необхідну передумову, включаючи короткий вступ до прямого методу, який дозволяє нам чітко визначити його внутрішні характеристики. Далі цей метод використовується для виконання обширного моделювання на еталонній моделі EV, включаючи математичні нотації та опис моделі в Matlab–Simulink, щоб продемонструвати узгодженість математичного моделювання.

2.2.1. Фон

Зворотне моделювання розраховує потребу в потужності різних компонентів відповідно до циклу водіння, яка має бути розподілена між джерелами живлення, щоб задовольнити потреби автомобіля. Нарешті, отримано енергоспоживання двигуна та акумуляторів [36]. Навпаки, у прямому моделюванні модель визначає потребу в енергії в процесі їздового циклу, щоб передати потребу в енергії до контролера автомобіля. Цей контролер отримує сигнал і враховує поточний стан компонентів автомобіля, щоб оптимізувати та визначити розподіл потужності разом із вихідним сигналом кожного джерела живлення. Потік руху передається від приводної системи, проходячи через трансмісію до шинного модуля. Потім за допомогою рівнянь, які моделюють модуль керування, реальна швидкість, яка передається водієві, обчислюється для формування замкнутого циклу. На рисунку 2.2 представлена проста схема процесу моделювання методом «вперед». Цикл водіння забезпечує швидкість для проходження через модель водія, який контролює поздовжні інтерфейси транспортного засобу (педаль акселератора та гальма) на основі різниці між швидкістю об'єкта та швидкістю автомобіля. Акумулятор постачає двигун енергією, а двигун забезпечує крутний момент, який через кінематичний ланцюг передає рух на колеса, де тяга підтримує рушійну силу. Позиція

повертається до циклу руху, щоб знайти цільову швидкість, закриваючи цикл обчислення.

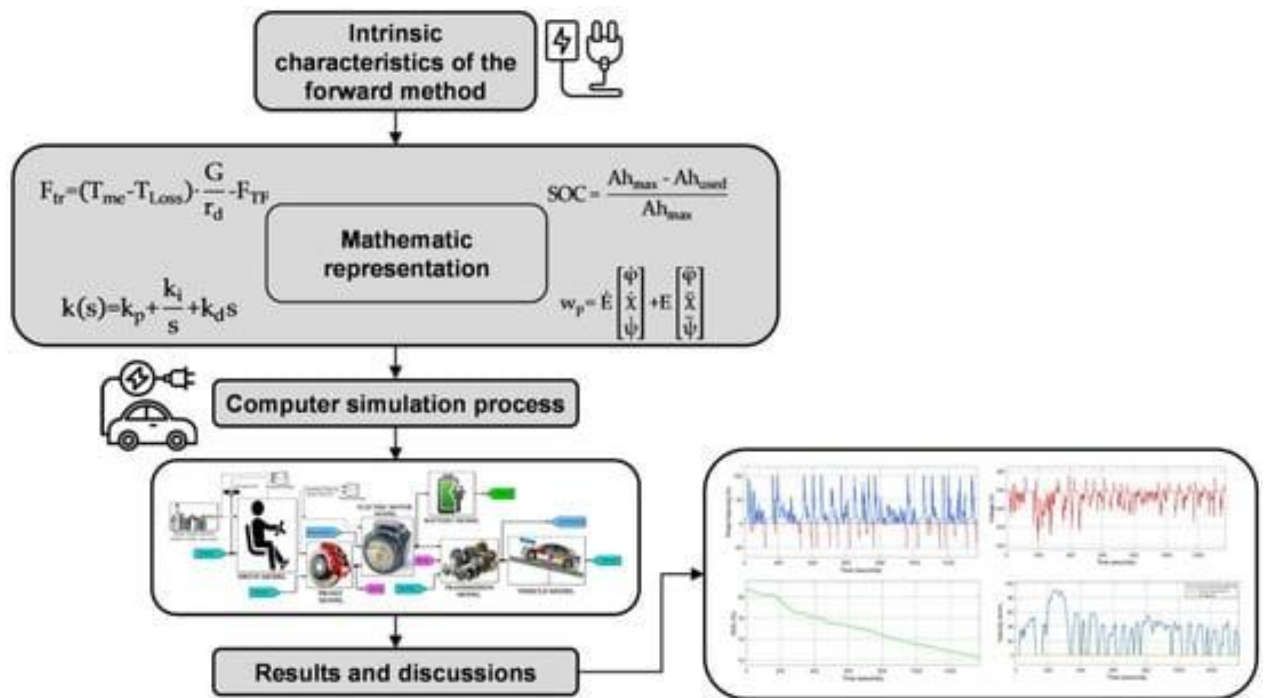


Рисунок 2.1. – Схематичне пояснення запропонованої методики

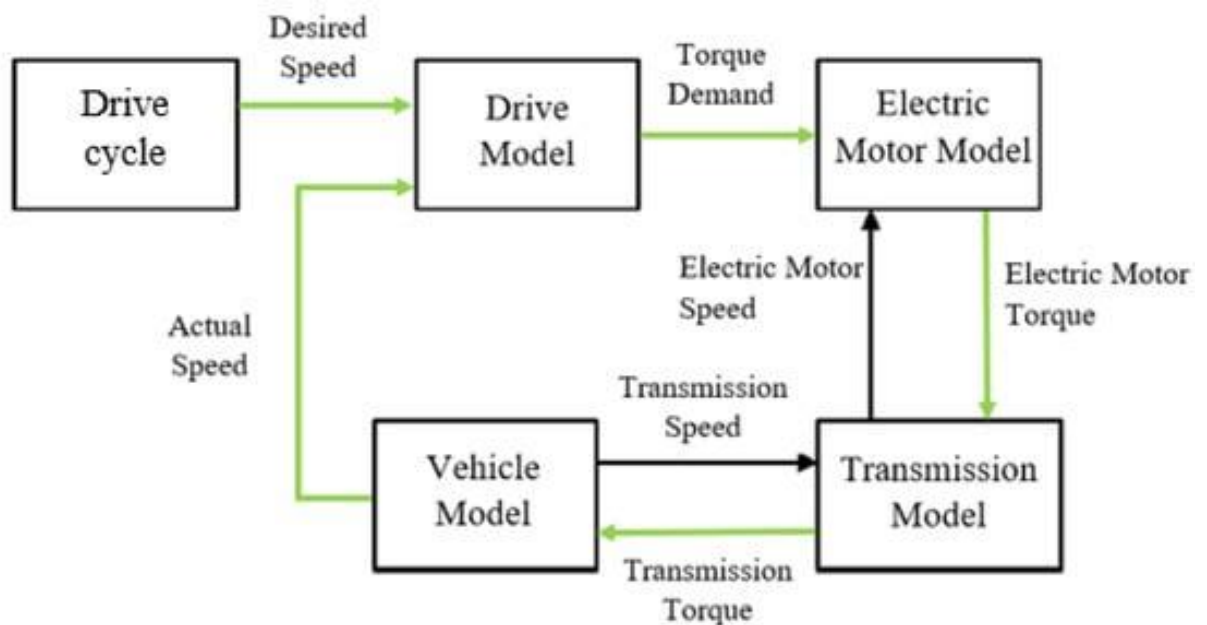


Рисунок 2.2. – Схематичне зображення процесу прямого моделювання

2.2.2. Математичне моделювання форвардного методу

У цьому розділі наведено математичні основи прямого методу, а також пояснення блоків, зображених на рисунку 2.2.

2.2.2.1. Модель водіння

Щоб оцінити SOC бортових акумуляторів і запас ходу електромобіля, імітаційні моделі базуються на міжнародно-законодавчих циклах водіння, а деякі репрезентативні приклади наведені нижче: Федеральна процедура тестування 72/75 (FTP 72/75), Новий європейський цикл водіння. (NEDC) (див. рисунок 2.3 а), японський цикл 08 (JC08), всесвітній гармонізований легкий робочий цикл (WLTP), 15-режимний цикл випробувань Європейської економічної комісії (ECE 15) і UDDS (див. рисунок 2.3. b), серед багатьох інших. Усі вони відрізняються за ділянками прискорення, гальмування, швидкості, тривалості циклу тощо [42 , 43 , 44 , 45 , 46].

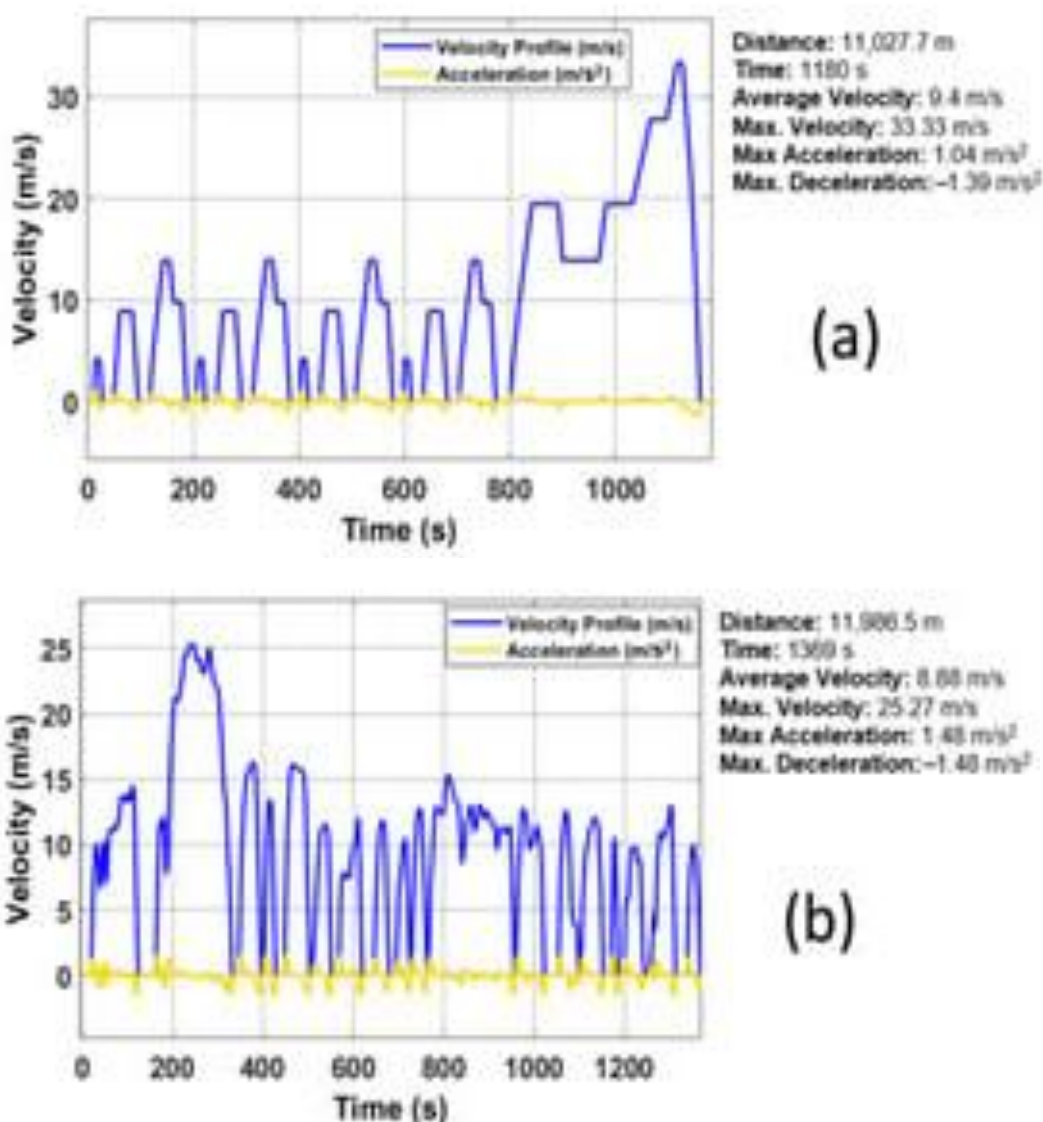


Рисунок 2.3. – Приклади стандартних циклів водіння: NEDC (a) і UDDS (б)

У 2019 році Європа прийняла WLTP як стандарт, таким чином зробивши NEDC застарілим. Цей цикл перевіряє транспортні засоби на довших маршрутах, вищих прискореннях і вищих швидкостях; однак все ще вважається, що це не відповідає дійсності. Електромобілі спочатку тестуються на динамометричному стенді в різних циклах водіння; одним із найважливіших є UDDS, який імітує водіння в міських районах з перервами, запускає автомобіль і розганяє його до максимально дозволеної швидкості та знову зупиняє. Він використовується для вимірювання споживання енергії в місті. У

розробці моделей електромобілів для моделювання традиційно використовується цикл UDDS, за допомогою якого електромобілі піддаються численним циклам випробувань, доки акумулятор повністю не розрядиться та не зупиниться сам по собі, забезпечуючи таким чином попередню автономність. У цьому дослідженні застосовано цей їздовий цикл, а не застарілий цикл NEDC або омологаційний цикл WLTP.

2.2.2.2. Модель водія

Модуль контролера підходить для прямої імітаційної моделі, дозволяючи імітаційній моделі формувати замкнуту систему, для якої використовуються PID-регулятори (пропорційні, інтегральні, похідні), як показано на рисунку 2.4. Для прямого методу потрібна модель водія, яка діє як привід педалі акселератора/гальма, щоб слідувати цільовій швидкості (прив'язаний цикл руху). Для цього можна використовувати різні моделі контролерів; одним із найпоширеніших є PID-регулятор, схема якого наведена на рисунку 2.4 [42]. PID-регулятор заснований на повторюваних тестах і досвіді для визначення вихідних значень. Система керування має мінімальну статичну похибку між фактичною швидкістю моделювання та цільовою швидкістю; ця помилка необхідна для підтримки крутного моменту ведучих коліс, оскільки зміни в моделюваній швидкості завжди є функцією змін цільової швидкості [48]. Якщо параметри PID-регулятора відкалібровані належним чином, затримки будуть невеликими, а крутний момент двигуна встановлюється ефективно; інакше затримки будуть довшими і можуть навіть призвести до розрядки системи.

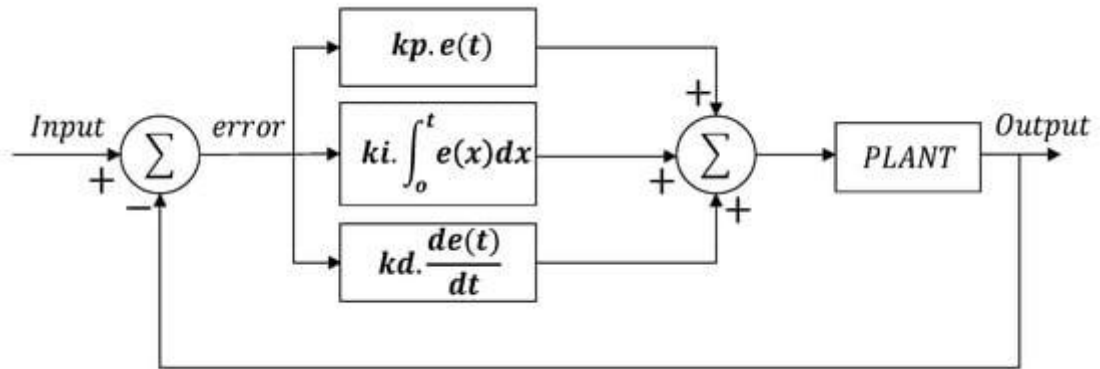


Рисунок 2.4. –PID-регулятор

Передавальна функція PID-регулятора визначається рівнянням (2.1).

$$k(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad .1)$$

де k_p – пропорційний коефіцієнт, k_i – інтегральний коефіцієнт, а k_d є похідним коефіцієнтом.

У [49] автори порівняли звичайне PID-регулювання з лінійно-квадратичною схемою (LQR), визначивши, що LQR може перевершити звичайне PID-регулювання. Зокрема, розглянуто схему, наведену на рисунку 2.5, прийнявши значення $A = [1, 0, 2, 0]$, $B = [1, 0]$, $C = [0, 1]$, $K = [12, 2912, 31, 6228]$, і посилення для кроку входу 31,6228 для LQR. На рисунку 2.6 видно, що з цими параметрами контролер LQR покращує перерегулювання та час встановлення порівняно з PID-регулятором, який приймає значення $P = 0,00012$, $I = 0,00047$ і $D = 0,000068$ [50]. Однак PID-регулятор має менший час відгуку, він краще працює при швидких переходах швидкості, зберігаючи мінімальну похибку між цільовою та реальною швидкостями. На основі цього висновку достатньо застосувати PID-регулятор, який виконує функцію педалі (розгін/гальмо), щоб слідувати цільовому профілю швидкості.

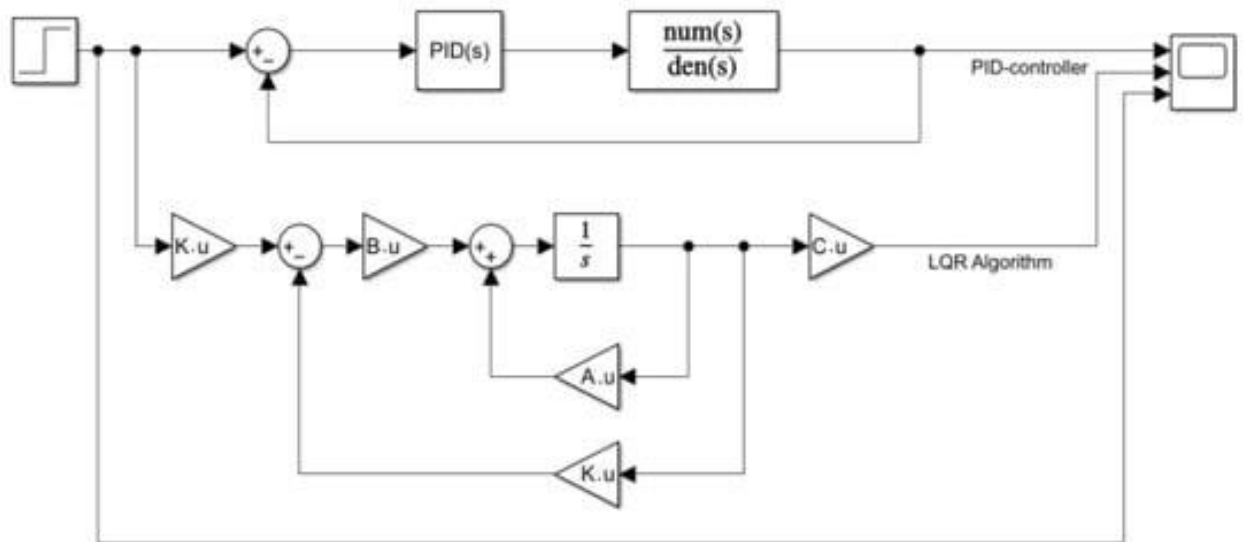


Рисунок 2.5. – Схема для моделювання PID і LQR контролера

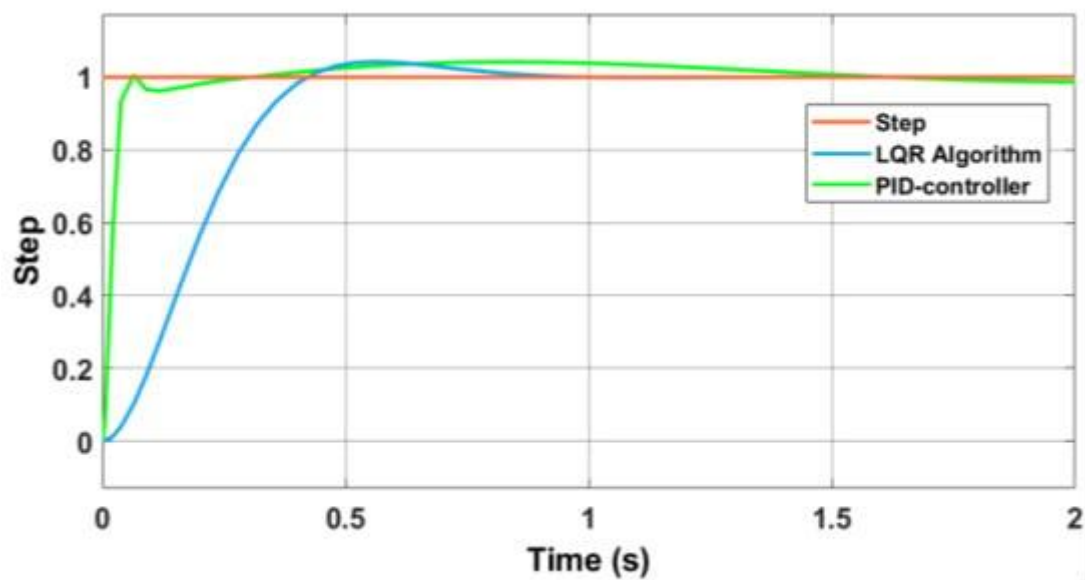


Рисунок 2.6. – Результат моделювання для кроку PID та LQR контролера

2.2.2.3. Модель гальма

Гальмівна сила пропорційна крутному моменту, створюваному на колесах. Щоб зупинити шину, необхідно прикласти силу, протилежну обертальному руху, який розраховується в (2.2). Фактично, рівняння (2.2) обчислює необхідне гальмування лише для одного колеса, необхідно помножити цей результат на загальну кількість коліс, щоб отримати необхідну загальну гальмівну силу в транспортному засобі [51].

Гальмівна сила

$$\text{Braking force } (F_F) = \frac{N_f}{r_d} \quad (2.2)$$

де N_f – гальмівний момент (Н), r_d радіус шини (м).

Співвідношення, яке визначає відновлену енергію за допомогою рекуперативного гальмування, є загальним і застосовується до будь-якого циклу водіння [52]. Енергоефективність рекуперативного гальмування η_{rb} визначається рівнянням (2.3) [53, 54].

$$\eta_{rb} [\%] = \frac{E_{\text{recoverable}} [\text{kWh}]}{E_{\text{available}} [\text{kWh}]} \quad (2.3)$$

де $E_{\text{recoverable}}$ [кВт·г] – це енергія, яка рекуперується PID час гальмування і $E_{\text{available}}$ [кВт·г] – це максимальна енергія, доступна для відновлення PID час гальмування.

Доступна енергія розраховується за допомогою рівняння (2.4).

$$E_{\text{available}} [\text{kWh}] = \int_0^t P_{\text{Wheels}}^{(-)}(t) dt \quad (2.4)$$

де $P_{\text{Wheels}}^{(-)}(t)$ – від'ємна частина потужності в колесах у [кВт].

2.2.2.4. Модель електродвигуна

Вихідна потужність електродвигуна змінного струму залежить від його ефективності, яка моделюється як квазістатична карта ефективності, яка залежить від вихідної швидкості та крутного моменту, при цьому ефективність інвертора вважається постійною. З цих приміщень вихідна потужність (P_{em}) можна розрахувати за рівнянням (2.5) [35].

$$P_{em} = \min \left(P_{inv} \cdot \eta_{em}(W_{em} \cdot T_{em}) \cdot \frac{P_{inv}}{\eta_{em}(W_{em} \cdot T_{em})} \right) \quad (2.5)$$

де P_{inv} – потужність інвертора (Вт), W_{em} – кутова швидкість електродвигуна (рад/с), T_{em} – крутний момент електродвигуна (Нм), η_{em} – ККД електродвигуна (%).

Під час моделювання контролер електродвигуна отримує запит на потужність і регулює вихідний крутний момент для його забезпечення. Оскільки поточна швидкість двигуна не може змінитися миттєво, теоретичний крутний момент розраховується контролером на основі поточної швидкості двигуна та потреби в потужності, а потім знаходить поточну ефективність двигуна з карти ефективності. Однак також можна вдаватися до конкретних параметрів електродвигуна, замінивши карту ефективності значеннями максимального крутного моменту та максимальної потужності – див. рівняння (2.5) – і враховуючи константи втрат двигуна (k_c , k_i , і k_w) для втрати потужності вихідна потужність обмежується потужністю електродвигуна за такими рівняннями:

$$P_{em} = T_{em} \cdot W_{em} \quad (2.6)$$

$$P_{loss} = k_c \cdot T_{em}^2 + k_i \cdot W + k_w \cdot W^3 + C \quad (2.7)$$

$$P_{in} = T \cdot W + P_{loss} \quad (2.8)$$

$$P_{out} \leq P_{max} \quad (2.9)$$

$$P_{max} = P_{max}(W_m) \quad (2.10)$$

2.2.2.5. Модель трансмісії

Система трансмісії передає рух, отриманий електродвигуном, на колеса, як показано на рисунку 2.7, який моделюється за допомогою (2.11) і (2.12).

$$T_{el-em} = \frac{r_d}{\eta_g \cdot G} \cdot F_t \quad (2.11)$$

$$T_{em-el} = \eta_g \cdot \left(\frac{r_d}{G} \cdot F_t \right) \quad (2.12)$$

де η_g – ККД передачі (%), F_t – сила тяги (N), G – коефіцієнт передачі [36].

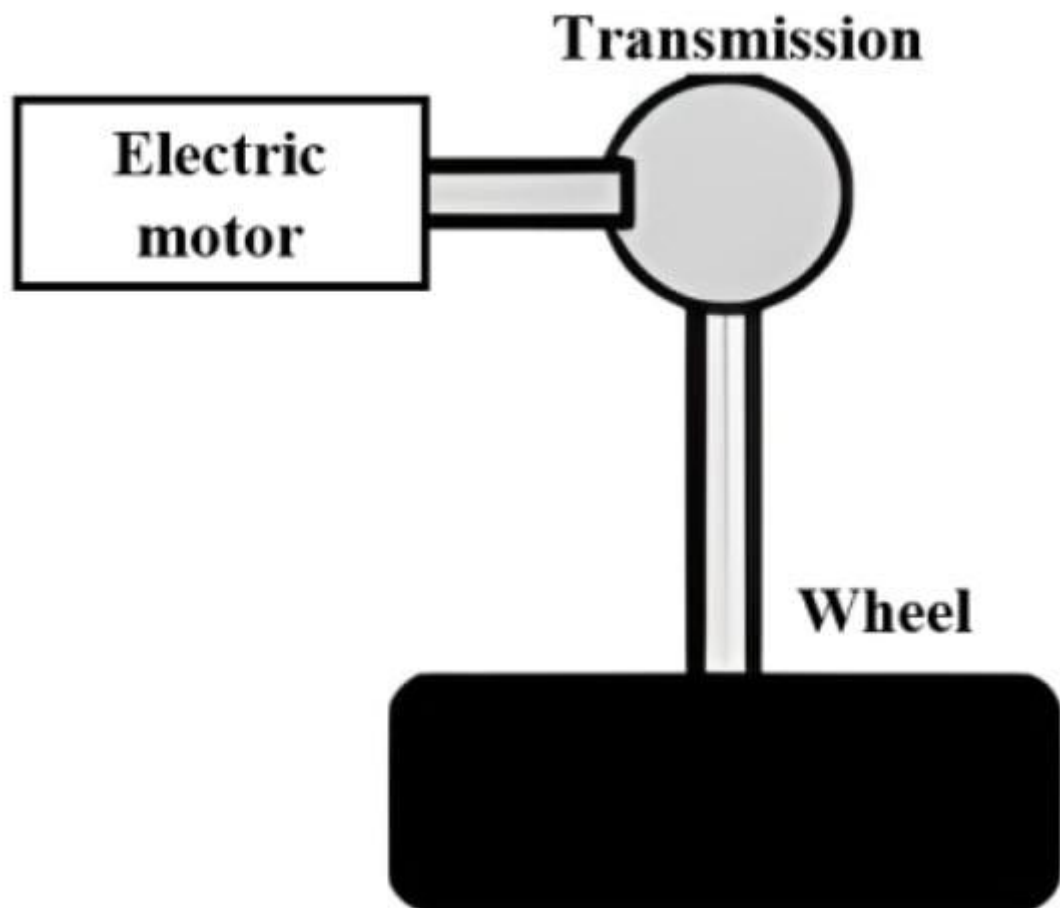


Рисунок 2.7. – Передача руху

Рівняння (2.11) використовується, коли електродвигун передає механічну потужність (T_{el-em}) і рівняння (2.12) використовується, коли електродвигун

отримує механічну енергію $(T_{el} - e_m)$ [57]. Подібним чином залежність між лінійною швидкістю «v» електромобіля та кутовою швидкістю W_{em} двигуна в (рад/с) можна отримати за допомогою рівняння (2.13).

$$W_{em} = G \frac{v}{r_d} \quad (2.13)$$

Зрештою, сила передачі визначається за рівнянням (2.14).

$$F_{tr} = (T_{em} - T_{Loss}) \cdot \frac{G}{r_d} - F_{Tf} \quad (2.14)$$

де T_{Loss} – це втрати на тертя, пов'язані з крутним моментом.

2.2.2.6. Модель батареї

До моделювання батареї можна звертатися різними способами, найбільш використовуваними є електричні та фізичні електрохімічні моделі [58, 59]. Еквівалентну електричну модель легко побудувати та налаштувати, вона дає хороші результати в оцінці напруги, струму, SOC та швидкості нагрівання [60]. З іншого боку, можна виразити фізичну модель батареї на основі електрохімічних явищ. Однак цей метод може бути складним і дорогим з точки зору обчислень, а також зазвичай використовується для оцінки його поведінки за межами заданого температурного діапазону батарей. Іншим ключовим аспектом цього моделювання є можливість використання моделей старіння на основі фізики (на відміну від емпіричного), які дають уявлення про швидкість росту катодної плівки, літійового покриття та ізоляції матеріалу внаслідок розтріскування [61], 62]. Підсумовуючи, мета полягає в тому, щоб оцінити споживання енергії електромобілем протягом циклу водіння, але не оцінити старіння кожного елемента батареї або погіршення продуктивності системи з часом. Таким чином, було б більш доцільно використовувати еквівалентну електричну модель для батареї [63]. За допомогою еквівалентної електричної моделі цей тип поведінки заряджання та розряджання представлено в

електричному ланцюзі за допомогою моделі резистивної батареї, як показано на рисунку 2.8. Модель батареї в симуляції не піддається глибокому розряду (нижче 20%) і доки не буде вичерпано всю енергію (0%); він Піддається лише аналізу стану заряду в кінці циклу UDDS.

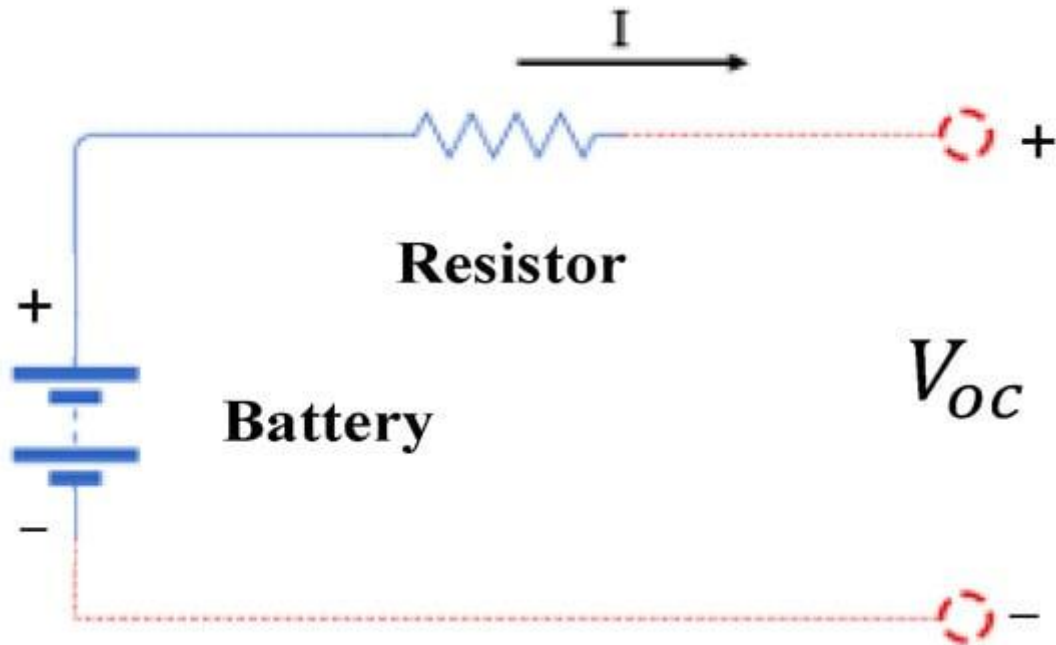


Рисунок 2.8. – Спрощений акумуляторний модуль

Максимальна потужність батареї, позначена як $p_{\max}$, вказує на максимальну потужність, якою накопичувач може обмінюватися з системою, і визначається рівнянням (2.15).

$$p_{\max} = V_{ve} \frac{V_{oc} - V_{ve}}{R_{int}} \quad (2.15)$$

де V_{oc} напруга холостого ходу (В), V_{ve} – мінімальна напруга контролера двигуна або мінімальна напруга акумулятора, і R_{int} – це опір заряду та розряду. Струм заряду або розряду розраховується за рівнянням (2.16).

$$I = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_{int} \cdot P}}{2R_{int}} \quad (2.16)$$

де P – це потужність заряджання/розряджання акумуляторів. SOC акумуляторів можна оцінити за допомогою рівняння (2.17).

$$SOC = \frac{Ah_{max} - Ah_{used}}{Ah_{max}} \quad (2.17)$$

де Ah_{max} – максимальна ємність акумуляторної батареї та Ah_{used} – це використана ємність акумуляторної батареї.

2.2.2.7. Глобальна модель EV

Поздовжня динаміка

Для моделювання електромобілів необхідно представити інерцію та опір транспортного засобу. Поздовжня динаміка аналізує поведінку транспортного засобу, коли він піддається коливанням швидкості в поздовжній площині, нехтуючи боковим прискоренням [64]. У цьому випадку транспортний засіб рухається прямолінійно, прискорюючись, гальмуючи або змінюючи нахил. На поздовжню динаміку впливають різні опори, такі як кочення, аеродинаміка та опір схилу [65]. Для аналізу цих факторів розглядається транспортний засіб, що рухається по похилій площині та по прямій.

Аеродинамічний опір – це сила, що діє на об'єкти, що рухаються в рідині протилежно їхнім рухам, яка розраховується за допомогою рівняння (2.18) [47].

$$F_a = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad (2.18)$$

Іє ρ – густина повітря, A – фронтальна площа EV, C_d – це коефіцієнт лобового опору, який залежить від форми транспортного засобу для конкретного автомобіля C_d і змінюється між 0,3 і 0,4, а v – швидкість EV.

При моделюванні поздовжньої динаміки важливі два інші параметри: опір коченню та схилу. Перший коефіцієнт відноситься до сили опору обертального руху шини в контакт з поверхнею, яка позначається як F_{rr} і може бути розрахований за рівнянням (2.19), тоді як опір нахилу позначено F_{gr} і визначається формулою (2.20). Нарешті, варто згадати про силу тяги F_t визначається формулою (2.21) [47, 66].

$$F_{rr} = m \cdot g \cdot C_r \cdot \cos \theta \quad (2.19)$$

$$F_{rp} = m \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2.20)$$

$$F_t = m \cdot a + m \cdot g \cdot C_r \cdot \cos \theta + \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2.21)$$

де m – маса EV, g – це прискорення сили тяжіння, C_r – коефіцієнт тертя, θ – кут нахилу між EV та поверхнею, а a – є прискоренням EV.

Комплексне моделювання

У цьому розділі аналізується моделювання багатьох частин, яке представляє кожен окремий компонент EV на основі їхніх бічних і вертикальних фізичних властивостей. Для цього теоретичного дослідження розглядаються три ступені свободи; однак варто зазначити, що інші, більш складні моделі можуть представляти до 94 градусів [67]. Щоб виразити повний блок багатотіла, у цій роботі розглядаються математичні моделі рами автомобіля, підвіски та коліс.

Рама транспортного засобу моделюється як тверде тіло, на якому здійснюються поступальні переміщення в трьох напрямках нерухомої системи координат (x, y, z) і обертальний рух навколо трьох осей (ϕ, χ, ψ) представлені, щоб отримати вихідний вектор $X = [x \ y \ z \ \phi \ \chi \ \psi]^T$. Ці рухи відбуваються внаслідок дії опору коченню (F_{rij}^{fr}) , сили шин $(F_{xij}^{fr}, F_{yij}^{fr})$, і зусилля шин на підвісці рами (F_{zsj}^{fr}) [68]. Для розрахунку кутового зміщення використовується закон Ейлера. Крім того, кутові прискорення транспортного засобу можуть бути отримані за допомогою центроїдальної матриці інерції та моментів сил, що діють на тіло [69]. Для отримання кутових прискорень EV (w_p) , застосовано рівняння (2.22).

$$w_p = \dot{E} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\chi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + E \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\chi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

де E – похідна Ейлера, ϕ являє собою поворот навколо осі x , χ являє собою поворот навколо осі y , і ψ являє собою поворот навколо осі z .

Для моделі підвіски вектори положення r_{sij}^{cg} необхідно спочатку встановити для кожної вершини P_{sij} по відношенню до системи координат центру тяжіння, з метою визначення загального переміщення, як показано на рисунку 2.9 . Силу реакції підвісу на раму можна розрахувати за допомогою рівняння (2.23).

$$F_{z_{sij}} = F_{K_{sij}} + F_{B_{sij}} K_{sij} (dz_{u_{ij}} - dz_{s_{ij}}) + B_{sij} \left[\dot{z}_{u_{ij}} - \left(\dot{z} + \dot{r}_{sij}^o(z) \right) \right] \quad (2.23)$$

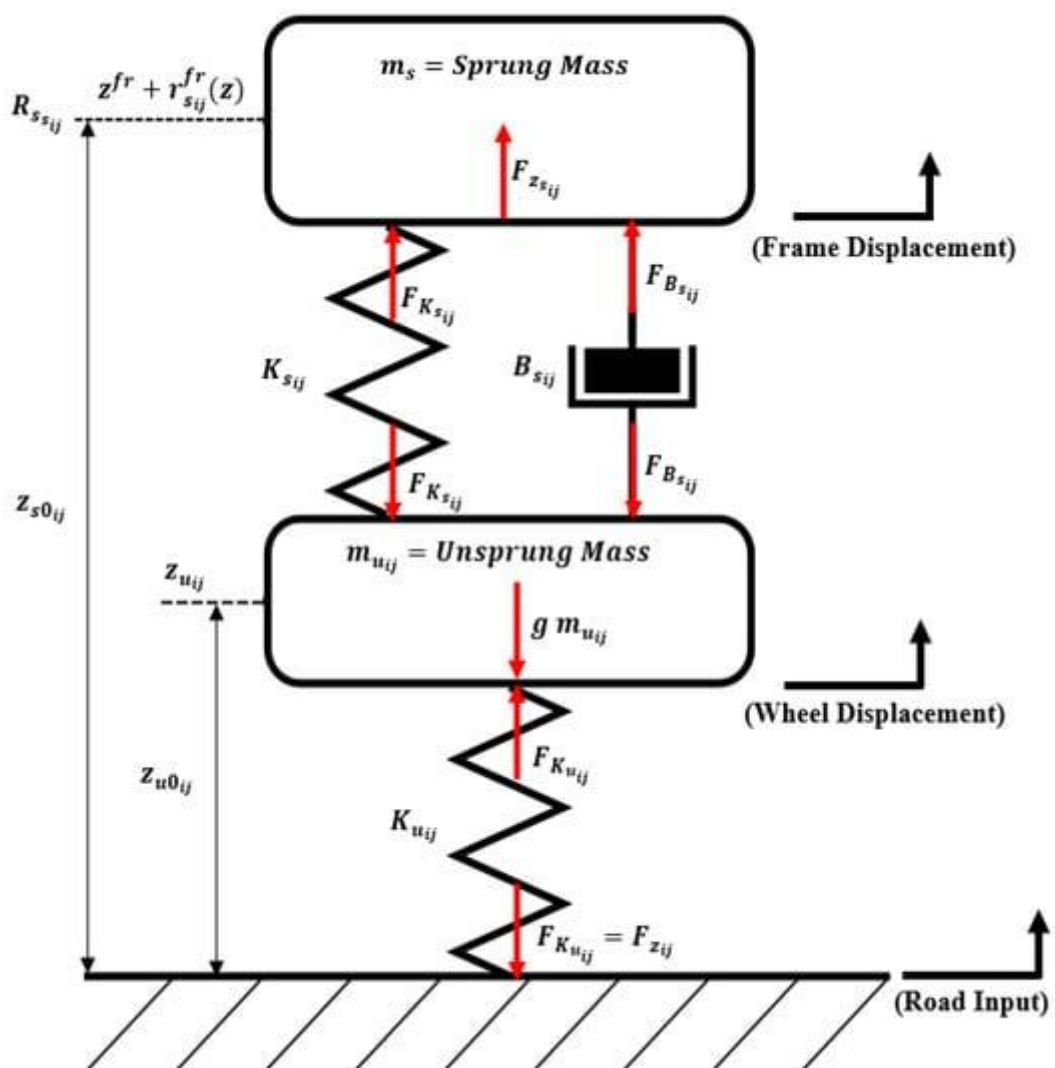


Рисунок 2.9. – Модель Підвіски автомобіля

Нарешті, математичне моделювання коліс доповнює багатотільну модель. У цьому сенсі поведінка коліс суттєво впливає на продуктивність транспортного засобу через генеровані горизонтальні сили та моменти [70]. Крім того, колеса підтримують інші види зусиль, витримуючи вагу

транспортного засобу, а також сили аеродинамічного навантаження і масопередачі під час гальмування або повороту автомобіля [69]. Для спрощення та моделювання шини використовуються експериментальні методи. Однією з найбільш використовуваних і відомих є модель Расеїка. Ця модель пов'язує поздовжню силу (F_x), бічна сила F_y , і момент вирівнювання (M_z) з кутом дрейфу (α) і коефіцієнт дрейфу (κ) коліс за допомогою набору формул для інтерполяції всіх даних. По-перше, центри обертання коліс (Q_{ij}) визначаються в горизонтальній площині відносно початку системи координат кадру за допомогою векторів положення q^{fr}_{ij} . На рисунку 2.10 детально показано розміри автомобіля [70].

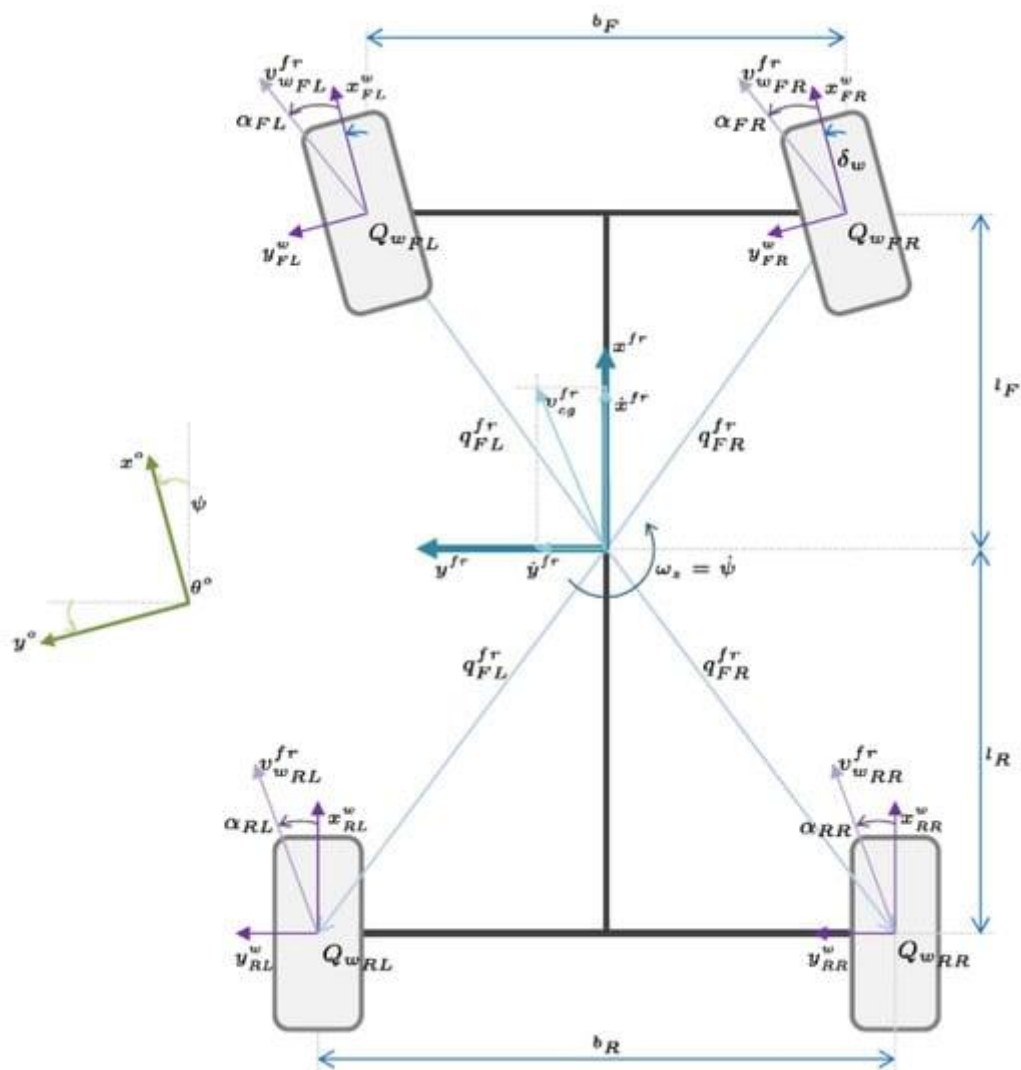


Рисунок 2.10. – Визначення еквівалентної швидкості в центрі обертання коліс

Нарешті, необхідно обертати горизонтальні сили передніх коліс на кут закручування δ_w навколо осі z , як показано в рівнянні (44). Підводячи підсумок, для простоти на рисунку 2.11 зображено різні підблоки, задіяні в моделюванні EV.

$$\begin{bmatrix} F_{xij}^{fr} \\ F_{yij}^{fr} \\ 0 \end{bmatrix} = R_w^{fr}(\delta_w) \begin{bmatrix} F_{xij}^w \\ F_{yij}^w \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

де $F_{su ij}^{fr}$ представляє вектор позиції кожного компонента, що застосовується від підвіски на шасі та колесі відповідно, $F_{w ij}^{fr}$ представляє вектор позиції кожного компонента, що застосовується від коліс на шасі, Ω_{ij} – кутова швидкість коліс.

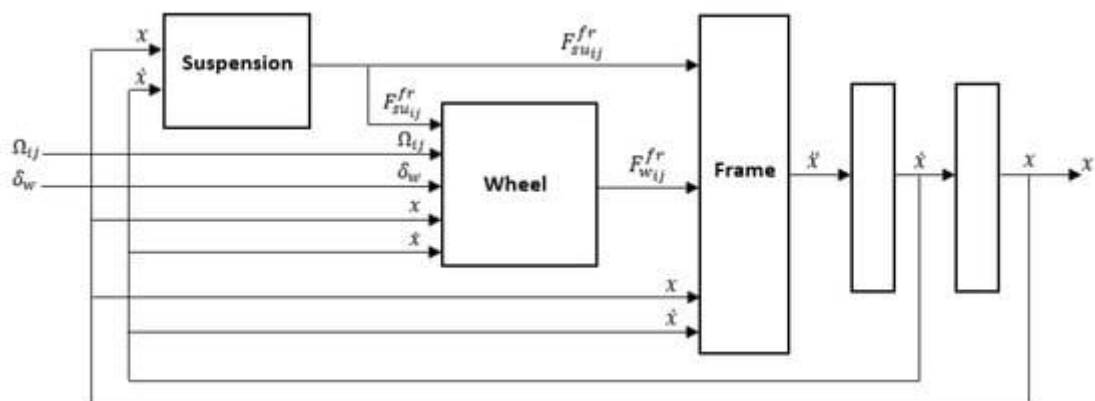


Рисунок 2.11. – Модель EV з відповідними PIDсистемами

2.3. Симуляція роботи автомобіля за допомогою прямого методу

Моделювання електромобіля розроблено за допомогою підходу прямого методу (рисунк 2.12), який включає всі блоки, описані в дослідженні, з використанням поздовжньої динаміки для моделювання транспортного засобу. Використовується цикл UDDS (див. рисунок 2.3 b), а вхідні значення зібрано в таблиці 2.1.

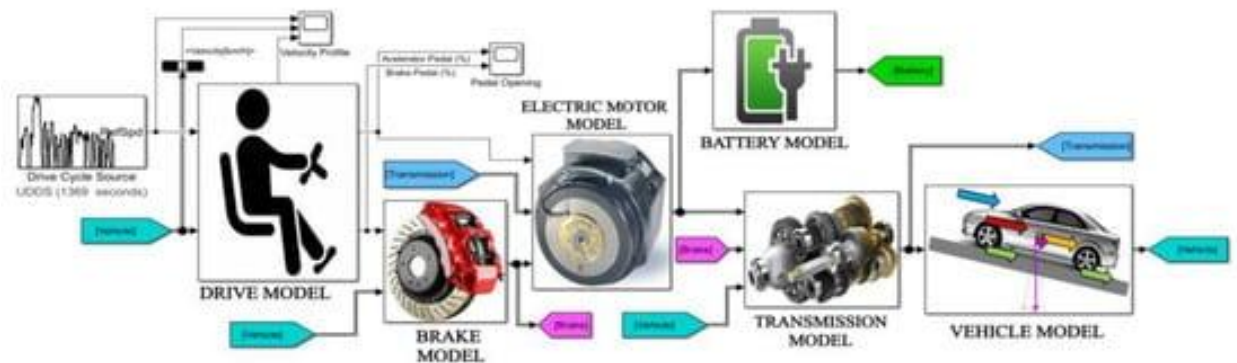


Рисунок 2.12. Блоки моделювання, що використовуються в Matlab–Simulink для числових результатів

Таблиця 2.1. – Технічні характеристики транспортного засобу (Ford Focus Electric 2013) і оцінки, враховані для моделювання

опис	Параметр	Значення	одиниця
Маса транспортного засобу	m	1700	кг
Передня зона автомобіля	A_f	2.42	m^2
Радіус колеса	r_d	0,321	m
Коефіцієнт передачі	Γ	7,82:1	-
Коефіцієнт опору	C_d	0,26	-
Коефіцієнт опору коченню	C_r	0,013	-
Максимальний крутний момент електродвигуна	$T_{\text{макс}}$	250	Нм
Електродвигун максимальної потужності	$P_{\text{макс}}$	107	кВт
Константа втрати крутного моменту двигуна	$k_{\text{см}}$	0,12	$s / \text{кгм}^2$
Константа втрат роботи двигуна	$k_{\text{ім}}$	0,01	Дж
Константа втрати інерції двигуна	k_{wm}	$1,2 \times 10^{-5}$	кгм^2
Ємність акумулятора	E	23	кВт/год
Напруга	V_{OC}	350	В
Внутрішній опір	$P_{\text{внутр}}$	0,1	Ом
SOC початковий	SOC	80.7	%

2.4. Аналіз результатів моделювання

У цьому розділі представлено результати та обговорення моделювання, виконаного на Matlab–Simulink, у якому можна оцінити всі параметри та сили, що взаємодіють з електромобілем та енергією транспортного засобу в кінці встановленого циклу водіння, як показано на рисунку 2.13. . Профіль EV схожий на маршрут UDDS, який передається моделі водія. PID-регулятор перетворює помилку в сигнали для педалі газу і гальма. Таким чином, його зображення детально розглядається протягом циклу водіння, як показано на рисунку 2.14 . На рисунку 2.15 показано SOC акумуляторної батареї протягом усього циклу руху. Початковий стан заряду вважався рівним 80,7% і після проходження маршруту (1369 с) знизився до 74,3%, зменшившись таким чином на 6,4%. На рисунку 2.16 показано зміну напруги батареї протягом циклу руху. Середня необхідна напруга становить 340 В, а максимальна ємність батареї становить 350 В, ємність, яку не можна перевищувати PID час циклу руху.

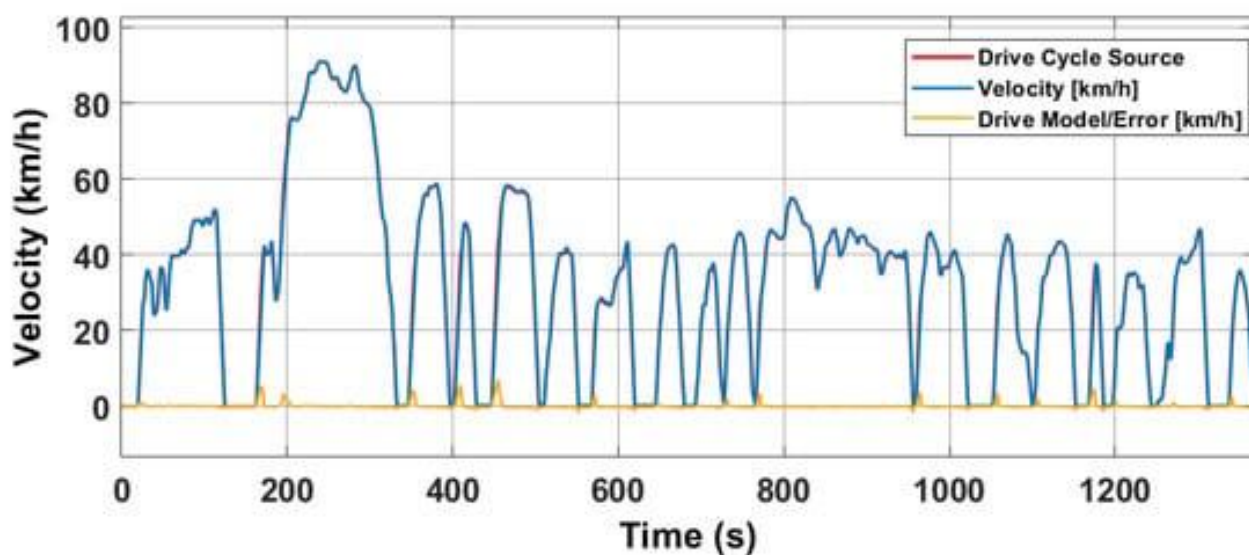


Рисунок 2.13. – Профілі фактичної та опорної швидкості в циклі UDDS

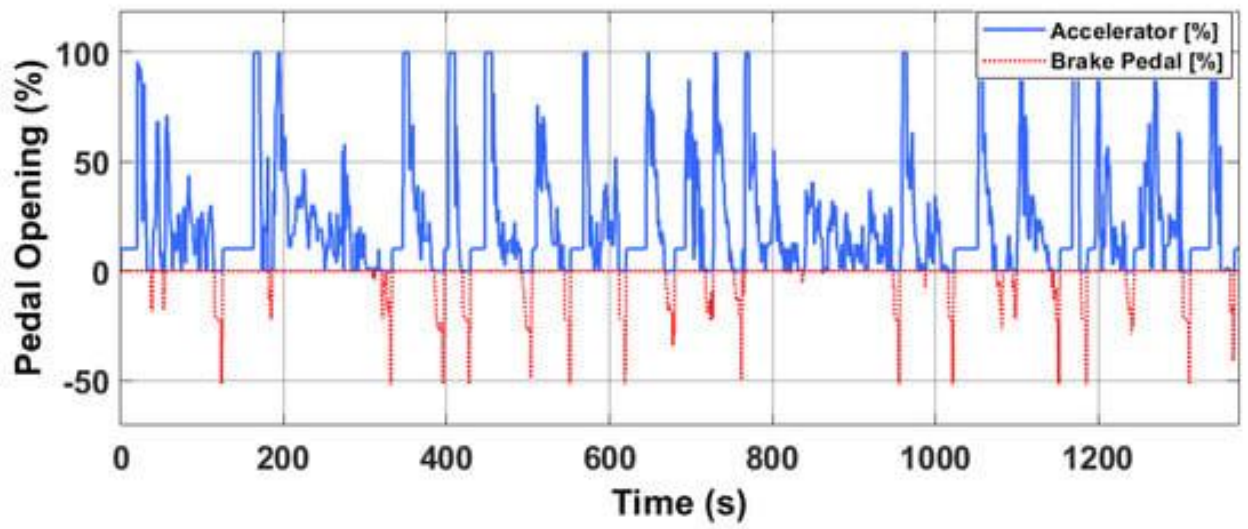


Рисунок 2.14. – Натискання педалі (цикл UDDS)

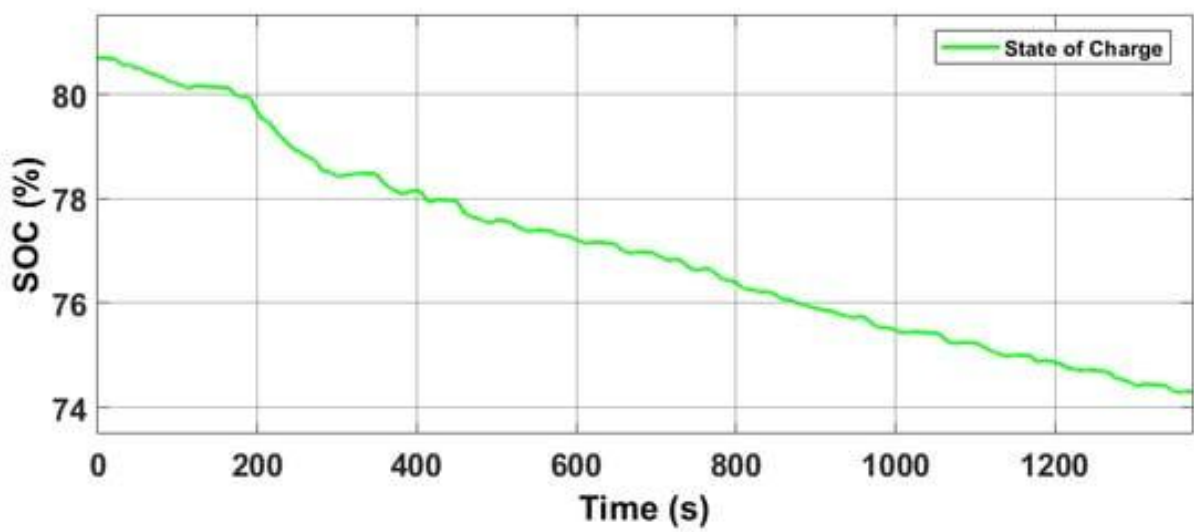


Рисунок 2.15. – Стан заряду батареї в кінці циклу приводу UDDS

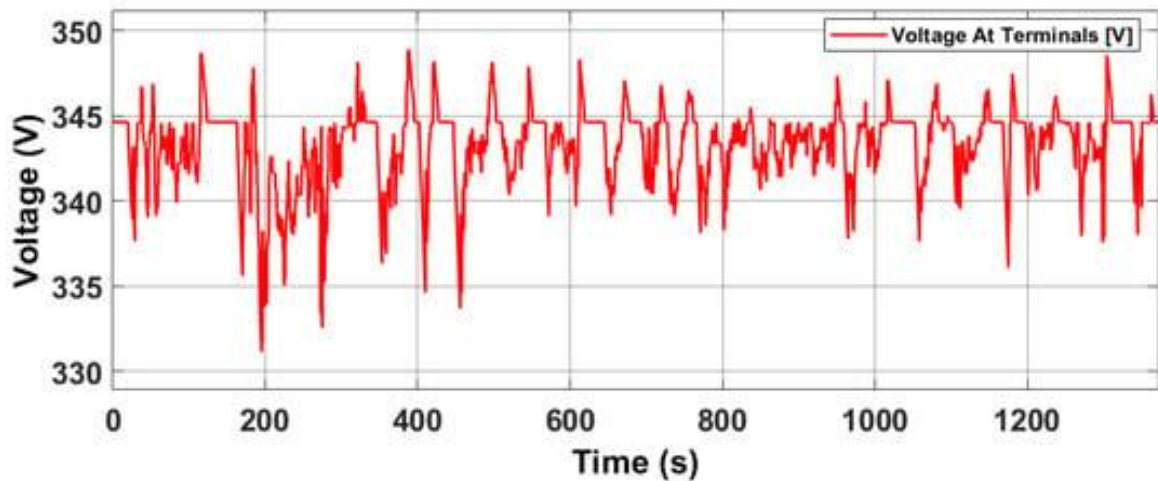


Рисунок 2.16. – Зміна напруги батареї (цикл UDDS)

На рисунку 2.17 показано зміну струму батареї протягом маршруту. Середній необхідний струм становить 50A; струм пропорційний швидкості, і якщо швидкість збільшується, потрібно більше струму. На рисунку 2.18 показано порівняння зміни швидкості та зміни заряду акумулятора. Видно, що зміни швидкості пропорційні потужності акумулятора. Таблиця 2.2 показує енергетичні результати EV з використанням методу, запропонованого для циклу UDDS; на відстані приблизно 12 км акумулятор розрядився майже на 25%.

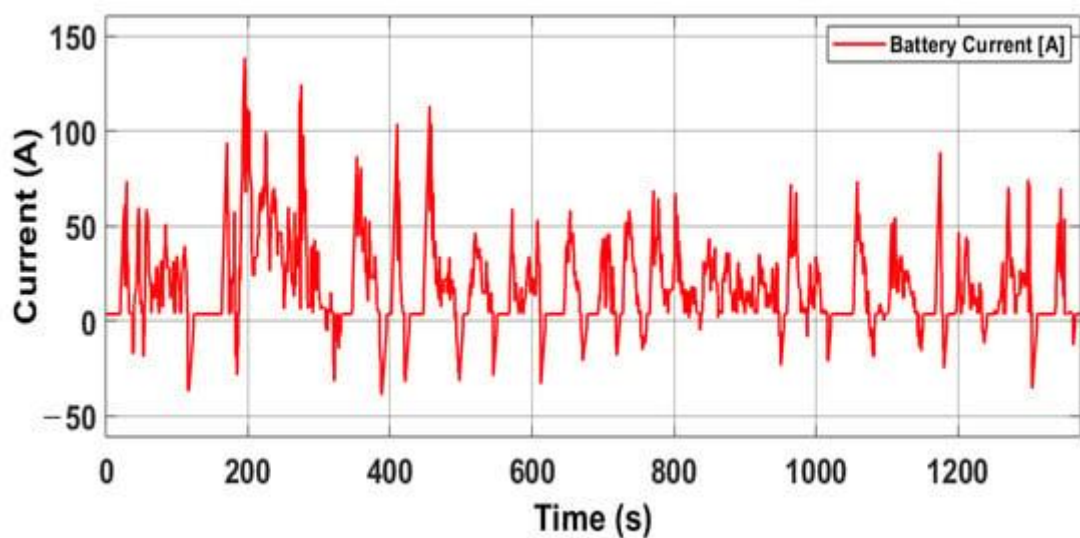


Рисунок 2.17. – Зміна струму батареї (цикл UDDS)

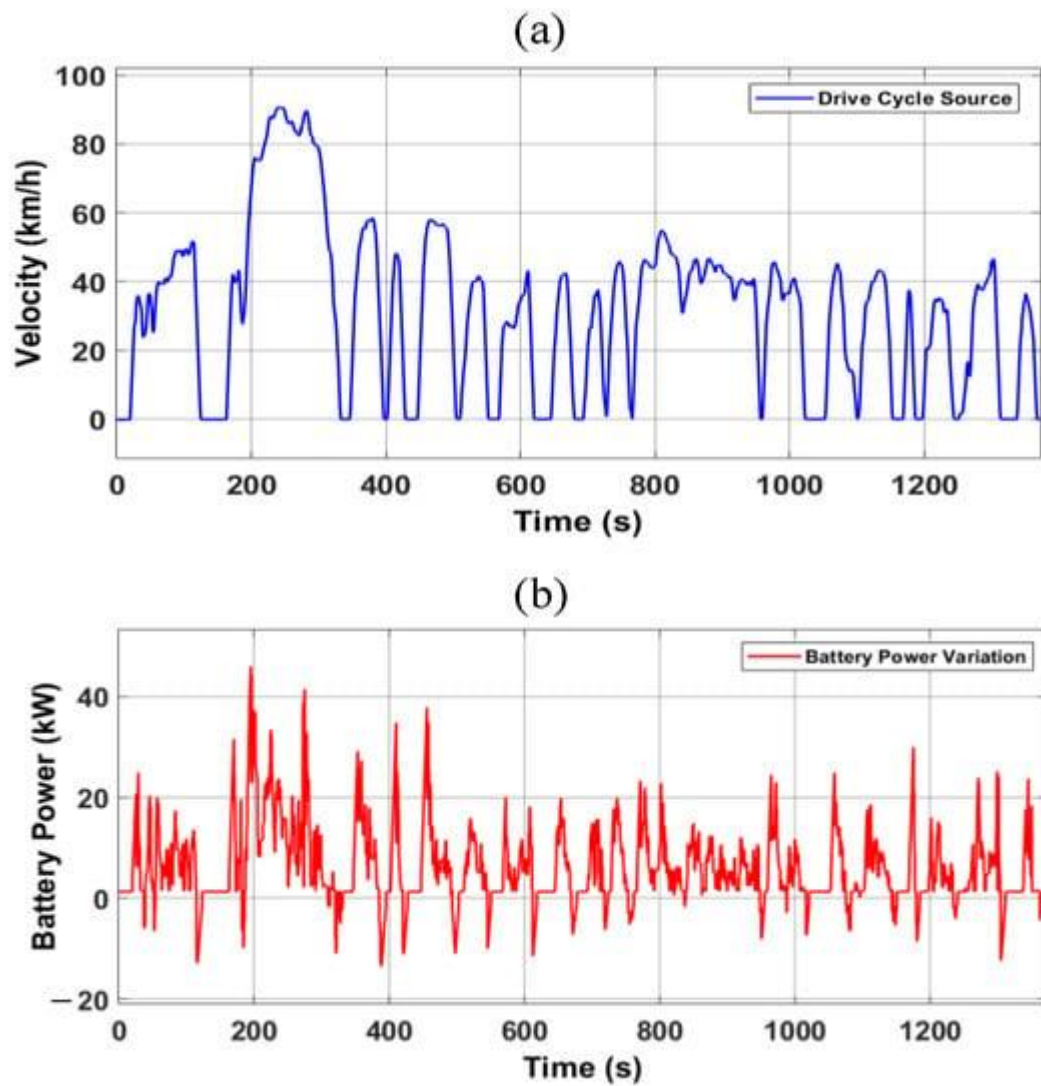


Рисунок 2.18. – Зміна заряду батареї залежно від швидкості автомобіля (цикл UDDS), (а) швидкість EV і (b) потужність батареї EV

Таблиця 2.2. Енергетичний аналіз EV

Параметр	Цикл UDDS
Відстань	11,99 км
SOC в кінці циклу	74,3%
Споживана енергія	2209 кВт/год
Втрата потужності в електродвигуні	0,429 кВт/год
Втрата потужності передачі	0,221 кВт/год
Втрата заряду батареї	0,0324 кВт/год

Безсумнівно, це метод, який використовується багатьма дослідженнями для моделювання та імітації EV для оцінки зарядки та розрядки протягом циклу водіння. Це дослідження зосереджено на процесі розробки моделі в цілому, а не на розробці кожного компонента в його комплексній формі, як у посиланні [55], де електродвигуни розроблені та проаналізовані для застосування в електромобілів, що підключаються до електромережі, або [71, 72], де рекуперативне гальмо вивчається та моделюється. Подібним чином у дослідженні [73], автори моделюють інші додаткові та важливі компоненти, такі як перетворювач DC/DC та інвертор. Зрозумівши процес передового моделювання, можна включити його в інтегральний ланцюжок моделювання, замінивши основні компоненти, включаючи системи керування енергією, шляхом аналізу впливу температури на накопичення енергії системою [74]; Таким чином, можна буде отримати більш точні та реалістичні оцінки.

Багатотільний моделювання транспортного засобу в фактичній літературі нехтується, не забезпечуючи великої різниці порівняно з поздовжнім моделюванням при оцінці споживання енергії. Багатотільне моделювання транспортного засобу залежить від результатів, які потрібні; з іншого боку, це моделювання ідеально Підходить для аналізу динамічних характеристик кожного компонента (Підвіски, шасі та шин) і навіть для аналізу бічної поведінки системи рульового керування. Багатотільне моделювання включає підмоделі, які залежать від ступенів свободи, його моделювання набагато складніше. У посил. [67], автори аналізують модель з 94 ступенями свободи. Поздовжня динаміка є сприятливою для оцінки споживання енергії, оскільки вона може включати профіль нахилу разом із профілем швидкості, які є вхідними параметрами для моделі водія, а також може включати споживання допоміжних елементів EV, таких як електродвигуни для система рульового керування, кондиціонер, насоси та ін.

При порівнянні характеристик заднього і прямого методів виділяється особливість останнього, оскільки прискорення транспортного засобу виражається як функція положення акселератора, на відміну від зворотного

методу, де визначається сила, необхідна для прискорення автомобіля. тільки від циклу швидкості. З цієї причини прямий метод є більш складним і точним методом, який служить для розробки систем еко-водіння в реальному часі та еко-маршрутів, які можуть покращити енергоефективність для розширення дальності руху EV, як досліджено в [63]. Таблиця 2.3 порівнює автономність із симуляцією більш точної моделі з бібліотеки Matlab/Simulink, коригуючи вхідні значення Таблиці 2.1, а також із [34], посиланням, яке використовується для перевірки моделі.

Таблиця 2.3. – Порівняння з різними моделями електромобілів

Параметр	Розроблена модель	Модель Matlab	посилання [14]
Відстань	11,99 км	11,98 км	11,99 км
SOC в кінці циклу	74,3%	77,97%	75%
Споживана енергія	2209 кВт/год	2078 кВт/год	2145 кВт/год
Автономність	4,45 кВт/100 км	1,22 кВт/100 км	0,97 кВт/100 км

Модель, розроблена в цьому дослідженні, має більше споживання енергії на годину, ніж моделі Matlab і [34]. Ці моделі електромобілів (Matlab, посилання [34]) є більш складними та застосовують алгоритми керування трансмісії та керування енергією акумулятора; він включає такі компоненти, як BMS, датчики, рекуперативне гальмування тощо, що забезпечує більшу точність оцінки споживання енергії. Стан заряду батареї для моделі EV з бібліотеки matlab/simulink показано на рисунку 2.19 , а для моделі EV з [34] – на рисунку 2.20. Три моделі розроблено за одним і тим же методом (прямий), але існує велика різниця у споживанні енергії, особливо в моделі, розробленій у цьому дослідженні. Слід зазначити, що це дослідження зосереджено на висвітленні процесу розробки моделі електромобіля прямим методом, а не на розробці моделі, яка покращує автономію споживання. Для оцінки

автономності використовуються значення Агентства з охорони навколишнього середовища США (US EPA).

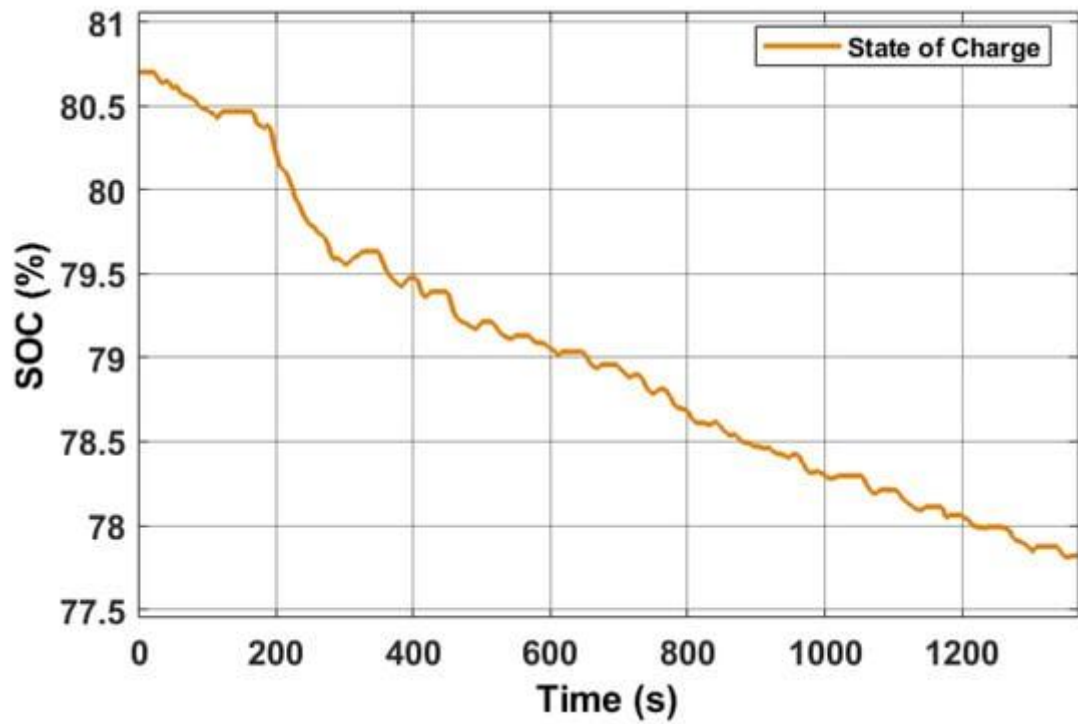


Рисунок 2.19. – Стан заряду батареї в кінці циклу приводу UDDS моделі EV з бібліотеки Matlab/Simulink

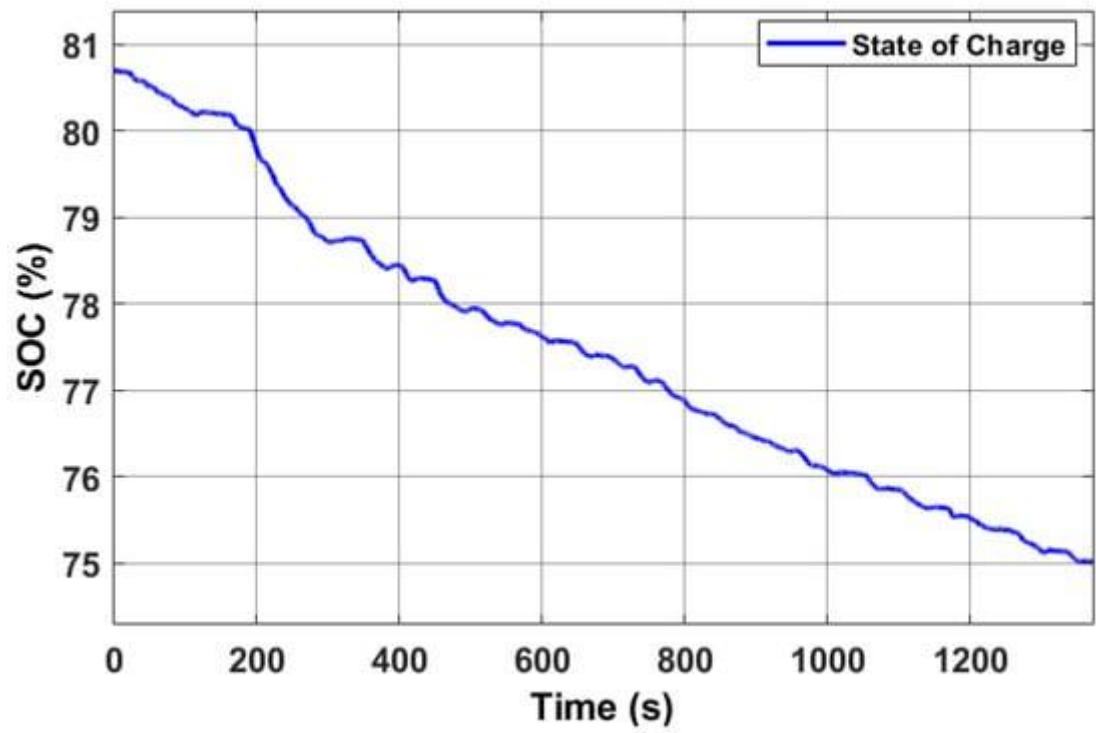


Рисунок 2.20. – Стан заряду батареї в кінці циклу їзди UDDS моделі EV

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Детальне дослідження моделювання та імітації EV представлено з огляду на прямий метод його розробки, PIDкресляючи внутрішні характеристики. Одним із аспектів, який явно відрізняється від зворотного методу, є модель водія, який діє як педаль прискорення та гальмування, щоб слідувати заданій цільовій швидкості. Моделювання драйвера може бути досягнуто різними контролерами: класичним PID, контролером розташування полюсів, лінійним квадратичним регулятором (LQR) і контролером на основі спостереження (OBS). LQR – один із контролерів, який найкраще регулює положення дросельної заслінки; тому його порівнюють із PID-регулятором, дивлячись на час відповіді на простий крок. Регулятор LQR покращує перерегулювання, тоді як правильне налаштування PID-регулятора зменшує час відгуку та стабілізації; для цього дослідження використовується PID-регулятор, результати якого не показують більшої похибки між цільовою швидкістю та реальною швидкістю транспортного засобу. Використання того чи іншого контролера залежить від необхідних результатів і типу автомобіля.

За результатами прямого методу можна оцінити енергоспоживання EV, а також втрати енергії в компонентах. У цьому конкретному випадку вхідні дані (табл. 2.2) були отримані в результаті виконання їздового циклу UDDS 1396 с із пройденою відстанню 11,99 км. SOC знизився з 80,7% до 74,3%, споживання енергії склало 2209 кВт·год і втрати енергії в деяких компонентах, таких як електродвигун – 0,429 кВт·год, трансмісія – 0,221 кВт·год і батарея – 0,0324 кВт·год.

Симуляцію також порівнювали з іншими більш точними моделями (Таблиця 2.3); одна з них була існуючою моделлю в бібліотеці Matlab (Powertrain Blockset версія 1.10), і ми також порівняли її з еталонною [14], яка використовує симулятор AUTONOMIE. Для всіх них коригуються однакові значення. З самого початку помітна різниця в автономії; модель, розроблена в цьому дослідженні, споживає більше енергії, маючи автономність 4,45 кВт·

год/100 км, а та, яка споживає найменше, це та, яка використовує симулятор AUTONOMIE, із споживанням 0,97 кВт-год/100 км.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

Енергетична безпека – комплексне поняття, яке включає в себе різні напрямки забезпечення енергетичної стабільності та стійкості.

В рамках магістреської роботи запропоновані матеріали та методи, включаючи математичне представлення компонентів за допомогою прямого методу, що дозволяють забезпечити моделювання електромобілів по багатьма критеріям, представлені приклади із результатами дослідження.

Майбутні дослідження можуть зосередитися на цих концепціях для розробки обчислювальних моделей на основі штучних нейронних мереж (ШНМ) для визначення зв'язків між низкою факторів, які впливають на енергоспоживання електромобілів залежно від вхідних факторів, де визначається вага для кожного фактора на основі його відносної важливості з використанням алгоритмів навчання. ШНМ також можна використовувати для прогнозування поведінки водіння шляхом класифікації моделей водіння за допомогою даних глобальної системи позиціонування, оскільки це надзвичайно важливий метод підходу, оскільки він керується даними та самоадаптується.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Конституція України: Конституція України; Верховна Рада України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР // База даних «Законодавство України» / 45 Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>.
2. Омельченко Володимир. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центр Разумкова. 2022. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pidchas-ta-pislya-viyny>.
3. Про Концепцію діяльності органів виконавчої влади у забезпеченні енергетичної безпеки України : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.01.1998 № 48 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/48-98-%D0%BF/>
4. Про нафту і газ : Закон України від 12.07.2001 № 2665-III URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2665-14>.
5. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; План, Заходи від 12.2021 № 1803-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1803-2021-%D1%80>.
6. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : Закон України від 22.09.2016 № 1540-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1540-19>.
7. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19>.
8. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція, План, Заходи від 14.10.2022 № 908-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/908-2022-%D1%80>
.

9. Про схвалення Плану розвитку системи передачі на 2021-2030 роки: Постанова; Нацком.енергетики, ком.послуг від 20.01.2021 № 57 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0057874-21>.
10. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, – 2001. – 398 с.
11. Енергетична безпека України: методологія системного аналізу та стратегічного планування : аналіт. доп. / [Суходоля О. М., Харазішвілі Ю. М., Бобро Д. Г., Сменковський А. Ю., Рябцев Г. Л., Завгородня С. П.] ; за заг. ред. О. М. Суходолі. – Київ : НІСД, 2020. – 178 с.
12. 36. Суходоля О. М. Стійкість функціонування енергетичної системи чи стійкість енергозабезпечення споживачів: постановка проблеми. Стратегічні пріоритети. 2018. № 2. С. 101–117.
13. Організаційні та правові аспекти забезпечення безпеки і стійкості критичної інфраструктури України / за ред. О. М. Суходолі. Київ : НІСД, 2019. 224 с.
14. Суходоля О. М. Енергетична безпека: оцінка стану, цілепокладання, загрози. Науковий часопис Академії національної безпеки. 2019. № 3–4. С. 30–63.
15. Суходоля О. М. Системний підхід в оцінюванні стану та цілепокладанні у сфері енергетичної безпеки. Стратегічна панорама. 2019. № 1–2. С. 57–71.
16. Суходоля О. М. Стратегічне управління в енергетичній сфері: проблеми та пріоритети вдосконалення. Стратегічні пріоритети. 2015. № 1 (34). С. 104–112.
17. Енергетична стратегія як інструмент політики енергетичної безпеки : зб. матер. наук.-практ. конф. / за ред. О. М. Суходолі. Київ : НІСД, 2015. 115 с.
18. О стратегическом планировании в Российской Федерации : Федеральный закон Российской Федерации от 28.06.2014 № 172-ФЗ. URL: <http://base.garant.ru/70684666/> (дата звернення: 24.01.2020).
19. Суходоля О. М. Геополітичні та економічні пріоритети забезпечення енергетичної безпеки України. Стратегічна панорама. 2017. № 1. С. 42–52.

20. Суходоля О. М. Забезпечення енергетичної безпеки та стійкості енергетики України: питання підготовки та перепідготовки персоналу підприємств паливно-енергетичного комплексу. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2017. № 2. С. 124–130.
21. Pettersson, P.; Jacobson, B.; Bruzelius, F.; Johannesson, P.; Fast, L. Intrinsic differences between backward and forward vehicle simulation models. IFAC PappersOnLine 2020, 53, 14292–14299. [Google Scholar] [CrossRef]
22. Ibrahim, A.; Jiang, F. The electric vehicle energy management: An overview of the energy system and related modeling and simulation. Renew. Sustain. Energy Rev. 2021, 144, 111049. [Google Scholar] [CrossRef]
23. Gao, D.W.; Mi, C.; Emandi, A. Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles. Proc. IEEE 2007, 95, 729–745. [Google Scholar] [CrossRef]
24. Li, H.; Xu, P.; Cao, C.; Hu, D.; Yan, X.; Song, Z. Acoustic Simulation of the Electric Vehicle Motor. J. Phys. Conf. Ser. 2021, 2095, 12031. [Google Scholar] [CrossRef]
25. Miranda, M.; Silva, F.; Lourenço, M.; Eckert, J.; Silva, L. Electric vehicle powertrain and fuzzy controller optimization using a planar dynamics simulation based on a real-world driving cycle. Energy 2022, 238, 121979. [Google Scholar] [CrossRef]
26. Aymen, F.; Alowaidi, M.; Bajaj, M.; Sharma, N.; Mishra, S.; Sharma, S.K. Electric Vehicle Model Based on Multiple Recharge System and a Particular Traction Motor Conception. IEEE Access 2021, 9, 49308–49324. [Google Scholar] [CrossRef]
27. Miri, I.; Fotouhi, A.; Ewin, N. Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study. Int. J. Energy Res. 2021, 45, 501–520. [Google Scholar] [CrossRef]
28. Adegbohun, F.; Von Jouanne, A.; Phillips, B.; Agamloh, E.; Yokochi, A. High Performance Electric Vehicle Powertrain Modeling, Simulation and Validation. Energies 2021, 14, 1493. [Google Scholar] [CrossRef]

29. Yaxin, G.; Yi, F. Transmission Parameter Matching and Simulation Verification of Pure Electric Vehicle. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 1965, 12015. [Google Scholar] [CrossRef]
30. Chen, L.; Li, Z.; Yang, J.; Song, Y. Lateral Stability Control of Four-Wheel-Drive Electric Vehicle Based on Coordinated Control of Torque Distribution and ESP Differential Braking. *Actuators* 2021, 10, 135. [Google Scholar] [CrossRef]
31. Wipke, K.B.; Cuddy, M.R.; Burch, S.D. ADVISOR 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 1999, 48, 1751–1761. [Google Scholar] [CrossRef]
32. Kim, N.; Douba, M.; Kim, N.; Rousseau, A. Validation Volt PHEV Model with dynamometer test data using Autonomie. *SAE Int. J. Passeng. Cars Mech. Syst.* 2013, 6, 985–992. [Google Scholar] [CrossRef]
33. Lewis, A.M.; Kelly, J.C.; Keoleian, G.A. Vehicle lightweighting vs. electrification: Life cycle energy and GHC emissions results for diverse powertrain vehicles. *Appl. Energy* 2014, 126, 13–20. [Google Scholar] [CrossRef]
34. Lee, D.; Rousseau, A.; Rask, E. Development and Validation of the Ford Focus Battery Electric vehicle model. *SAE Tech. Pap.* 2014, 1, 1–9. [Google Scholar] [CrossRef]
35. Hou, J.; Guo, X. Modeling and Simulation of hybrid electric vehicles using HEVSIM and ADVISOR. In *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin, China, 3–5 September 2008. [Google Scholar] [CrossRef]
36. Jiang, C.D.; Cheng, L.; Fengchun, S. Study on forward simulation model for extended-range electric bus. In *Proceedings of the Third World Congress on Software Engineering*, Wuhan, China, 6–8 November 2012. [Google Scholar] [CrossRef]
37. He, Y.; Rios, J.; Chowdhury, M.; Pisu, P.; Bhavsar, P. Forward powertrain energy management modeling for assessing benefits of integrating predictive traffic data

- into plug-in-hybrid electric vehicles. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2012, 17, 201–207. [Google Scholar] [CrossRef]
38. Lin, C.; Filipi, Z.; Wang, Y.; Louca, L.; Peng, H.; Assanis, D.; Stein, J. Integrated, Feed-Forward Hybrid Electric Vehicle Simulation in SIMULINK and its Use for Power Management Studies. *SAE Tech. Pap.* 2002, 1, 1–15. [Google Scholar] [CrossRef]
 39. Qin, D.; Deng, T.; Yang, Y.; Lin, Z. Regenerative braking simulation research for CVT hybrid electric vehicle with ISG based on forward modeling. *Electr. Eng.* 2008, 19, 618–624. [Google Scholar]
 40. Delavaux, M.; Lhomme, W.; Mcgordon, A. Comparison between Forward and Backward approaches for the simulation of an Electric Vehicle. In *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Lille, France, 3–5 September 2010. [Google Scholar]
 41. Mohan, G.; Assadian, F.; Longo, S. Comparative analysis of forward-facing models vs. backward-facing models in powertrain component sizing. In *Proceedings of the IET Hybrid and Electric Vehicles Conference*, London, UK, 6–7 November 2013. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
 42. Zhao, X.; Zhao, X.; Yu, Q.; Ye, Y.; Yu, M. Development of a representative urban driving cycle construction methodology for electric vehicles: A case study in Xi'an. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2020, 81, 102279–102301. [Google Scholar] [CrossRef]
 43. Kurnia, J.C.; Sasmito, A.P.; Shamim, T. Performance evaluation of a PEM fuel cell stack with variable inlet flows under simulated driving cycle conditions. *Appl. Energy* 2017, 206, 751–764. [Google Scholar] [CrossRef]
 44. Seers, P.; Nachin, G.; Glaus, M. Development of two driving cycles for utility vehicles. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2015, 41, 377–385. [Google Scholar] [CrossRef]
 45. Yuhui, P.; Yuan, Z.; Huibao, Y. Development of a representative driving cycle of urban buses based on the K-means cluster method. *Clust. Comput.* 2019, 22, 6871–6880. [Google Scholar] [CrossRef]

46. Ye, K.; Li, P.; Li, H. Optimization of hybrid energy storage system control strategy for pure electric vehicle based on typical driving cycle. *Math. Probl. Eng.* 2020, 2020, 1365195–1365207. [Google Scholar] [CrossRef]
47. Kiyakli, A.O.; Solmaz, H. Modeling of an electric vehicle with Matlab/Simulink. *Int. J. Automot. Sci. Technol.* 2019, 2, 9–15. [Google Scholar] [CrossRef]
48. Ali, R.; Furqan, A.; Ho, K.S. Design of fuzzy logic tuned PID controller for electric vehicle based on IPMSM using Fluxweakening. *J. Electr. Eng. Technol.* 2018, 13, 451–459. [Google Scholar] [CrossRef]
49. Saeed, M.; Ahmed, N.; Hussain, M.; Jafar, A. A comparative study of controllers for optimal speed control of hybrid electric vehicle. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems Engineering*, Islamabad, Pakistan, 15–17 January 2016. [Google Scholar] [CrossRef]
50. Heidari, A.; Etedali, S.; Javaheri-Tafti, M. A hybrid LQR-PID control design for seismic control of buildings equipped with ATMD. *Front. Struct. Civ. Eng.* 2018, 12, 44–57. [Google Scholar] [CrossRef]
51. Ma, Z. Parameters design for a parallel hybrid electric bus using regenerative brake model. *Adv. Mech. Eng.* 2014, 6, 760815–760824. [Google Scholar] [CrossRef]
52. Bin Peeie, H.M.; Ogino, H.; Oshinoya, Y. Skid control of a small electric vehicle with two in-wheel motors: Simulation model of ABS and regenerative brake control. *Int. J. Crasheorthiness* 2016, 21, 396–406. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
53. Liu, Z.; Ortmann, W.J.; Nefcy, B.; Colvin, D.; Connolly, F. Methods of measuring regenerative braking efficiency in a test cycle. *SAE Int. J. Altern. Powertrains* 2017, 6, 103–112. [Google Scholar] [CrossRef]
54. Zhu, Y.; Wu, H.; Zhen, C. Regenerative braking control under sliding braking condition of electric vehicles with switched reluctance motor drive system. *Energy* 2021, 230, 120901. [Google Scholar] [CrossRef]
55. Yilmaz, M. Limitations/capabilities of a electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric

- vehicle applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 52, 80–99. [Google Scholar] [CrossRef]
56. Park, G.; Lee, S.; Jin, S.; Kwak, S. Integrated modeling and analysis of dynamics for electric vehicle powertrains. *Expert Syst. Appl.* 2014, 41, 2595–2607. [Google Scholar] [CrossRef]
 57. Fajri, P.; Lee, S.; Prabhala, V.A.; Ferdowsi, M. Modeling and Integration of electric vehicle regenerative and friction braking for motor/dynamometer test bench emulation. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2016, 65, 4264–4273. [Google Scholar] [CrossRef]
 58. Wang, Y.; Tian, J.; Sun, Z.; Wang, L.; Xu, R.; Li, M.; Chen, Z. A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, 131, 100015–110033. [Google Scholar] [CrossRef]
 59. Meng, J.; Luo, G.; Ricco, M.; Swierczynski, M.; Stroe, D.I.; Teodorescu, R. Overview of lithium-ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles. *Appl. Sci.* 2018, 8, 659. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
 60. Seaman, A.; Dao, T.S.; McPhee, J. A survey of mathematics based equivalent circuit and electrochemical battery models for hybrid and electric vehicle simulation. *J. Power Sources* 2014, 256, 410–423. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
 61. Li, J.; Wang, D.; Deng, L.; Cui, Z.; Lyu, C.; Wang, L.; Pecht, M. Aging modes analysis and physical parameter identification based on a simplified electrochemical model for lithium-ion batteries. *J. Energy Storage* 2020, 31, 101538–101551. [Google Scholar] [CrossRef]
 62. Choi, W.; Shin, H.C.; Kim, H.C.; Choi, J.Y.; Yoon, W.S. Modeling and applications of electrochemical impedance spectroscopy (Eis) for lithium-ion batteries. *J. Electrochem. Sci. Technol.* 2020, 11, 1–13. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]

63. Abdollahi, A.; Han, X.; Raghunathan, N.; Pattipati, B.; Balasingam, B.; Pattipati, K.R.; Bar-Shalom, Y.; Card, B. Optimal charging for general equivalent electrical battery model and battery life management. *J. Energy Storage* 2017, 9, 47–58. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
64. Da Lio, M.; Bortoluzzi, D.; Pietro Rosati Papini, G. Modeling longitudinal vehicle dynamics with neural networks. *Veh. Syst. Dyn.* 2020, 58, 1675–1693. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
65. Esmailzadeh, E.; Vossoughi, C.R.; Goodarzi, A. Dynamic modeling and analysis of a four motorized wheels electric vehicle. *Veh. Syst. Dyn.* 2001, 35, 163–194. [Google Scholar] [CrossRef]
66. Juhala, M. Improving vehicle rolling resistance and aerodynamics. In *Alternative Fuels and Advances Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*; Folkson, R., Ed.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2014; pp. 462–475. [Google Scholar]
67. Hegazy, S.; Rahnejat, H.; Hussain, K. Multi-body dynamics in full vehicle handling analysis. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part K. J. Multi-Body Dyn.* 1999, 213, 19–31. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
68. Blundell, M.; Harty, D. *The Multibody System Approach to Vehicle Dynamics*, 2nd ed.; Elsevier Butterworth Heinemann: New York, NY, USA, 2004; Volume 1, pp. 30–160. [Google Scholar]
69. Lo, R.; Massaro, M.A. Symbolic approach to the multibody modeling of road vehicles. *Int. J. Appl. Mech.* 2017, 9, 17500685. [Google Scholar] [CrossRef]
70. Milliken, M.F.; Milliken, D.L. *Race Car Vehicle Dynamic*, 2nd ed.; Society of Automotive Engineers: Warrendale, PA, USA, 1994. [Google Scholar]
71. Wang, J.; Qiao, J.; Qi, Z. Research on control strategy of regenerative braking and anti-lock braking system for electric vehicle. In *Proceedings of the World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, Barcelona, Spain, 1–7 November 2013. [Google Scholar] [CrossRef]

72. Yu, C.; Shim, T. Modeling of comprehensive electric drive system for a study of regenerative brake system. In Proceedings of the American Control Conference, Washington, DC, USA, 17–19 June 2013. [Google Scholar] [CrossRef]
73. Moreno, P.; Blanco, M.; Lafoz, M.; Arribas, J.R. Educational Project for the teaching of control of electric traction drives. *Energies* 2015, 8, 921–938. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]
74. Rahimirad, P.; Masih-Tehrani, M.; Dahmardeh, M. Battery life investigation of a hybrid energy management system considering battery temperature effect. *Int. J. Automot. Eng.* 2019, 9, 2966–2976. [Google Scholar]