

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ С. М. Ковбаса
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі на здобуття ступеня магістра
за освітньо-науковою програмою «Електромеханічні системи
автоматизації, електропривод та електромобільність»
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

на тему: Електромеханічна система електромобіля на базі синхронного двигуна з
постійними магнітами

Виконав: студент II курсу, групи ЕП-11мп
(шифр групи)

_____ Гузенко Петро Віталійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник зав. каф., д.т.н. Ковбаса Сергій Миколайович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент доц., к.т.н. Чумак Вадим Володимирович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2022 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	1	
2	A4	141.8107.001.МД	Пояснювальна записка	153	
3	A1	141.8107.001.МД	Вибір двигуна та тягової батареї	1	
4	A1	141.8107.001.МД	Структурна схема моделі двигуна та алгоритму керування	1	
5	A1	141.8107.001.МД	Моделювання ЕМС та експлуатаційні характеристики ТЗ	1	
6	A1	141.8107.001.МД	Функціональна схема синхронного електроприводу	1	
7	A1	141.8107.001.МД	Схема електрична принципова силової частини перетворювача	1	
8	A1	141.8107.001.МД	Схема електрична принципова керуючого контролера	1	
				141.8107.001.МД	
		ПІБ	Підп.	Дата	
Розробн.	Гузенко П.В.			Відомість дипломного проекту	Арк.
Керівн.	Ковбаса С.М.				2
Консульт.					Аркушів
Н/контр.					153
Зав.каф.	Ковбаса С.М.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-п81

Пояснювальна записка

до дипломного проекту

на тему: «Електромеханічна система електромобіля на базі синхронного
двигуна з постійними магнітами»

Київ – 2022 р.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма – «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

«__» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Гузенку Петру Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Електромеханічна система електромобіля на базі синхронного двигуна з постійними магнітами»,

науковий керівник дисертації доцент, д.т.н., Ковбаса Сергій Миколайович,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження автомобіль Renault Logan

4. Вихідні дані максимальна маса автомобіля $m_{\max} = 1491$ кг, довжина автомобіля $B = 4.346$ м, ширина автомобіля зі складеними дзеркалами заднього огляду $L1 = 1.733$ м, висота автомобіля $H = 1.517$ м, загальне передатне число V -ої передачі $GR_V = 3.81$, діаметр колеса $d_k = 0.63$ м, максимальна лінійна швидкість автомобіля $V_{\max} = 158$ км/год, розгін до 100 км/год $t_{100} = 15.1$ с

5. Зміст пояснювальної записки: Вступ. 1. Аналітичний огляд. 2. Розрахунок основних параметрів електромеханічної системи електричного транспортного засобу та вибір основних її елементів. 3. Розробка системи векторного керування координатами приводного двигуна транспортного засобу. 4. Дослідження електромеханічної системи методом математичного моделювання та визначення основних експлуатаційних характеристик транспортного засобу. 5. Розробка схеми електричної принципової силової частини та керуючого контролера 6. Розрахунок вартості проекту та визначення періоду окупності. 7. Розроблення стартап-проекту. Загальні висновки.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Вибір двигуна та тягової батареї (A1), структурна схема моделі двигуна та алгоритму керування (A1), моделювання ЕМС та експлуатаційні характеристики ТЗ (A1), функціональна схема синхронного електроприводу (A1), схема електрична принципова силової частини перетворювача (A1), схема електрична принципова керуючого контролера (A1)

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналітичний огляд	30.09.22	
2	Розрахунок основних параметрів електромеханічної системи електричного транспортного засобу та вибір основних її елементів (АКБ, дослідження можливості застосування СК, двигун).	10.11.22	
3	Розробка системи векторного керування координатами приводного двигуна транспортного засобу	15.11.22	
4	Дослідження електромеханічної системи методом математичного моделювання та визначення основних експлуатаційних характеристик транспортного засобу	20.11.22	
5	Розробка схеми електричної принципової силової частини та керуючого контролера	30.11.22	
6	Розробка старт-ап проекту. Розрахувати термін окупності у випадку переробки традиційного автомобіля на електричну версію. Проаналізувати можливих споживачів, обсяг інвестицій для налаштування виробництва, способи просування продукції на ринок.	10.12.22	
7	Написання вступу, висновків по роботі, оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу.	14.12.22	
8	Подання роботи на перевірку	14.12.22	

Студент

(підпис)

Петро ГУЗЕНКО

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Сергій КОВБАСА

РЕФЕРАТ

Магістерська робота містить сторінок – 153, рисунків – 52, таблиць – 34 і графічну частину на 6 плакатах формату А1. Структура магістерської дисертації має наступні розділи:

1. Аналітичний огляд
2. Розрахунок основних параметрів електромеханічної системи
3. Розробка системи векторного керування
4. Дослідження електромеханічної системи методом математичного моделювання та визначення експлуатаційних характеристик
5. Розробка схеми електричної принципової силової частини та керуючого контролера
6. Розроблення стартап-проекту

Метою дослідження є розробка електромеханічної системи електромобіля на базі транспортного засобу з двигуном внутрішнього згорання для впровадження в широкі маси.

Результати дослідження можуть бути використані при модернізації існуючих автомобілів, що використовують двигуни внутрішнього згорання.

ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, RENAULT LOGAN, ТАХОГРАМА РУХУ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ, ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ, ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, СУПЕРКОНДЕНСАТОР, ЕЛЕКТРОПРИВОД, СИНХРОННИЙ ДВИГУН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ІНВЕРТОР, EMRAX 268, LIFEP04, TMS320F280021

					14.1.8107.001.МД				
					Електромеханічна система електромобіля на базі синхронного двигуна з постійними магнітами Реферат	Літ		Маса	Масштаб
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		T			
Розроб.	Гуценко П.В.								
Перевір.	Ковбаса С.М.								
						Арк. 7		Архів 153	
Н. контр.	Ковбаса С.М.					КПІ ім. Ізгоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-п81			
Затверд.	Пересада С.М.								

ABSTRACT

The master's dissertation contains 153 pages, 52 drawings, 34 tables and a graphic part on 6 posters of A1 format. The structure of the master's dissertation has the following sections:

1. Analytical review
2. Calculation of the main parameters of the electromechanical system
3. Development of a vector control system
4. Modeling of the electromechanical system and determination of operational characteristics of the electric vehicle
5. Development power circuit and a controller circuit schemed.
6. Development of a startup project

The aim of the work is to develop an electromechanical system of an electric vehicle based on internal combustion engine for introduction into the masses.

The results of the research can be used in the modernization of existing cars using internal combustion engines.

ELECTRIC VEHICLE, RENAULT LOGAN, DRIVING CYCLE, VECTOR CONTROL, TORQUE CONTROL, VEHICLE, INTERNAL COMBUSTION ENGINE, BATTERY, SUPERCAPACITOR, ELECTRIC DRIVE, PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR, MICROCONTROLLER, INVERTER, EMRAX 268, LIFEPO4, TMS320F280021

					14.1.8107.0001.МД									
					Електромеханічна система електромобіля на базі синхронного двигуна з постійними магнітами Реферат					Літ.		Маса.	Масштаб	
Зм.	Вис	№ докум.		Підпис						Дата				
Розроб.	Гузенко П.В.										T			
Перевір.	Ковбаса С.М.													
						Арк. 8		Аркциів 153						
Н. контр.	Ковбаса С.М.					КПІ ім. Ізгоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-п81								
Затверд.	Пересада С.М.													

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	12
ВСТУП.....	17
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	20
1.1 Електромобільність: основні відомості.....	20
1.2 Сучасний стан і тенденції в електромобільності.....	24
1.3 Використання синхронних двигунів з постійними магнітами в електромобілях.....	27
Висновки до розділу.....	31
2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ.....	32
2.1 Розрахунок та вибір електродвигуна.....	33
2.1.1 Розрахунок електродвигуна.....	33
2.1.2 Вибір електродвигуна.....	40
2.2 Розрахунок та вибір тягової акумуляторної батареї.....	43
2.3 Розрахунок та вибір суперконденсаторів.....	46
Висновки до розділу.....	48
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ КООРДИНАТАМИ ПРИВОДНОГО ДВИГУНА ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ.....	50
Висновки до розділу.....	61
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ.....	62

4.1	Дослідження системи при заданні максимально-допустимого моменту двигуна.....	63
4.2	Дослідження системи при заданні номінального моменту двигуна	66
4.3	Визначення експлуатаційних характеристик транспортного засобу.....	68
	Висновки до розділу.....	72
5	РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ТА КЕРУЮЧОГО КОНТРОЛЕРА.....	73
5.1	Розробка функціональної схеми електромеханічної системи транспортного засобу.....	73
5.2	Розрахунок та вибір основних елементів силової частини.....	76
5.2.1	Вибір варистора.....	76
5.2.2	Розрахунок зарядного кола.....	76
5.2.3	Розрахунок заряду конденсаторного фільтру.....	79
5.2.4	Розрахунок та вибір автономного інвертора.....	81
5.2.5	Вибір давачів струму та напруги.....	83
5.2.6	Вибір енкодера.....	85
5.2.7	Вибір запобіжника.....	86
5.2.8	Вибір педалі.....	86
5.3	Розробка керуючої частини контролера.....	87
5.3.1	Вибір керуючого контролера.....	87
5.3.2	Вибір мікросхеми пам'яті.....	88
5.3.3	Вибір годинника реального часу.....	89
5.3.4	Вибір USB- та CAN-інтерфейсів.....	90
5.3.5	Розрахунок схем узгодження аналогових сигналів від давачів.....	91
5.3.6	Вибір мікросхем буферів для вхідних/вихідних сигналів....	93
5.3.7	Розробка блоку живлення.....	94
	Висновки до розділу.....	100

6	РОЗРАХУНОК ВАРТОСТІ ПРОЕКТУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДУ ОКУПНОСТІ.....	102
6.1	Перелік елементів проекту та загальна вартість.....	102
6.2	Визначення періоду окупності проекту.....	106
	Висновки до розділу.....	107
7	РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	108
7.1	Початковий етап стартап-проекту.....	108
7.2	Технологічний аудит ідеї проекту.....	110
7.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	111
7.4	Розроблення ринкової стратегії проекту.....	119
7.5	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	122
	Висновки до розділу.....	126
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	128
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	130
	ДОДАТКИ.....	143

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

BEV – Battery Electric Vehicle; повністю електричний транспортний засіб.

BSD – Belt-alternator starter generator; ремінний стартер генератор.

CAN – Controller Area Network; локальна мережа контролерів, він же CAN-Bus і Інтерфейс CAN.

DoH – Degree of hybridization; ступень гібридизації.

DSP – digital signal processor; цифровий сигнальний процесор.

ER-EV – Extended-range Electric Vehicle; електромобіль з підвищеним запасом ходу.

EV – Electric Vehicle; електромобіль.

FCEV – Fuel Cell Electric Vehicles; електромобіль на паливних елементах.

HEV – Hybrid Electric Vehicle; гібрид.

IGBT – Insulated-gate bipolar transistor; біполярний транзистор із ізольованим затвором.

IPM – Intelligent Power Module – інтелектуальний силовий модуль.

ISG – Integrated Starter Generator інтегрований стартер-генератор.

PHEV – Plug-In Hybrid Electric Vehicle; гібриди, здатні підключатися до мережі.

SPI – Serial Peripheral Interface; послідовний периферійний інтерфейс, шина SPI.

UART – Universal asynchronous receiver/transmitter; універсальний асинхронний приймач/передавач

USB – Universal Serial Bus: універсальна послідовна шина.

АКБ – акумуляторна батарея.

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання.

ЕД – електричний двигун.

ЕРС – електрорушійна сила.

ЄС – європейський союз.

ККД – коефіцієнт корисної дії.

ПК – персональний комп'ютер.

СД – синхронний двигун.

СДПМ – синхронний двигун з постійними магнітами.

ТЗ – транспортний засіб.

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

$\tilde{i}_{ld}$, $\tilde{i}_{lq}$ – похибки відпрацювання компонент i_{ld} i_{lq} і струму статора.

$\tilde{M}$ – похибка відпрацювання моменту.

$\tilde{\psi}$ – похибка відпрацювання потокозчеплення.

(a-b), (d-q) – позначення стаціонарної системи координат, нерухомої відносно статора асинхронного двигуна та синхронно-обертальної системи координат.

a – величина прискорення електромобіля.

A_f – площа фронтального перерізу електромобіля;

B – довжина автомобіля.

C_{BAT} – ємність батареї.

C_D – коефіцієнт аеродинамічного супротиву;

C_{SC} – ємність суперконденсатора.

C_ϕ – ємність фільтра.

d_k – діаметр колеса.

$e^{-j p_n \theta}$, $e^{j p_n \theta}$ – матриці перетворення.

F_{aero} – сила аеродинамічного опору.

F_{fr} – сила опору тертя-кочення.

F_{mg} – сила тяжіння.

f_r – коефіцієнт тертя-кочення.

F_{TR} – тягове зусилля двигуна.

g – прискорення вільного падіння.

GR_V – загальне передатне число V-ої передачі.

H – висота автомобіля.

i_{ld}^* , i_{lq}^* – задані значення компонент i_{ld} i_{lq} і струму статора.

i_a, i_b – компоненти вектора струму статора в системі координат (a-b).

I_{BAT} – струм, який протікає в батареї протягом однієї години.

i_d, i_q – компоненти вектора струму статора в системі координат (d-q).

I_{dc} – струм в ланці постійного струму.

i_f – струм фіктивного джерела струму, що схематизує дію постійних магнітів.

i_p – коефіцієнт передачі між двигуном і колесом.

J – момент інерції.

$k_{id1}, k_{iid}, k_{iq1}, k_{iiq}$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів компонент струму статора i_{1d} та i_{1q} .

k_M – коефіцієнт моменту.

$K_{мшт6}$ – коефіцієнт масштабування.

L_1 – індуктивність статорної обмотки.

$L1$ – ширина автомобіля зі складеними дзеркалами заднього огляду.

L_m – індуктивність контуру намагнічування.

$L_m i_f$ – магнітний потік від постійних магнітів.

M – момент двигуна.

M^* – заданий момент двигуна.

m_{max} – максимальна маса автомобіля.

M_{max} – максимальний момент навантаження двигуна згідно driving cycle.

$m_{SC \Sigma}$ – сумарна маса суперконденсаторної батареї.

m_{AKB} – сумарна маса АКБ.

$M_{дв}$ – момент двигуна.

M_k – момент колеса.

M_c – момент навантаження.

N_{CELL} – кількість послідовних комірок АКБ.

N_{SC} – кількість послідовних суперконденсаторів.

N_{Σ} – сумарна кількість комірок АКБ (суперконденсаторів).

N_I – кількість паралельних гілок АКБ (суперконденсаторів).

P – нормальне навантаження, що діє на центр кочення.

P_{BAT} – потужність батареї.

p_n – кількість пар полюсів двигуна.

p_n – число пар полюсів.

$P_{\text{дв мех}}$ – механічна потужність двигуна.

$P_{\text{мех}}$ – механічна потужність.

$Q_{\text{SC } \Sigma}$ – загальний вартість суперконденсаторної батареї.

$Q_{\text{АКБ}}$ – загальний вартість АКБ.

R_1 – активний опір статора двигуна.

R_1 - активний опір статора.

r_k – радіус колеса.

S – шлях, що пройшов електромобіль.

S_{1000s} – шлях, який пройшов електромобіль за 1000 с.

S_{max} – максимальний пробіг від батареї.

t_{100} – час розгону до 100 км/год.

t_{max} – час, який можна проїхати на одному заряді АКБ.

u_a, u_b – компоненти вектора напруги статора в системі координат (a-b).

U_{BAT} – напруга батареї.

u_d, u_q – компоненти вектора напруги статора в системі координат (d-q).

U_{dc} – напруга ланки постійного струму.

$U_{\text{m max}}$ – значення максимального значення модуля напруги, яку видає інвертор.

U_{SC} – напруга суперконденсатора.

$U_{\text{кл}}$ – така напруга, коли струм через варистор 1мА.

$U_{\text{л ном}}$ – лінійна номінальна напруга статора двигуна.

$U_{\text{ф}}$ – напруга фільтра.

V – швидкість електромобіля;

v_d, v_q – керуючі дії регуляторів компонент струму статора i_{1d} та i_{1q} .

V_{max} – максимальна лінійна швидкість автомобіля.

$V_{\text{SC } \Sigma}$ – загальний об'єм суперконденсаторної батареї.

V_w – сила вітру.

$V_{\text{АКБ}}$ – загальний об'єм АКБ.

W_1 – кількість спожитої енергії з врахуванням рекуперації.

W_2 – кількість спожитої енергії без врахування рекуперації.

W_{BAT} – енергія батареї.

W_s – необхідна кількість енергії для АКБ.

W_{SC} – енергія, що накопичується в суперконденсаторі.

W_k – енергія, яку необхідно затратити, щоб автомобіль пройшов шлях S .

x_{CELL} – параметр x , який характеризує комірку акумуляторної батареї.

x_d, x_q – інтегральні складові регуляторів компонент струму статора i_{1d} та i_{1q} .

x_{SC} – параметр x , який характеризує суперконденсатор.

$x^{(d-q)} = e^{-j p_n \theta} x^{(a-b)}$
 $x^{(a-b)} = e^{j p_n \theta} x^{(d-q)}$ – перетворення Парка–Горєва.

x_{nom}^{db} – параметр x (макс. значення), що має характеризує параметр двигуна.

x_{nom}^{lb} – параметр x (ном. значення), що має характеризує параметр двигуна.

$x^{(d-q)} = e^{-j p_n \theta} x^{(a-b)}$, $x^{(a-b)} = e^{j p_n \theta} x^{(d-q)}$ - перетворення Парка–Горєва.

α – кут нахилу поверхні.

η_{inv} – ККД інвертора.

$\eta_{дв}$ – ККД двигуна.

η_p – ККД редуктора.

θ – кутове положення ротора відносно статора.

ρ – густина повітря, при $t = 0^\circ C$.

ρ – радіус інерції.

ν – коефіцієнт в'язкого тертя.

ψ^* – задане значення модуля потокозчеплення ротора.

ψ_a, ψ_b – компоненти вектора потокозчеплення ротора в системі координат $(a-b)$.

ψ_d, ψ_q – компоненти вектора потокозчеплення ротора в системі координат $(d-q)$.

ω – кутова швидкість ротора відносно статора.

$\omega_{дв}$ – кутова швидкість двигуна.

ω_k – кутова швидкість колеса.

ω_{max} – максимальна кутова швидкість двигуна.

ВСТУП

Актуальність теми. Електрифікація особистих транспортних засобів є однією зі стратегій протидії глобальному потеплінню та залежності від викопного палива.

Автомобілі з дизельними двигунами вже заборонені в кількох великих містах, а ціни на паливо постійно зростають. Незважаючи на це, електромобілі мають довгі черги очікування, і вони все ще є преміум-класом, і не кожен може собі їх дозволити, як старішу машину з двигуном внутрішнього згорання. Це означає, що в найближчому майбутньому може виникнути прогалина, коли робітничий і середній класи не зможуть ані заправляти свої автомобілі, ані купувати електромобілі. Цю прогалину потрібно заповнити більш бюджетними альтернативами для пересування, де переобладнання транспортних засобів може бути вдалою стратегією.

Цей проект має намір дослідити можливості даного питання. Переобладнання автомобілів також сприяє переходу до більш циклічної економіки; замість того, щоб покладатися на споживання обмежених ресурсів для виробництва нових продуктів, тривалість життя існуючих продуктів максимально подовжується. Замість утилізації застарілих автомобілів з двигунами внутрішнього згорання та виробництва нових електромобілів цей проект використовує наявний автопарк і продовжує термін його служби, тому дане питання є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Питанню переведення на електротягу транспортних засобів присвячено чимало робіт, зокрема [1, 2, 3].

На кафедрі АЕМС-ЕП [4] активно розвивається напрямок електромобільності. Електромеханічні системи електричних транспортних засобів згадується в низці робіт. Переобладнання традиційних систем в електропривод описується у працях [5, 6].

Метою дослідження є розробка електромеханічної системи електромобіля на базі транспортного засобу з двигуном внутрішнього згорання для впровадження в широкі маси.

Для досягнення поставленої мети, необхідно вирішити наступні **завдання**:

- розглянути основні технічні характеристики обраного транспортного засобу та скласти тахограму руху, в результаті чого розрахувати основні дані, необхідні для вибору двигуна. Розрахувати тягову акумуляторну батарею, обчислити вагу, об'єм, вартість, масу, дослідити можливість застосування суперконденсаторів в якості джерела енергії в транспортному засобі;
- розробити систему керування координатами приводного двигуна електромобіля;
- дослідити електромеханічну систему методом математичного моделювання та визначити основні експлуатаційні характеристики транспортного засобу;
- розрахувати та здійснити вибір елементної бази силової частини та керуючого контролера, а також скласти відповідні схеми електричні принципові, розрахувати собівартість проекту;
- розробити стартап-проект ідеї: здійснити технологічний аудит, проаналізувати ринкові можливості запуску, розробити ринкову стратегію та маркетингову програму проекту.

Об'єкт дослідження – процес електрифікації автомобіля з традиційним двигуном внутрішнього згорання.

Предмет дослідження – електромеханічна система електромобіля.

Методи дослідження – в роботі використано методи теорії електропривода, теорії автоматичного керування, математичного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше для даної моделі автомобіля була розроблена електромеханічна система на основі електроприводу.

Практичне значення одержаних результатів проведеної розробки полягає у використанні при модернізації існуючих автомобілів, що побудовані на базі двигуна внутрішнього згорання.

Апробація результатів дисертації. Гузенко П.В., Ковбаса С.М. Розрахунок основних параметрів електромеханічної системи електричного транспортного засобу та вибір основних її елементів // Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2022.

ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, RENAULT LOGAN, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ, ДВЗ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, СУПЕРКОНДЕНСАТОР, ЕЛЕКТРОПРИВОД, СИНХРОННИЙ ДВИГУН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ, ELECTRIC VEHICLE, DRIVING CYCLE, PMSM, МІКРОКОНТРОЛЕР, TMS320F280021, EMRAX 268

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Електромобільність: основні відомості

Згідно зі звітом Європейського Союзу, транспортний сектор відповідальний за майже 28% загальних викидів вуглекислого газу (CO_2), тоді як автомобільний транспорт відповідає за понад 70% викидів транспортного сектору [8]. Тому влада більшості розвинених країн заохочує використання електромобілів (EV), щоб уникнути концентрації CO_2 , а також інших парникових газів. Зокрема, уряди країн запроваджують ініціативи так як: податкові пільги, більш просту процедуру купівлі та реєстрації електромобіля, безкоштовне громадське паркування та/або користування автомагістралями. В Канаді, Великій Британії, Китаї, Японії, Південній Кореї, Франції, Норвегії та інших країнах існують привілеї при покупці електромобілів (Додаток А) [9]. Тобто, можна сказати, що електромобільність в сучасному світі стрімко розвивається.

Електромобільність (англ. *electromobility, eMobility*) – це сукупність транспортних засобів, що частково або повністю живляться від електроенергії [10]. Сьогодні ми можемо зустріти різні типи електромобілів, залежно від технології двигунів. Загалом вони поділяються на п'ять типів (рис. 1.1) [11].

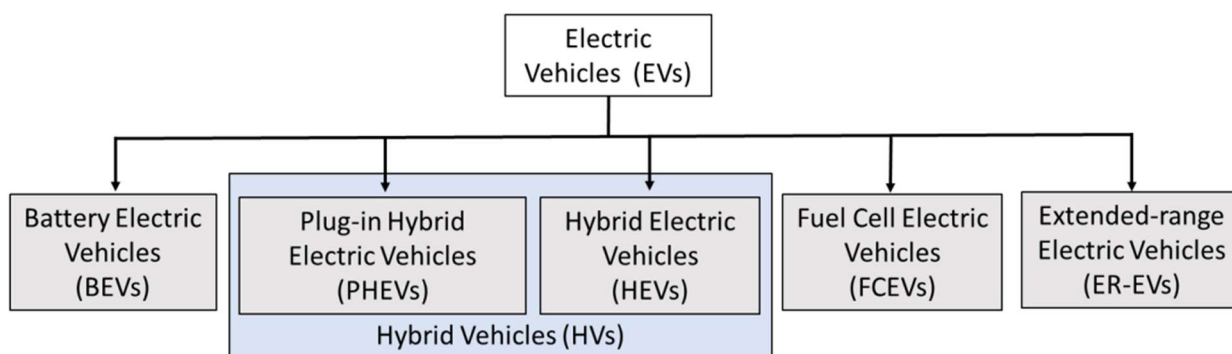


Рисунок 1.1 – Класифікація електромобілів [11]

Battery Electric Vehicle (BEV) – транспортні засоби повністю працюють за допомогою електричної енергії. BEV не мають ДВЗ і не використовують

жодного виду рідкого палива. BEV зазвичай використовують великі блоки акумуляторів, щоб надати транспортному засобу достатню автономність. Типовий пробіг BEV досягає від 160 до 250 км, хоча деякі з них можуть проїхати до 500 км. Прикладом цього типу транспортного засобу є Nissan Leaf [12], який має акумулятор ємністю 62 кВт/год, що дозволяє користувачам мати автономність 360 км.

Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV) – гібридні транспортні засоби приводяться в рух як ДВЗ, так і електричним двигуном та можуть бути заряджатися від електромережі. PHEV здатні значно зменшити споживання палива. Mitsubishi Outlander PHEV [13] оснащений акумулятором ємністю 12 кВт/год, що дозволяє йому проїхати близько 50 км за рахунок електродвигуна.

Hybrid Electric Vehicle (HEV) – гібридні транспортні засоби, що приводяться в рух за допомогою комбінації ДВЗ та ЕД. Різниця з PHEV полягає в тому, що HEV не можна підключати до мережі. Акумулятор, який забезпечує енергією ЕД, заряджається завдяки енергії, що вироблена за допомогою ДВЗ. В сучасних моделях існує можливість заряджати акумулятор завдяки енергії, що утворюється при гальмуванні, перетворюючи кінетичну енергію в електричну. Toyota Prius у своїй гібридній моделі (4-го покоління) забезпечила акумулятор ємністю 1,3 кВт/год, що теоретично дозволяло йому проїхати до 25 км у повністю електричному режимі [14].

Щоб оцінити співвідношення розподілу потужності між компонентами силової установки у HEV, було введено поняття DoH (Degree of hybridization), тобто *ступеня гібридизації* [15].

DoH – це відсоткове відношення потужності електричної системи до повної потужності автомобіля і визначається як:

$$\text{DoH} = \frac{P_{\text{elec}}}{P_{\text{total}}} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де P_{elec} – потужність електродвигуна у HEV, P_{total} – потужність ЕД та ДВЗ.

Відповідно до різних значень DoH, HEV можна розділити на наступні чотири категорії: micro, mild, medium та full [16, 17]. Опис цих категорій [18, 19] наведено в табл. 1.1.

За електричну частину в гібридах відповідають: Belt Starter Generator (BSG) – ремінний стартер-генератор або Integrated Starter Generator (ISG) – інтегрований стартер-генератор [20]. Вони можуть виконувати різні функції, в залежності від конфігурації гібриду: старт-стопу, рекуперації, додаткової потужності до ДВЗ або ж повністю працювати замість ДВЗ.

Таблиця 1.1 – Класифікація та опис видів HEV [21]

Категорія		Micro HEV	Mild HEV	Medium HEV	Full HEV
DoH		> 10 %	10 – 20 %	20 – 30%	30 – 50 %
Характеристика	Структура	BSG	ISG	ISG	ISG
	Старт/стоп	+	+	+	+
	Рекуп. гальм.	-	+	+	+
	Дод. потужність	-	-	+	+
	Повний привід	-	-	-	+
Застосування		Citroen C3 TOYOTA VITZ	GM Saturn Vue GM AURA GM MALIBU HONDA ACCORD	HONDA CIVIC HONDA INSIGHT MERCEDES S400	TOYOTA PRIUS TOYOTA CAMRY FORD ESCAPE FORD FUSION GM YUKON GM TAHOE

Технологія BSG – на даний момент є застарілою. Medium-гібриди оснащені двигунами, що мають більшу номінальну напругу, мають більш складну структуру та вищі технічні вимоги в порівнянні з mild-гібридами. Full-гібриди також використовують вищу напругу для своїх інтегрованих генераторів, щоб забезпечувати достатній рівень потужності, для того, щоб використовувати як тяговий привод.

Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) – транспортні засоби оснащені електричним двигуном, який використовує суміш стисненого водню та кисню з повітря, результатом реакції чого є вода. Незважаючи на те, що такі види транспортних засобів вважаються такими, що мають «нульові викиди», варто підкреслити, що, незважаючи на те, що зелений водень існує, більшість використовуваного водню видобувається з природного газу. Hyundai Nexho FCEV [22] є прикладом такого типу транспортних засобів, здатних проїхати 650 км без дозаправки.

Extended-range Electric Vehicle (ER-EV) – оснащені додатковим ДВЗ, який за потреби заряджає акумулятори автомобіля. Цей тип двигуна, на відміну від двигунів PHEV і HEV, використовується лише для зарядки, тому він не під'єднаний до коліс автомобіля. Прикладом такого типу транспортних засобів є BMW i3 [23], який має батарею ємністю 42,2 кВт/год, що забезпечує автономність 260 км в електричному режимі, а користувачі можуть проїхати додаткові 130 км у режимі збільшеного запасу ходу.

До переваг електромобілів можна віднести:

- нульові викиди (відсутність вихлопних газів CO₂ чи діоксиду азоту NO₂);
- простота (менша кількість елементів двигуна електромобіля, компактність, відсутність коробки передач, зчеплення чи елементів, які зменшують шум двигуна);
- надійність (більша стійкість до поломок через відсутність вібрацій чи корозії);
- вартість (вартість технічного обслуговування та електроенергії менша);
- комфорт (відсутність шуму та вібрації) [24];
- вищий ККД.

1.2 Сучасний стан і тенденції в електромобільності

18 грудня 2018 в м. Берн (Швейцарія) була підписана так звана «Дорожня карта електромобільності 2022» («Roadmap for Electric Mobility 2022»). Дорожня карта описує різні практичні заходи, щоб до 2022 року збільшити до 15% частку нових реєстрацій транспортних засобів під назвою «акумуляторні електромобілі» (повністю електричні автомобілі та гібриди), що відіграє важливу роль у досягненні цілей швейцарської енергетики та клімату. Понад 50 компаній (Tesla, ABB, Alphabet, Fenaco та ін.) організацій взяли участь у розробці цього документа, що відображає динамічність цієї угоди. Угода має на меті наступні цілі: зменшення викидів CO₂, розвиток інфраструктури електромобільності, удосконалення системи зарядних підстанцій та збільшення їх кількості [25].

Небагато галузей є настільки динамічними, як ринок електромобілів. Продажі електромобілів у 2021 р. подвоїлися порівняно з попереднім роком і досягли нового рекорду в 6.6 млн. У 2012 р., наприклад, в усьому світі було продано лише 120 тис. електромобілів, а у 2021 р. щотижня продається більше ніж стільки. Таким чином, загальна кількість електромобілів на світових дорогах досягла приблизно 16.5 млн., що втричі більше, ніж у 2018 р. [26].

Результат величезної кількості бонусів та пільг щодо користування та покупки електромобілів оскільки можна оцінити на рис. 1.2 та табл. 1.2.

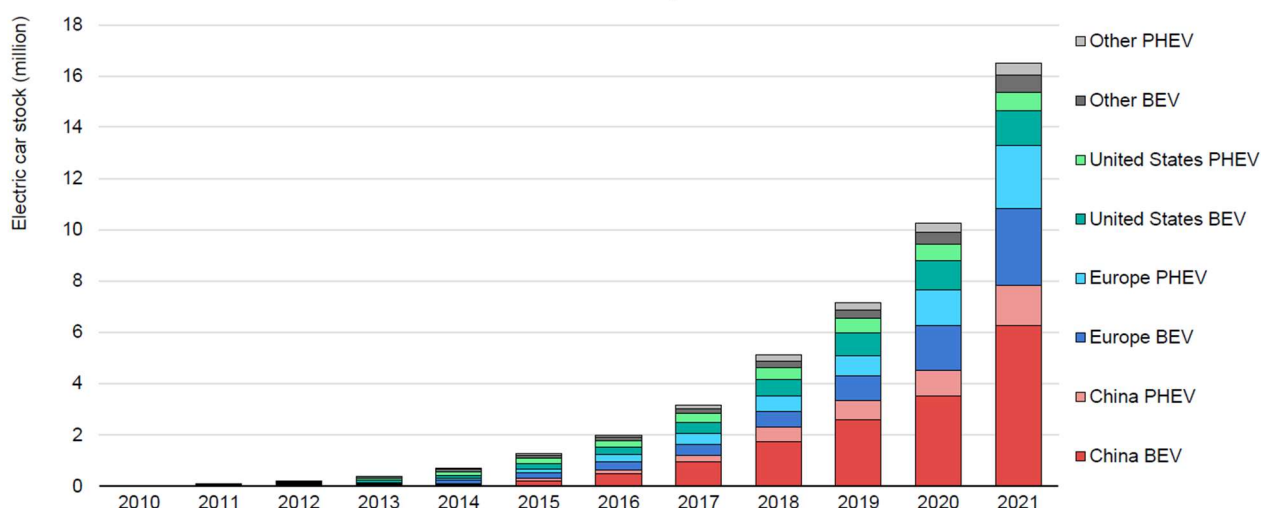


Рисунок 1.2 – Статистика кількості наявних електричних транспортних засобів у світі [26]

Таблиця 1.2 – Відсоток продаж електромобілів серед всіх нових електромобілів в 2013 – 2020 рр. [26]

Country	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Norway	6.10%	13.84%	22.39%	27.40%	29.00%	39.20%	49.10%	55.90%
Iceland	0.94%	2.71%	3.98%	6.28%	8.70%	19.00%	22.60%	45.00%
Sweden	0.71%	1.53%	2.52%	3.20%	3.40%	6.30%	11.40%	32.20%
The Netherlands	5.55%	3.87%	9.74%	6.70%	2.60%	5.40%	14.90%	24.60%
China	0.08%	0.23%	0.84%	1.31%	2.10%	4.20%	4.90%	5.40%
Canada	0.18%	0.28%	0.35%	0.58%	0.92%	2.16%	3.00%	3.30%
France	0.83%	0.70%	1.19%	1.45%	1.98%	2.11%	2.80%	11.20%
Denmark	0.29%	0.88%	2.29%	0.63%	0.40%	2.00%	4.20%	16.40%
USA	0.62%	0.75%	0.66%	0.90%	1.16%	1.93%	2.00%	1.90%
United Kingdom	0.16%	0.59%	1.07%	1.25%	1.40%	1.90%	22.60%	45.00%
Japan	0.91%	1.06%	0.68%	0.59%	1.10%	1.00%	0.90%	0.77%

Очікується, що ці цифри продовжуватимуть зростати протягом наступних років, оскільки кілька країн висловили бажання заборонити транспортні засоби з ДВЗ найближчим часом. Прикладом цього є Норвегія, яка оголосила, що всі автомобілі та мікроавтобуси, продані в 2025 році, повинні мати нульовий рівень викидів. Зі свого боку, Індія, Ізраїль та Нідерланди оголосили, що всі автомобілі, продані в 2030 році, будуть електричними. Німеччина та Сполучене Королівство відкладають цю дату на 2040 рік, у той самий рік, коли автомобілі з ДВЗ також

будуть заборонені в штаті Каліфорнія. У більш обмежувальний спосіб у Німеччині вони розглядають заборону руху дизельних транспортних засобів у містах, а Париж оголосив, що заборонить рух дизельних транспортних засобів у місті з 2024 року, а ДВЗ – з 2030 року. Рим заборонить рух дизельних транспортних засобів з 2024 року, тоді як Мадрид, Афіни та Мехіко зроблять це з 2025 року. Однак, окрім позитивних даних про продажі, зареєстрованих у всьому світі, також варто відзначити, що 95% електромобілів було продано лише в 10 країнах (Китай, США, Японія, Канада, Норвегія, Велика Британія, Франція, Німеччина, Нідерланди та Швеція). Нарешті, слід також підкреслити, що наразі у продажу є кілька моделей BEV і PHEV. Серед найбільш продаваних моделей виділяються Tesla Model 3 (BEV), Toyota Prius Prime (PHEV), Chevrolet Volt, Nissan Leaf (BEV), Tesla model S (BEV), Ford Fusion Energi (PHEV) і BMW i3 (BEV). [27, 28].

Глобальні продажі BEV та PHEV на перший квартал 2022 року, в порівнянні з минулорічними показниками внесені до Додатку А. Можемо спостерігати, що велику частку ринку електромобілів займають плагін-гібриди. Це також підтверджується на рис. 1.2. Особливо це відображається на китайському ринку. Як бачимо, китайський лідер BYD лідирує серед продаж, обігнавши Tesla, саме за рахунок продаж PHEV.

Як ми бачимо, Китай і США є, безумовно, країнами, які мають найбільше продажів електромобілів, хоча Норвегія виділяється як країна в світі, в якій електромобілі мають більший ринок частка, оскільки майже три з чотирьох автомобілів, проданих у 2020 році, є електричними.

Європейський Союз встановив цілі: стати вуглецево-нейтральними до 2050 року та скоротити викиди на 55% до 2030 року. Щоб досягти цих цілей, легкові автомобілі, на які сьогодні припадає близько 12% викидів CO₂ ЄС, необхідно швидко декарбонізувати [29].

1.3 Використання синхронних двигунів з постійними магнітами в електромобілях

Зважаючи на світову тенденцію до енергозбереження, існує потреба у підвищенні ефективності приводів електричних машин, зокрема змінного струму. Спираючись на світові досягнення щодо розробки матеріалів для постійних магнітів, твердотілих пристроїв і мікроелектроніки сприяли створенню нових енергоефективних, високопродуктивних електроприводів, які використовують сучасні безщіточні або синхронні двигуни. Завдяки рідкоземельним постійним магнітам ці двигуни демонструють вищий ККД та кращі динамічні характеристики, ніж асинхронні двигуни без шкоди для надійності [30]. Також було показано, що ці двигуни можуть працювати в широкому діапазоні кутової швидкості, зберігаючи при цьому її сталість [31]. Не дивно, що велика увага приділяється цим двигунам у різноманітних використаннях електромобільності, зокрема для тягового електроприводу [32].

Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) є одним із типів синхронних двигунів змінного струму, де поле збуджується постійними магнітами, які створюють синусоїдну зворотну ЕРС. Він містить ротор і статор, як і асинхронний двигун, але постійний магніт використовується як ротор для створення магнітного поля [33].

СДПМ все частіше використовуються в електромобілях [34, 35] завдяки їх малим розмірам та ваги, високим ККД, широким діапазоном швидкостей, низьким рівнем шуму та надійною роботою. Зосереджуючись на застосуванні в тягових електроприводах, необхідна швидка та надійна реакція електроприводу на збурення, щоб компенсувати стрибкоподібне навантаження, який водій задає за допомогою педалі.

Щоб зменшити тягові двигуни, зазвичай використовуються редуктори. У залізничному транспортному засобі момент, який видають тягові двигуни, передається на вісь колеса для руху транспортного засобу. Однак у редукторі є ряд проблем, такі як втрати трансмісії, шуми та складнощі при технічному

обслуговуванні. Прийняття системи прямого приводу вирішить ці проблеми, але зробить тягові двигуни більшими та збільшить масу.

Завдяки використанню високого моменту в низькошвидкісних електродвигунах, які можна встановлювати безпосередньо всередині колеса, відомих як внутрішньоколісні двигуни або двигуни-ступиці, втрати передачі мінімізуються, а ефективність роботи покращується [36].

Вбудовані колісні двигуни надають вагомі переваги для електромобілів, наприклад: усунення механічної трансмісії, включаючи коробки передач, диференціали, приводні вали та осі; забезпечують значну економію ваги та витрат на виробництво; зменшують вплив продукту на навколишнє середовище. Також, усі колеса, що оснащені внутрішньоколісними двигунами, можуть забезпечувати блокування керма на 90 градусів, що допомагає паркуватися та виїждати з найменшого простору, навіть рівного довжині автомобіля.

Незважаючи на те, що колісний двигун забезпечує значні переваги, основним недоліком є те, що вага електродвигунів достатньо збільшить вагу автомобіля.

Вузол вбудованого СДПМ, виготовленого компанією Protean для Mercedes-Benz Brabus E-класу [37] (повний електричний/гібридний 4WD), показаний на рис. 1.3



Рисунок 1.3 – Безресорний вузол внутрішньоколісного СДПМ [37]

За конструкцією ротора синхронні двигуни поділяються на:

- електродвигуни із явно вираженими полюсами (явнополюсні);
- електродвигуни з неявно вираженими полюсами (неявнополюсні).

Також за конструкцією ротора СДПМ поділяються на:

- синхронний двигун з поверхневою установкою постійних магнітів (SPMSM - surface permanent magnet synchronous motor);
- синхронний двигун із вбудованими (інкорпорованими) магнітами (IPMSM - interior permanent magnet synchronous motor).

На рис. 1.4 показані топології конфігурації SPM та IPM для PMSM.

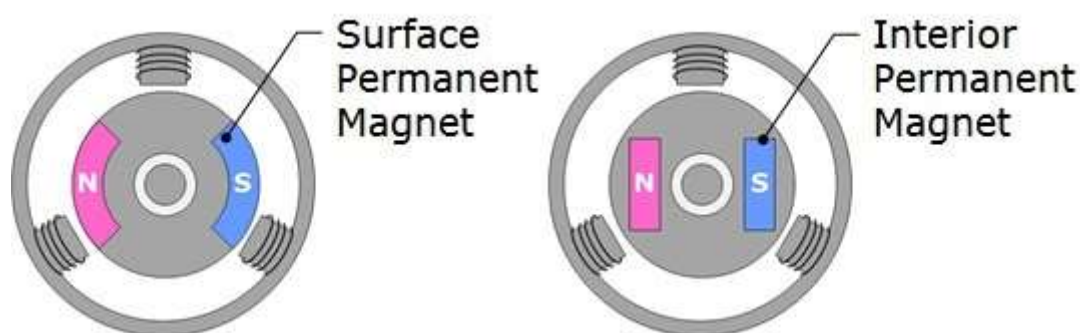


Рисунок 1.4 – Типи СДПМ за конструкцією ротора [38]

Система керування синхронним двигуном з постійними магнітами також має гарантію реального часу та може реалізувати складні алгоритми керування. Інновація цієї системи полягає у впровадженні деяких розширених алгоритмів теорії керування в конкретну систему. Система керування синхронним двигуном із постійним магнітом, може бути широко застосована не лише в системі приводу тяги електричних транспортних засобів, але й у деяких областях промислового керування. Практика довела, що результати цих застосувань досить чудові. Слід зазначити, що контролери синхронних двигунів з постійними магнітами мають великий ринковий потенціал для застосування електромобілів [39].

З постійним розвитком економіки Китаю швидкість розвитку автомобільної промисловості стає все швидшою. Більшість СДПМ саме китайського виробництва.

Щоб покращити продуктивність системи керування тягового електроприводу, система керування із замкнутим контуром використовує інформацію про положення магнітного поля датчика положення ротора для керування частотою струму ротора та положенням фази тощо [40].

Компанія EMRAX представляють лінійку легких, компактних, потужних, малошвидкісних СДПМ. Їх можна використовувати для різних цілей – від електровелосипедів до електробусів. Крім того, двигуни можна використовувати в літаках, морських і вертикальних літальних апаратів [41].

Модель EMRAX 348 [42] може виробляти до 420 кВт потужності та 1000 Нм максимального крутного моменту при 4500 об/хв при вазі лише 42 кг, що означає, що дана модель має щільність потужності 10 кВт/кг. Ці двигуни можна з'єднати за допомогою технології EMRAX TWIN, щоб подвоїти вихідну потужність та момент.

Кожен двигун EMRAX — це індивідуальний продукт, виготовлений за допомогою стандартизованого виробничого процесу.

Особливості двигунів EMRAX:

- налаштовуються за дуже короткий час;
- мають найкращу питому потужність, яка становить до 10 кВт/кг;
- мають ККД близький до 98%;
- надійні та компактні;
- можна складати разом для досягнення подвоєної потужності/крутного моменту;
- можна використовувати з кількома контролерами;
- мають дуже широкий спектр використання, включаючи тягові двигуни, гібридні силові агрегати, розширювачі запасу ходу, генератори для вітряних/водяних турбін, інтегровані стартер-генератори, заміну гідравлічних двигунів, робототехніку тощо;
- може досягати високої потужності навіть при дуже низьких швидкостях обертання завдяки дуже високому крутному моменту, що забезпечує безредукторний привод.

Висновки до розділу

В наш час забруднення навколишнього середовища та енергетична криза зростають у всьому світі, замість традиційних транспортних засобів розповсюджуються електромобілі. Розробка електромеханічної системи електромобіля на базі синхронного двигуна з постійними магнітами є актуальною та доцільною задачею. Розроблена система відобразить динамічні показники сучасних СДПМ якості тягового електроприводу, розроблену схему керування двигуна можна практично реалізовувати в електромеханічних системах електроприводів.

Для вирішення даних питань було встановлено **задачі дослідження**.

1. Розрахунок основних параметрів електромеханічної системи електричного транспортного засобу та вибір основних її елементів (АКБ, дослідження можливості застосування СК, двигун).
2. Розробка системи векторного керування координатами приводного двигуна транспортного засобу.
3. Дослідження електромеханічної системи методом математичного моделювання та визначення основних експлуатаційних характеристик транспортного засобу.
4. Розробка схеми електричної принципової силової частини та керуючого контролера.
5. Розробка стартап-проекту. Проаналізувати можливих споживачів, обсяг інвестицій для налаштування виробництва, способи просування продукції на ринок.

2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

На основі проведеного аналізу існуючих моделей було вирішено обрати модель RENAULT LOGAN для подальшого переведення з існуючого двигуна внутрішнього згорання на електропривод. Так як ця модель є досить бюджетною та популярною.

Dacia Logan – компактні автомобілі В-Класу, що виробляються румунською компанією Dacia з 2004 року. У 2008 році модель пройшла фейсліфт. З 2009 року імпортується до України під назвою Renault Logan. Всього виготовлено 2,5 млн автомобілів Logan першого покоління [43].

Перші офіційні фотографії Dacia Logan другого покоління представлено 17 вересня 2012 року, офіційна презентація моделі відбулася на Паризькому автосалоні 2012 року. В продаж автомобілі надійшли в кінці 2012 року.

Третє покоління Logan було представлено у вересні 2020 року разом із моделями Sandero та Sandero Stepway.

Зовнішній вигляд автомобіля зображено в Додатку Б.

В Україні в продажі згідно до [44] існує 4 версії опираючись на тип двигуна та трансмісії: 1,0 SCe 75; 1,0 SCe 75; 0,9 TCe 90; 1,5 dCi 90; 1,0 SCe 75. Всього існує 7 кольорів кузовів.

Для дослідження використаємо версію [45] з двигуном на 1,0 л та трансмісією типу SCe 75.

2.1 Розрахунок та вибір електродвигуна

2.1.1 Розрахунок електродвигуна

Вихідні дані використаємо з брошури [45]. Однак, там не вказано передатне число редуктора. Після огляду літератури, був знайдений автомобіль [46] з трансмісією типу SCe 75, звідти взяті передатні числа редуктора.

Маса автомобіля, на основі якої проводиться дослідження обирається, слідуючи визначенням нижче.

Споряджена маса – маса транспортного засобу без водія, пасажирів, вантажу з принаймні 90-ма відсотками об'єму палива у встановлених виробником баках для палива, 100-ма відсотками з інших експлуатаційних рідин та обладнанням, яке виробник поставляє додатково до необхідного для нормального функціонування (запасне колесо, набір інструментів, вітрове скло, багажник, захисні пристрої тощо) [47].

Повна маса – передбачена виробником споряджена маса колісного засобу плюс маса водія масою водія (75 кг), пасажирів з їх багажем, вантажу, а для автобусів - з масою членів екіпажу (75 кг), якщо для кожного з них передбачено сидіння).

Отже, для дослідження обрана повна (максимальна) маса, щоб розраховувати реальні показники автомобіля.

Значення ширини автомобіля візьмемо зі складеними дзеркалами заднього огляду, так як при врахуванні ширини автомобіля з розкладеними дзеркалами значення аеродинамічного супротиву майже не буде відрізнятися.

В каталозі [45] розмір шини вказано 185/65R15. Для подальших розрахунків необхідно значення діаметра колеса. За допомогою [48], дізнаємося, що $d_k = 622 - 632 \text{ мм} \approx 0.63 \text{ м}$.

Згідно до брошури [45] складаємо таблицю з параметрами RENAULT LOGAN, які необхідні да подальших розрахунків.

Таблиця 2.1 – Технічні дані Renault Logan

Параметр	Значення
Максимальна маса автомобіля $m_{\max}$, кг	1491
Довжина автомобіля B , м	4.346
Ширина автомобіля зі складеними дзеркалами заднього огляду $L1$, м	1.733
Висота автомобіля H , м	1.517
Загальне передатне число V -ої передачі GR_V	3.81
Діаметр колеса d_k , м	0.63
Максимальна лінійна швидкість автомобіля $V_{\max}$, км / год	158
Час розгону до 100 км/год t_{100} , с	15.1

Для проведення розрахунку потужності необхідно визначитись з зусиллями (рис 2.1), які діють на транспортний засіб і їх напрямками.

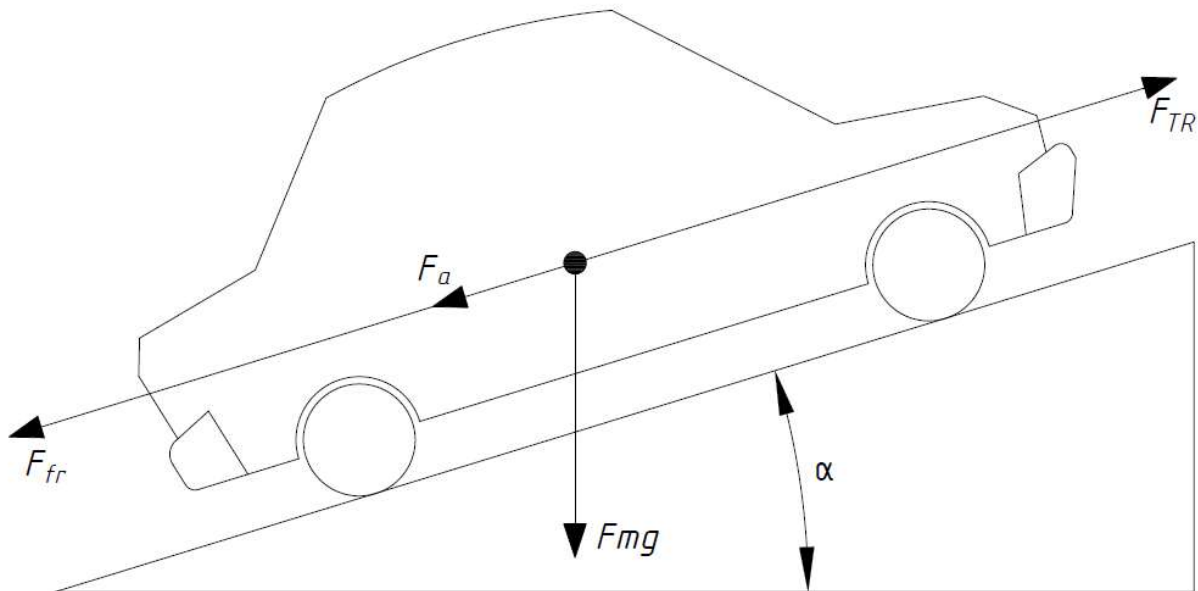


Рисунок 2.1 – Схема зусиль які діють на транспортний засіб

Тягове зусилля:

$$F_{TR} = F_{fr} \cos \alpha + F_{aero} + F_{mg} + m_{vmax} \cdot a, \quad (2.1)$$

де F_{TR} – тягове зусилля двигуна; α – кут нахилу поверхні; F_{fr} – сила опору тертя-кочення; F_{aero} – сила аеродинамічного опору; F_{mg} – сила тяжіння; a – величина прискорення електромобіля.

Під час виконання розрахунків приймаємо, що автомобіль рухається по горизонтальній поверхні, тобто $\alpha = 0$.

Тоді, сила опору тертя-кочення буде розраховуватися як:

$$F_{fr} = P \cdot f_r, \quad (2.2)$$

де $P = m_{max} \cdot g$ – нормальне навантаження, що діє на центр кочення; $g = 9,81 \text{ м / с}^2$ – прискорення вільного падіння; f_r – коефіцієнт тертя-кочення.

Нормальне навантаження:

$$P = m_{max} \cdot g = 1491 \cdot 9.81 = 14626.71 \text{ Н}. \quad (2.3)$$

Значення коефіцієнта тертя-кочення виберемо опираючись на таблицю [49, с 20] виберемо для автомобільних шин для бетонної або асфальтної дороги, $f_r = 0.013$.

Тоді значення сили опору тертя кочення, згідно з (2.2):

$$F_{fr} = P \cdot f_r = 14626.71 \cdot 0.013 = 190.147 \text{ Н}.$$

Сила аеродинамічного опору:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot (V - V_w)^2, \quad (2.4)$$

де $\rho = 1.29 \text{ кг} \cdot \text{м}^3$ – густина повітря, при $t = 0^\circ\text{C}$; A_f – площа фронтального перерізу електромобіля; C_D – коефіцієнт аеродинамічного супротиву; V – швидкість електромобіля; V_w – сила вітру (приймаємо $V_w = 0$, тобто безвітряну погоду).

Значення коефіцієнта аеродинамічного супротиву виберемо опираючись на рисунок [49, с 22] приймемо для форми автомобіля Renault Logan $C_D = 0.4$.

Площа фронтального перерізу автомобіля:

$$A_f = L_1 \cdot H = 1.733 \cdot 1.517 = 2.629 \text{ м}^2. \quad (2.5)$$

Отже, закон зміни сили аеродинамічного опору, згідно з (2.4):

$$F_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.29 \cdot 2.629 \cdot 0.4 \cdot V^2 = 0.678V^2. \quad (2.6)$$

Сила тяжіння розраховується як:

$$F_{\text{mg}} = m_{\text{max}} \cdot g \cdot \sin \alpha. \quad (2.7)$$

$F_{\text{mg}} = 0$, так як автомобіль рухається по горизонтальній поверхні.

Отже, закон зміни тягового зусилля, згідно з (2.1):

$$F_{\text{TR}} = F_{\text{fr}} + F_{\text{aero}} + F_{\text{mg}} + m_{\Sigma} \cdot a = 190.147 + 0.678V^2 + 1491 \cdot a. \quad (2.8)$$

В законі (2.8) маємо невідомі значення лінійної швидкості та лінійного прискорення. Відповідно до цього закону створюємо так званий driving cycle (цикл руху) – це ряд точок даних, що відображають швидкість транспортного засобу за конкретний час. Використаємо [50], оберемо тип ArtUrban. ArtUrban відображає приблизний цикл зміни лінійної швидкості у обставинах міста: значення швидкості не перевищує 60 км/год, зупинки на світлофорах та пробках, зниження швидкості на поворотах тощо. Продиференціюємо даний графік, отримаємо графік прискорення $a(t)$.

$$a(t) = \frac{dV(t)}{dt}. \quad (2.9)$$

Отримані дані будемо використовувати для побудови залежності $F_{\text{TR}} = f(t)$ згідно (2.8).

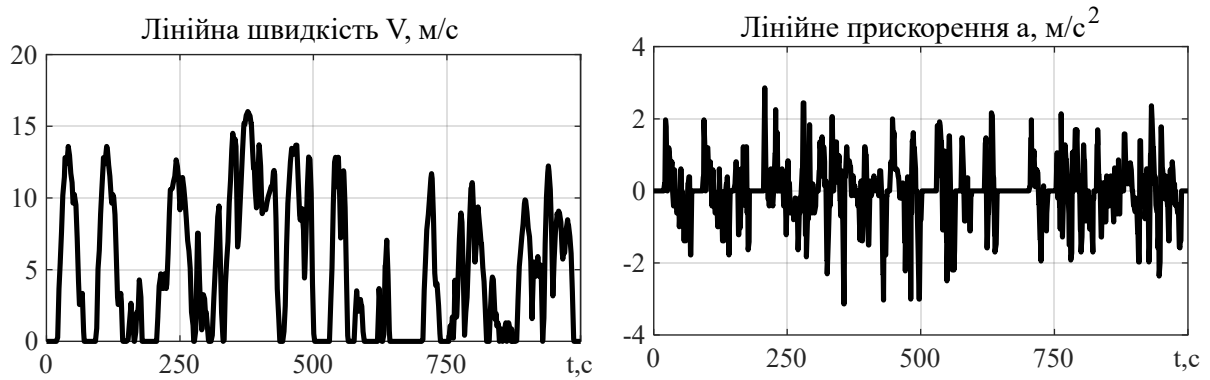


Рисунок 2.2 – Driving cycle та його похідна (лінійне прискорення)

Звідси механічна потужність $P_{\text{мех}}(t)$ розраховується як:

$$P_{\text{мех}}(t) = F_{\text{TR}}(t) \cdot V(t). \quad (2.10)$$

Коефіцієнт передачі між двигуном і колесом буде визначатись як передатне число п'ятої передачі, так як автомобіль буде їхати, в основному, на 4-5 передачах:

$$i_p = GR_V = 3.81. \quad (2.11)$$

Для побудови залежностей $\omega_{\text{дв}}(t)$, $M_{\text{дв}}(t)$ необхідно виконати наступні розрахунки.

Кутова швидкість колеса:

$$\omega_k(t) = \frac{V(t)}{r_k} \quad (2.12)$$

де $r_k = d_k / 2 = 0.63 / 2 = 0.365$ м – радіус колеса.

Момент колеса:

$$M_k(t) = F_{\text{TR}}(t) \cdot r_k. \quad (2.13)$$

Момент двигуна:

$$M_{\text{дв}}(t) = \frac{M_k(t)}{i_p \eta_p}, \quad (2.14)$$

де $\eta_p = 0.97$ – ККД редуктора.

Кутова швидкість двигуна:

$$\omega_{\text{дв}} = \omega_{\text{к}}(t) \cdot i_{\text{р}}. \quad (2.15)$$

В результаті отримаємо відповідні залежності $\omega_{\text{дв}}(t)$, $M_{\text{дв}}(t)$.

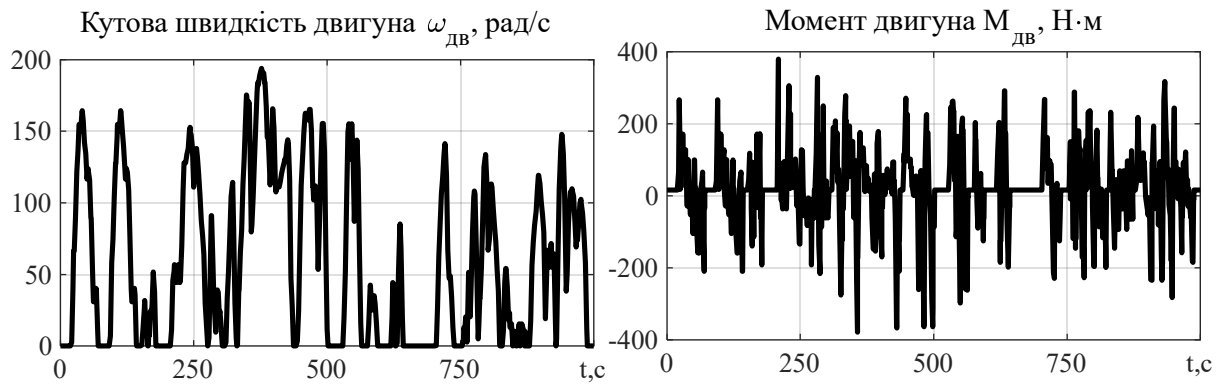


Рисунок 2.3 – Графіки перехідних процесів кутової швидкості та моменту двигуна

Опираючись на (2.10) механічна потужність двигуна $P_{\text{дв мех}}(t)$ буде:

$$P_{\text{дв мех}}(t) = \frac{P_{\text{мех}}(t)}{\eta_{\text{р}}}. \quad (2.16)$$

І відповідно потужність батареї:

$$P_{\text{БАТ}}(t) = \frac{P_{\text{дв мех}}(t)}{\eta_{\text{дв}} \eta_{\text{інв}}}, \quad (2.17)$$

де $\eta_{\text{інв}} = 0,97$ – ККД інвертора.

Проінтегруємо графік $V(t)$ (рис. 2.2), щоб дізнатися шлях, що пройшов електромобіль.

$$S(t) = \int V(t) dt. \quad (2.18)$$

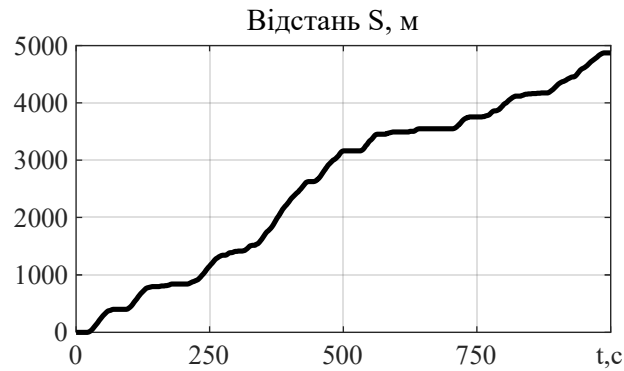


Рисунок 2.4 – Шлях, який пройшов електромобіль за 1000 с

Згідно з графіку, маємо $S_{1000s} \approx 5$ км. Нехай, максимальний пробіг від батареї буде $S_{\max} = 200$ км, тобто коефіцієнт масштабування всіх параметрів для розрахунку, буде:

$$K_{\text{мштб}} = \frac{S_{\max}}{S_{1000s}} = \frac{200}{5} = 40. \quad (2.19)$$

Проінтегрувавши (2.17) та враховуючи $K_{\text{мштб}}$ отримаємо кількість витраченої енергії:

$$W(t) = K_{\text{мштб}} \int P_{\text{БАТ}}(t) dt = 40 \int P_{\text{БАТ}}(t) dt \quad (2.20)$$

Будемо досліджувати два випадки споживаної енергії: при врахуванні рекуперації W_1 та без врахування W_2 . Для обчислення витраченої енергії без врахування рекуперації, не буде враховуватися від'ємна потужність в перехідних процесах. При моделювання, врахувавши (2.20), маємо наступні графіки, рис. 2.5.

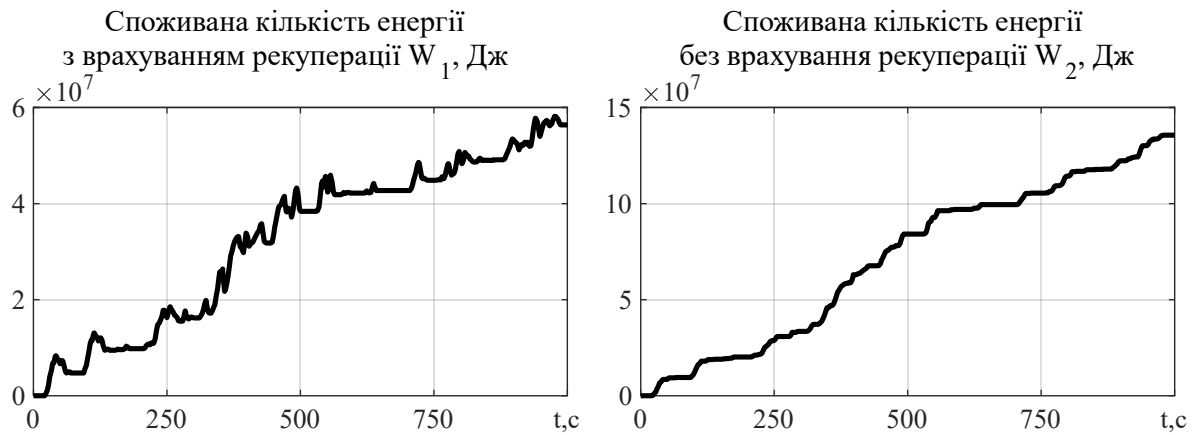


Рисунок 2.5 – Графіки споживаної енергії з врахуванням рекуперації та без врахування

З графіків маємо:

$$W_1 = 5.639 \cdot 10^7 \text{ Дж} \approx 56,4 \text{ МДж},$$

$$W_2 = 1.356 \cdot 10^8 \text{ Дж} \approx 135.6 \text{ МДж}.$$

Тобто, використовуючи режим рекуперації енергії, кількість споживаної енергії знижується більш ніж вдвічі.

Слід звернути увагу на те, що графіки на рис. 2.5 показують повну споживану потужність АКБ за час:

$$t_{\max} = 1000 \cdot K_{\text{мштб}} = 1000 \cdot 40 = 40000 \text{ с} \approx 11.11 \text{ год},$$

де – $t_{\max}$ час, який можна проїхати на одному заряді АКБ.

2.1.2 Вибір електродвигуна

Для вибору електродвигуна необхідно проаналізувати графік моменту електродвигуна (рис. 2.3). Бачимо, що пікове значення $M_{\max} = 400 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Це значення нам знадобиться далі при виборі.

В основному, існують наступні режими роботи електродвигунів:

- S1 – довготривалий;
- S2 – короткочасний;
- S3 – повторно-короткочасний.

Саме режим S2 – характерний для тягових електродвигунів. Отже, загальнопромислові двигуни типу AIP та 4A не підходять, так як вони призначені для роботи в режимі S1. Також вони мають досить велику масу та габаритні розміри.

Для тягових електроприводів існують спеціальні двигуни. Які мають таку конструкцію, яка дозволяє, при своїх відносно скромних малогабаритних розмірів видавати досить високу потужність.

На основі значення $M_{\max}$, провівши огляд тягових електродвигунів, враховуючи ціну, розміри та масу було вибрано СДПМ EMRAX 268 Medium Voltage LC. На основі [51], складено табл. 2.2 з технічними характеристиками двигуна, що необхідні для подальших розрахунків та досліджень. З повним переліком можна ознайомитися в брошурі [51].

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики EMRAX 268 Medium Voltage LC

Параметр	Значення
I	2
Максимальна напруга ланки постійного струму $U_{dc\max}^{ДВ}$, В	680
Максимальний ККД $\eta_{\max}^{ДВ}$	0.96
Максимальна потужність $P_{\max}^{ДВ}$, кВт (при $n = 4500$ об/хв)	210
Номінальна потужність $P_{\text{ном}}^{ДВ}$, кВт	100
Максимальний момент $M_{\max}^{ДВ}$, Н·м	500
Номінальний момент $M_{\text{ном}}^{ДВ}$, Н·м	213
Максимальна швидкість обертання ротора $n_{\max}^{ДВ}$, об / хв	5500
Номінальна швидкість обертання ротора $n_{\text{ном}}^{ДВ}$, об / хв	4500
Максимальний струм статора $i_{\max}^{ДВ}$, А	500

Продовження табл. 2.2

Номинальний струм статора $i_{\text{ном}}^{\text{дв}}$, А	220
Активний опір статора R_1 , мОм (при 25 °С)	9.85
Індуктивний опір статора L_1 , мкГн	70
Магнітний потік від постійних магнітів $L_m i_f$, Вб	0.06099
Кількість пар полюсів p_n , шт	10
Момент інерції $J_{\text{дв}}$, кг · м ²	0.05769



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд тягового електродвигуна EMRAX 268
Medium Voltage LC

Розрахуємо максимальну кутову швидкість двигуна. Згідно з табл. 2.6
 $n_{\text{дв max}} = 4500 \text{ об / хв}$, відповідно:

$$\omega_{\text{дв max}}^{\text{дв}} = 0.105 \cdot n_{\text{дв max}}^{\text{дв}} = 0.105 \cdot 4500 = 472.5 \text{ рад / с.} \quad (2.21)$$

Максимальна лінійна швидкість автомобіля:

$$V_{\text{max}} = 158 \text{ км / год} = 43.89 \text{ м / с.}$$

Тоді, радіус інерції буде визначатися як:

$$\rho = \frac{V_{\text{дв max}}^{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв ном}}^{\text{дв}}} = \frac{43.89}{472.5} = 0.093 \text{ м.} \quad (2.22)$$

Приведений момент інерції максимальної маси автомобіля:

$$J'_{\text{авт}} = m_{\text{max}} \cdot \rho^2 = 1491 \cdot 0.093^2 = 12.8957 \text{ кг · м}^2. \quad (2.23)$$

Сумарний момент інерції:

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J'_{\text{авт}} = 0.05769 + 12.8957 \approx 12.95 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.24)$$

2.2 Розрахунок та вибір тягової акумуляторної батареї

Акумуляторна батарея – це хімічне джерело електроенергії, багаторазової дії, що забезпечую атомне живлення для різних електротехнічних систем, зокрема для електромобілів.

Основними характеристиками АКБ є:

- напруга батареї $U_{\text{АКБ}}$, В;
- ємність батареї $C_{\text{АКБ}}$, А · год.

Потужність АКБ, яку віддає протягом години розраховується як:

$$P_{\text{BAT}} = U_{\text{BAT}} I_{\text{BAT}}. \quad (2.25)$$

де I_{BAT} – струм, який протікає в батареї протягом однієї години, А · год.

Тоді, енергія батареї:

$$W_{\text{BAT}} = 3600 P_{\text{BAT}}. \quad (2.26)$$

Для розрахунку АКБ введемо поняття W_s – необхідна кількість енергії для АКБ. Акумуляторні батареї зазвичай не здатні поглинати енергію від рекуперації, тому розглядається наступний випадок:

$$W_s = W_2.$$

Орієнтуючись на СД з $U_{\text{л ном}} = 380$ В, напруга в ланці постійного струму буде дорівнювати $U_{\text{dc}} = 540$ В.

Тоді, будуть вірними наступні нерівності:

$$\begin{aligned} U_{\text{BAT}} &\leq U_{\text{dc}}, \\ W_{\text{BAT}} &\geq W_s, \\ I_{\text{BAT}} &\geq \frac{W_s}{3600 U_{\text{dc}}}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Ємність АКБ:

$$I_h = \frac{W_2}{3600U_{\text{АКБ}}} = \frac{1.356 \cdot 10^8}{3600 \cdot 540} = 69.74 \text{ А} \cdot \text{год.} \quad (2.28)$$

Існує велика кількість топологій акумуляторних батарей. При виборі моделі скористаємося топологією LiFePO₄, так як такі батареї широко використовуються в електровелосипедах, електроскутерах і електромобілях. LiFePO₄ акумулятори мають низку переваг та мають кращі характеристики ніж літій-іонні.

Провівши аналіз українських [52, 53, 54] та зарубіжних [55, 56] моделей LiFePO₄ акумуляторів, опираючись на розраховані $U_{\text{АКБ}}$ та I_h , було визначено, що акумулятори малих ємностей (близько 500 мАгод) та великих ємностей (більше 30 А·год) мають високу ціну, масо-габаритні показники. Тому, вибір акумуляторів для тягової батареї зупинився на моделях з табл. 2.3, враховуючи їхні параметри.

Таблиця 2.3 – Параметри обраних акумуляторних батарей

Параметр \ Назва	Shenzhen GTech LiFePO ₄ 3.2V 25Ah [57]	LogicPower LP LiFePO ₄ 6V - 12 Ah [58]
Напруга U_{CELL} , В	3.2	6
Ємність I_{CELL} , А·год	25	12
Маса m_{CELL} , кг	0.63	0.71
Габаритні розміри $L_{\text{CELL}} \times W_{\text{CELL}} \times H_{\text{CELL}}$, мм	26×70×180	151×50×96
Вартість Q_{CELL} , \$	29.59*	27.92*

* - за курсом НБУ 1\$ = 36.57 грн

Проведемо розрахунок на основі акумуляторів з табл. 2.3.

Для досягнення необхідної напруги, необхідно підключити послідовно наступну кількість елементів:

$$\begin{aligned} N_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} &= \frac{U_{\text{dc}}}{U_{3.2\text{V}25\text{Ah}}} = \frac{540}{3.2} = 168,75 \approx 169 \text{ шт}, \\ N_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}} &= \frac{U_{\text{dc}}}{U_{6\text{V}12\text{Ah}}} = \frac{540}{6} = 90 \text{ шт}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Для досягнення необхідного струму, необхідно підключити паралельно наступну кількість елементів:

$$\begin{aligned} N_{\text{I}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} &= \frac{I_{\text{h}}}{I_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}}} = \frac{69.74}{25} = 2.79 \approx 3 \text{ гілки}, \\ N_{\text{I}}^{6\text{V}12\text{Ah}} &= \frac{I_{\text{h}}}{I_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}}} = \frac{69.74}{12} = 5.81 \approx 6 \text{ гілок}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Отже, сумарна кількість елементів буде:

$$\begin{aligned} N_{\Sigma}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} &= N_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} \cdot N_{\text{I}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} = 169 \cdot 3 = 507 \text{ шт}, \\ N_{\Sigma}^{6\text{V}12\text{Ah}} &= N_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}} \cdot N_{\text{I}}^{6\text{V}12\text{Ah}} = 90 \cdot 6 = 540 \text{ шт}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Загальна маса акумуляторної батареї:

$$\begin{aligned} m_{\text{АКБ}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} &= N_{\Sigma}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} \cdot m_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} = 0.63 \cdot 507 = 319.41 \text{ кг}, \\ m_{\text{АКБ}}^{6\text{V}12\text{Ah}} &= N_{\Sigma}^{6\text{V}12\text{Ah}} \cdot m_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}} = 0.71 \cdot 540 = 362.1 \text{ кг}. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Об'єм акумуляторної батареї:

$$\begin{aligned} V_{\text{АКБ}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} &= L_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} W_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} H_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} N_{\Sigma}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} = 26 \cdot 70 \cdot 180 \cdot 507 \approx 0.17 \text{ м}^3, \\ V_{\text{АКБ}}^{6\text{V}12\text{Ah}} &= L_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}} W_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}} H_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}} N_{\Sigma}^{6\text{V}12\text{Ah}} = 151 \cdot 50 \cdot 96 \cdot 540 \approx 0.39 \text{ м}^3. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Вартість АКБ:

$$\begin{aligned} Q_{\text{АКБ}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} &= Q_{\text{CELL}}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} \cdot N_{\Sigma}^{3.2\text{V}25\text{Ah}} = 29.59 \cdot 507 = \$15002.13, \\ Q_{\text{АКБ}}^{6\text{V}12\text{Ah}} &= Q_{\text{CELL}}^{6\text{V}12\text{Ah}} \cdot N_{\Sigma}^{6\text{V}12\text{Ah}} = 27.92 \cdot 540 = \$15076.8. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Аналізуючи результати (2.31) – (2.34) робимо висновок, батарея на основі [57] матиме менше елементів, що зменшує кількість з'єднань; займатиме в два рази менше місця ніж акумулятори типу [58]. Також АКБ LogicPower LP LiFePO4 6V - 12 Ah має більшу сумарну масу.

Тобто, в якості елементів тягової батареї вибираємо Shenzhen GTech LiFePO4 3.2V 25Ah в кількості 507 шт.

2.3 Розрахунок та вибір суперконденсаторів

Традиційні накопичувачі енергії, такі як акумулятори, мають деякі обмеження, а саме, повільний час зарядження та обмежений термін служби [59]. Виробництво електроенергії відновлюваними джерелами енергії висуває певні вимоги до стабільності енергетичної мережі. Потреба в пристроях миттєвого накопичення енергії збільшує використання суперконденсаторів як змінного накопичувача, особливо в застосуванні відновлюваної енергії та електричних транспортних засобів [60], [61].

Суперконденсатори або ультраконденсатори – це накопичувачі енергії, які можуть зберігати та віддавати енергію дуже швидко та з мінімальними втратами. СК засновані на електростатичному процесі накопичення енергії, який відбувається повністю без хімічних процесів, на відміну від батарей, що базуються на процесах накопичення електрохімічної енергії. Вони мають високу щільність енергії, дуже надійні для використання в широкому діапазоні температур, мають тривалий термін служби і можуть заряджатися та розряджатися багато сотень тисяч разів без значних втрат [62].

Енергія, що накопичується в суперконденсаторі:

$$W_{sc} = \frac{C_{sc} U_{sc}^2}{2}. \quad (2.35)$$

де C_{sc} – ємність суперконденсатора, U_{sc} – напруга суперконденсатора.

При заряджанні/розряджанні напруга на суперконденсаторі буде відповідно збільшуватися і зменшуватися. При роботі з суперконденсатором потрібно це враховувати, що досяжний робочий діапазон $(50 \div 100)\% U_{cmax}$.

Так як $U_{dc} = 540$ В, припускаємо, що $U_{dcmax} = 540$ В та $U_{dcmin} = 270$ В. Будемо вважати, що цей діапазон напруги буде робочим для суперконденсатора

і відповідно енергія, що накопичена в цьому діапазоні ми зможемо використовувати на те, щоб віддавати в тяговий електропривод.

Тоді енергія корисна визначається:

$$W_k = \frac{CU_{dc\max}^2}{2} - \frac{CU_{dc\min}^2}{2}. \quad (2.36)$$

В виразі (2.36) W_k – енергія, яку необхідно затратити, щоб автомобіль пройшов шлях S . Оскільки ми говоримо про суперконденсатор, він заряджається і здатен поглинати всю енергію, яка передається на відміну від акумуляторної батареї, то ми говоримо, що рекуперація буде враховуватися. Вся енергія буде в нього повертатися, тоді $W_k = W_1$.

Тоді ємність суперконденсатора відповідно:

$$C_{sc} = \frac{2W_1}{U_{dc\max}^2 - U_{dc\min}^2} = \frac{2 \cdot 5.639 \cdot 10^7}{540^2 - 270^2} = 515.68 \text{ Ф}. \quad (2.37)$$

Збирати батарею будемо із суперконденсаторів типу [63] PR9000F05R3-111W245L-T з наступними параметрами, табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Параметри суперконденсатора

Параметр	Значення
Напруга U_{sc} , В	4.2
Ємність C_{sc} , Ф	9000
Маса m_{sc} , кг	0.225
Габаритні розміри $L_{sc} \times W_{sc} \times H_{sc}$, мм	$245 \times 2.3 \times 111$
Вартість Q_{sc} , \$	72

Кількість паралельних гілок суперконденсаторів [64]:

$$N_{sc} = \frac{U_{dc}}{U_{sc}} = \frac{540}{4.2} = 128.57 \approx 128 \text{ гілок}. \quad (2.38)$$

Кількість послідовних суперконденсаторів [64]:

$$N_I = \frac{CN_{\text{parallel}}}{C_{SC}} = \frac{515.68 \cdot 128}{9000} = 7.33 \approx 8 \text{ шт.} \quad (2.39)$$

Тобто загалом необхідно:

$$N_{\Sigma} = N_{SC} \cdot N_I = 128 \cdot 8 = 1024 \text{ шт.} \quad (2.40)$$

Загальна маса суперконденсаторної батареї:

$$m_{SC \Sigma} = N_{\Sigma} \cdot m_{SC} = 1024 \cdot 0.225 = 230.4 \text{ кг.} \quad (2.41)$$

Об'єм батареї суперконденсаторів:

$$V_{SC \Sigma} = L_{SC} W_{SC} H_{SC} N_{\Sigma} = 245 \cdot 2.3 \cdot 111 \cdot 1024 \approx 0.064 \text{ м}^3, \quad (2.42)$$

Вартість батареї суперконденсаторів:

$$Q_{SC \Sigma} = Q_{SC} \cdot N_{\Sigma} = 72 \cdot 1024 = \$73728. \quad (2.43)$$

Висновки до розділу

1. Здійснено аналіз технічних даних RENAULT LOGAN та складена таблиця характеристик, що необхідні для подальших розрахунків.
2. Складена діаграма зусиль, які діють на транспортний засіб. Розрахований закон зміни тягового зусилля опираючись на задані параметри та припущення.
3. Використовуючи типовий driving cycle для їзди в місті була знята навантажувальна діаграма. По максимальному моменту навантаження (400 Н·м) було вибрано СДПМ EMRAX 268, яких підходить по попереднім вимогам та розрахункам.
4. Розраховано діаграми потужності електродвигуна при врахуванні та без врахування рекуперації, на основі них побудовані графіки енергії. Графік енергії без рекуперації використаний для вибору акумуляторної батареї. Суперконденсатори здані приймати енергію рекуперації, тому при виборі суперконденсаторів був застосований відповідний графік енергії.

5. Значення ємності акумуляторної батареї сягає 69.74 А·год, напруга батареї 540 В, що відповідає напрузі ланки постійного струму. Встановлено, що для забезпечення запасу ходу в 200 км необхідно використати АКБ на базі Shenzhen GTech LiFePO₄ 3.2V 25Ah елементів в кількості 507 шт., при цьому маса батареї складає 319.41 кг, об'єм 0,17 м³, вартість \$15002.13.
6. Значення ємності суперконденсаторної батареї сягає 515.68 Ф, напруга батареї, відповідно, 540 В. В ході розрахунків було вибрані елементи PR9000F05R3-111W245L-T в кількості 1024 шт. Сумарна вартість елементів дорівнює \$73728.
7. Суперконденсатори в порівнянні з АКБ мають досить високу ціну, тому будувати тягову батарею суто на суперконденсаторах не є доцільним рішенням. Проте, на думку автора, найближчому майбутньому баланс сил може змінитися в сторону суперконденсаторів, так як згідно з розрахунків батарея суперконденсаторів має менший загальний об'єм батареї, тобто тотальної переваги акумуляторних батарей в 2022 р. вже немає

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ КООРДИНАТАМИ ПРИВОДНОГО ДВИГУНА ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Здійснено аналіз існуючих способів керування СДПМ. На основі сучасних тенденцій був вибраний алгоритм векторного прямого керування моментом, так як в більшості випадів в електромобілях використовується керування моментом.

Нижче наведено систему керування, на основі джерел [65 – 69].

Динамічна модель неявнополюсного синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів, за умов симетричного живлення, визначається рівняннями (3.1):

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c - v\omega), \\ M &= k_M (-i_{1a} \sin p_n \theta + i_{1b} \cos p_n \theta), \\ \dot{i}_{1a} &= L_1^{-1} (-R_1 i_{1a} + (L_m i_f p_n) \omega \sin p_n \theta + u_{1a}), \\ \dot{i}_{1b} &= L_1^{-1} (-R_1 i_{1a} - (L_m i_f p_n) \omega \cos p_n \theta + u_{1b}),\end{aligned}\tag{3.1}$$

де $(i_{1a}, i_{1b})^T$, $(u_{1a}, u_{1b})^T$ – компоненти векторів струму та напруги статора, M – момент двигуна, M_c – момент навантаження, θ , ω – кутове положення та кутова швидкість ротора відносно статора, v – коефіцієнт в'язкого тертя, i_f – струм фіктивного джерела струму, що схематизує дію постійних магнітів, L_m – індуктивність контуру намагнічування, L_1 – індуктивність статорної обмотки, R_1 – активний опір статора, k_M – коефіцієнт моменту, p_n – число пар полюсів, $k_M = \frac{3}{2} L_m i_f p_n = \text{const}$ – коефіцієнт моменту.

Перетворення Парка–Горєва – перехід від системи координат $(a - b)$ в $(d - q)$ виконується наступним чином:

$$\begin{aligned}x^{(d-q)} &= e^{-j p_n \theta} x^{(a-b)}, \\ x^{(a-b)} &= e^{j p_n \theta} x^{(d-q)},\end{aligned}\tag{3.2}$$

де $x^{(y-z)}$ – визначає двомірні вектори напруг, струмів та потокозчеплень;

$$e^{-j p_n \theta} = \begin{bmatrix} \cos p_n \theta & \sin p_n \theta \\ -\sin p_n \theta & \cos p_n \theta \end{bmatrix}, \quad e^{j p_n \theta} = \begin{bmatrix} \cos p_n \theta & -\sin p_n \theta \\ \sin p_n \theta & \cos p_n \theta \end{bmatrix} - \text{матриці перетворення.}$$

Необхідно синтезувати алгоритм векторного керування моментом СД, який формує двомірний вектор напруг $u_1 = (u_{1a}, u_{1b})^T$ так, що задовольняються наступні цілі керування:

а) глобальне асимптотичне відпрацювання моменту та модуля вектору потокозчеплення, тобто:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0, \quad (3.3)$$

де похибки відпрацювання моменту та потокозчеплення визначені як:

$$\tilde{M} = M - M^*, \quad \tilde{\psi} = \psi - \psi^*, \quad (3.4)$$

де M^* – задана траєкторія момент, ψ^* – задана траєкторія потокозчеплення;

б) розв'язаність процесів керування моментом та потокозчепленням, тобто з $\tilde{\psi}(0) = 0$ слідує $\tilde{\psi}(t) = 0 \forall t \geq 0$.

Додатково вимагається гарантувати невинродженість алгоритму керування та обмеженість усіх його внутрішніх змінних.

Для подальшого розгляду визначимо також вектор потокозчеплення, що має регулюватися згідно цілей керування моментом та потокозчепленням (3.3).

Вектор потокозчеплення статора визначається рівнянням:

$$\psi_1 = \begin{pmatrix} \psi_{1a} \\ \psi_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix} + L_m i_f \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

З рівнянь потокозчеплень (3.5), після перетворення в систему координат ротора, отримаємо

$$\psi_{1d} = L_m (i_{1a} \cos p_n \theta + i_{1b} \sin p_n \theta) + L_m i_f, \quad (3.6)$$

або

$$\psi_{1d} = L_1 i_{1d} + L_m i_f. \quad (3.7)$$

За умови

$$i_{1d} = 0 \quad (3.8)$$

потік статора ψ_{1d} буде визначатися тільки струмом фіктивного джерела струму $i_f = \text{const}$, який схематизує дію постійних магнітів. При цьому вектори i_1 та i_f ортогональні, як це показано на рис. 3.1

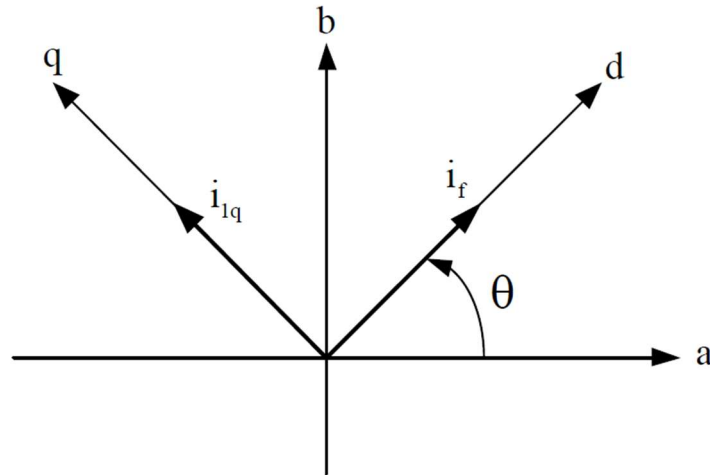


Рисунок 3.1 – Просторове розташування векторів СД зі збудженням від постійних магнітів

Оскільки для неявнополюсного СД вираз для моменту не залежить від прямої компоненти вектора струму статора i_{1d} , то регулювання струму здійснюється на основі розгляду в якості вихідної координати потокозчеплення статора по осі (d) (3.6), тобто гарантується виконання умови (3.3) з його заданим значенням

$$\psi_1^* = L_1 i_{1d}^* + L_m i_f, \quad (3.9)$$

де i_{1d}^* – задане значення струму i_{1d} .

З рівнянь (3.8) та (3.9) похибка відпрацювання потокозчеплення статора по осі (d) буде

$$\tilde{\psi}_1 = \psi_{1d} - \psi_1^* = L_1 \tilde{i}_{1d}, \quad (3.10)$$

де $\tilde{i}_{1d} = i_{1d} - i_{1d}^*$, $i_{1d}^* = 0$.

Використовуючи перетворення (3.2) перепишемо рівняння моменту з системи (3.1):

$$M = k_M i_{1q}. \quad (3.11)$$

Виходячи з рівняння моменту (3.11) запишемо керуючу дію по осі (q) у вигляді

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{M^*}{k_M}, \quad (3.12)$$

що слідує з розгляду рівняння $M = M^* + \tilde{M} = k_M(\dot{i}_{1q}^* + \dot{i}_{1d}^*)$, де $\tilde{i}_{1q} = i_{1q} - i_{1q}^*$ – похибка відпрацювання моментної компоненти вектора струму.

З (3.9) – (3.12) похибки відпрацювання (3.4) запишуться у вигляді:

$$\tilde{y}_1 = \begin{pmatrix} \tilde{\psi}_1 \\ \tilde{M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 \tilde{i}_{1d} \\ k_M \tilde{i}_{1q} \end{pmatrix}. \quad (3.13)$$

Розглядаючи динамічну модель СД (3.1) та рівняння (3.6) вихідних координат, які мають керуватися, встановлюємо, що це є нелінійний об'єкт четвертого порядку. Позбавимось залежності рівнянь динаміки СД (3.1), (3.6) від кутового положення за рахунок перетворення Парка–Горева (3.2).

Після перетворень модель СД запишеться у наступній формі:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c - v\omega), \\ M &= k_M \dot{i}_{1q}, \\ \dot{i}_{1d} &= -\frac{R_1}{L_1} i_{1d} + p_n \omega i_{1q} + \frac{1}{L_1} u_{1d}, \\ \dot{i}_{1q} &= -\frac{R_1}{L_1} i_{1q} - p_n \omega i_{1d} - \frac{L_m}{L_1} i_f p_n \omega + \frac{1}{L_1} u_{1q}, \\ \psi_{1d} &= L_1 i_{1d} + L_m i_f. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Структурну схему СД та розташування просторових векторів, що відповідає рівнянням (3.14), представлено на рис. 3.2 а) та 3.1 б) відповідно.

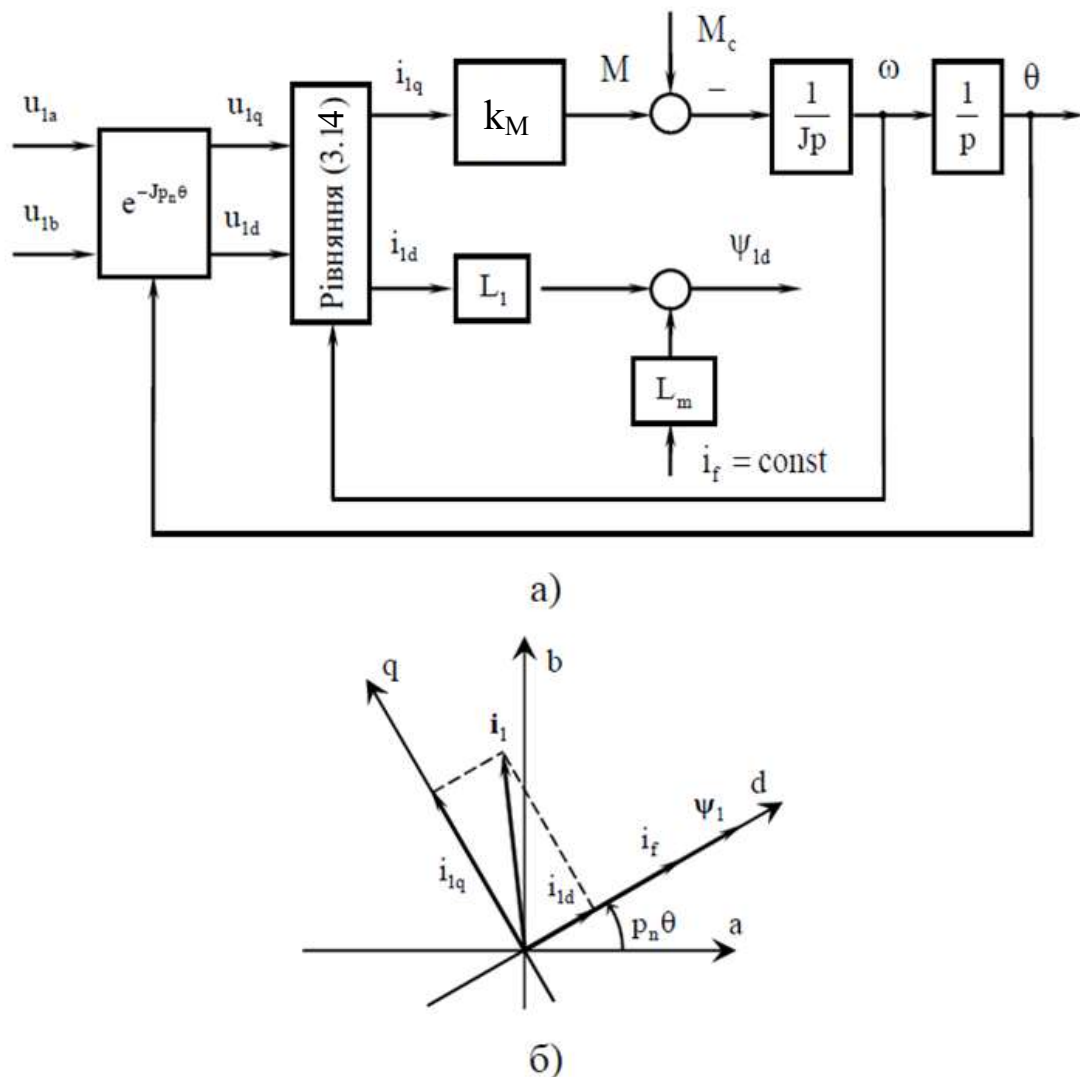


Рисунок 3.2 – Структурна схема СД зі збудженням від постійних магнітів та розташування векторів в системі координат ротора

Порівнюючи рівняння СД в фізичних двофазних координатах (3.1), (3.6) та в координатах ротора (3.14) встановлюємо:

1. Рівняння СД, що записані в системі координат ротора, не залежать від кутового положення, але лишаються нелінійними.
2. Рівняння моменту лінійне відносно ортогональної до напрямку i_f компоненти струму статора i_{1q} і не є залежним від компоненти i_{1d} ; воно формально співпадає з рівнянням моменту двигуна постійного струму.

3. Потокзчеплення статора ψ_{ld} лінійне відносно прямої компоненти струму статора i_{ld} .

Сформувавши вектор напруг статора в (3.14) у вигляді

$$\begin{pmatrix} u_{ld} \\ u_{lq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L_l p_n \omega i_{lq} - v_d \\ L_l p_n \omega i_{ld} + v_q \end{pmatrix}, \quad (3.15)$$

отримаємо

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c - v\omega), \\ M &= k_M i_{lq}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{lq} &= -\frac{R_l}{L_l} i_{lq} - \frac{L_m}{L_l} i_f p_n \omega + \frac{1}{L_l} v_q, \\ \psi_{ld} &= L_l i_{ld} + L_m i_f, \\ \dot{i}_{ld} &= -\frac{R_l}{L_l} i_{ld} + \frac{1}{L_l} v_d. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Рівняння динаміки СД (3.16) та (3.17), які отримані в силу перетворення координат (3.2) та дії нелінійного керування (3.15) є лінійними. При цьому система рівнянь (3.16) описує електромеханічну підсистему СД. Рівняння (3.17) описують електромагнітну підсистему СД. Дві підсистеми – електромеханічна та електромагнітна, як це видно з рівнянь (3.16) і (3.17), є розв'язаними. Перше рівняння в (3.17) відображає специфіку формування потокзчеплення ψ_{ld} в розглянутому типі СД за рахунок дії постійних магнітів $L_m i_f$ та компоненти струму статора i_{ld} . Алгоритм керування, який перетворює нелінійну модель СД (3.1) – (3.6) до лінійної повністю керованої форми (3.16) – (3.17), задається перетвореннями координат:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u_{la} \\ u_{lb} \end{pmatrix} &= e^{J p_n \theta} \begin{pmatrix} -L_l p_n \omega i_{lq} - v_d \\ L_l p_n \omega i_{ld} + v_q \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{pmatrix} &= e^{-J p_n \theta} \begin{pmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} v_q &= R_l \dot{i}_{lq}^* + L_m \dot{i}_f p_n \omega + L_l (\dot{i}_{lq}^* - k_{iq1} \tilde{i}_{l1} - x_q), \\ \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_{lq}, \end{aligned} \quad (3.20)$$

де x_q – інтегральна складова по осі (q), $(k_{iq1}, k_{iiq}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора.

Керуюча дія регулятора струму v_d має вигляд:

$$\begin{aligned} v_d &= R_l \dot{i}_{ld}^* + L_l (\dot{i}_{ld}^* - k_{idl1} \tilde{i}_{ld} - x_d), \\ \dot{x}_d &= k_{iid} \tilde{i}_{ld}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

де x_d – інтегральна складова по осі (d), $(k_{idl1}, k_{iid}) > 0$.

Підстановка (3.20), (3.21) в (3.16), (3.17) дає наступні рівняння похибок відпрацювання:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{i}}_{ld} &= -k_{id} \tilde{i}_{ld} - x_d, \\ \dot{x}_d &= k_{iid} \tilde{i}_{ld}, \\ \dot{\tilde{i}}_{lq} &= -k_{iq} \tilde{i}_{lq} - x_q, \\ \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_{lq}, \\ \begin{pmatrix} \tilde{\Psi}_1 \\ \tilde{M} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} L_l \tilde{i}_{ld} \\ k_m \tilde{i}_{lq} \end{pmatrix}, \\ k_{id} &= \frac{R_l}{L_l} + k_{idl1}, \quad k_{iq} = \frac{R_l}{L_l} + k_{iq1}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Лінійні системи другого порядку в (3.22), які описують динаміку контурів регулювання струмів, асимптотично стійкі при усіх $(k_{id}, k_{iq}, k_{iid}, k_{iiq}) > 0$, тому за умови $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_{ld}, \tilde{i}_{lq}) = 0$ слідує $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\Psi}_1, \tilde{M}) = 0$. Таким чином з виразів (3.22) встановлюємо, що відпрацювання потокозчеплення і моменту зводиться до задачі відпрацювання прямої i_{ld} і квадратурної i_{lq} компонент струму статора.

Оптимізація динаміки похибок відпрацювання моменту та потокозчеплення (струмів статора) забезпечується за рахунок вибору коефіцієнтів пропорційної k_{iq}, k_{id} та інтегральної k_{iiq}, k_{iid} дії регуляторів струму (3.20), (3.21), щодо стандартної лінійної системи другого порядку. Для

стандартних налаштувань з коефіцієнтами демпфування $\xi = 0.707$ та $\xi = 1$ використовується розрахунок згідно співвідношень:

$$\begin{aligned} k_{iiq} &= \frac{k_{iq}^2}{2} \quad (\xi = 0.707), \\ k_{iiq} &= \frac{k_{iq}^2}{4} \quad (\xi = 1). \end{aligned} \quad (3.23)$$

Якщо в початковий момент часу $x_q(0) = 0$, $\tilde{i}_q(0) = 0$, тоді $x_q(t) = \tilde{i}_q(t) = 0 \forall t \geq 0$, тобто відпрацювання заданої траєкторії моменту досягається без похибок.

Рівняння руху механічної частини СД при цьому дорівнює:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M^* + \tilde{M} - M_c). \end{aligned} \quad (3.24)$$

Оскільки рівняння моменту досліджуваного СД не залежить від прямої компоненти i_{ld} струму статора, то мета керування моментом досягається без специфікації динамічної поведінки цієї компоненти струму статора. Це є наслідком структури СД зі збудженням від постійних магнітів: за допомогою трьох керуючих дій $u_1 = (u_{1a}, u_{1b})^T$, $i_f = \text{const}$ необхідно керувати двома вихідними координатами – моментом та потокозчепленням, згідно рівнянь (3.17). Сучасна теорія керування, такі об'єкти класифікує як такі, що мають надлишковість керування. Звичайно для таких об'єктів надлишкові ступені свободи можуть бути використані для досягнення додаткових цілей керування, наприклад, підвищення енергетичної ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії та інших. Так в СД зі збудженням від постійних магнітів мінімальні втрати активної потужності досягаються при виконанні умови:

$$P_{alos} = R_1(i_{1q}^2 + i_{1d}^2) = \min, \quad (3.25)$$

тобто за умови $i_{1d} = 0$. При цьому вектори i_1 та i_f ортогональні (Рис. 3.3б), аналогічно тому, а потокозчеплення статора формується лише дією постійних

магнітів, тобто за рахунок струму збудження $i_f = \text{const.}$. Умова $i_{ld} = 0$. в системах векторного керування СД використовується при швидкостях нижче номінальної.

При роботі із кутовими швидкостями вище номінальної ω_n структура СД дозволяє забезпечити ослаблення модуля потокозчеплення статора $|\psi_1|$ за рахунок $i_{ld} < 0$. Розглянемо статичне рівняння електричної рівноваги статорного кола по осі q (див.(3.14)):

$$u_{1q} = R_1 i_{1q} + p_n \omega (L_1 i_{ld} + L_m i_f). \quad (3.26)$$

Якщо в (3.26) $i_{ld} = 0$, то необхідна напруга u_{1q} зростає пропорційно кутовій швидкості, в той час як регулювання прямої компоненти струму статора за законом:

$$L_1 i_{ld} = L_m i_f \left(\left| \frac{\omega_n}{\omega} \right| - 1 \right), \quad (3.27)$$

при $|\omega| > \omega_n$, забезпечує стабілізацію компоненти u_{1q} в (3.27) відносно зростання кутової швидкості.

Визначивши заданий закон зміни потокозчеплення ротора як:

$$\psi_1^* = L_1 i_{ld}^* + L_m i_f, \quad (3.28)$$

рівняння похибок відпрацювання набувають вигляду (3.13).

Повний алгоритм відпрацювання моменту вміщує:

- регулятор моменту (3.12)

$$\begin{aligned} i_{1q}^* &= \frac{M^*}{k_M}, \quad k_M = \frac{3}{2} L_m i_f p_n, \\ i_{1q}^* &= \frac{\dot{M}^*}{k_M}; \end{aligned} \quad (3.29)$$

- регулятор потокозчеплення, враховуючи (3.8)

$$i_{ld}^* = 0; \quad (3.30)$$

- регулятори струму по осі d , враховуючи (3.30), тобто відсутня керуюча дія v_d (3.21)

$$u_{ld} = -\omega L_1 p_n i_{1q}; \quad (3.31)$$

та осі (q)

$$\begin{aligned} u_{1q} &= R_1 i_{1q}^* + L_m i_f \omega p_n + L_1 (i_{1q}^* - k_{iq1} \tilde{i}_{1q} - x_q), \\ \dot{x}_q &= k_{iiq} \tilde{i}_{1q}; \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{pmatrix} = e^{-j p_n \theta} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix}, \quad e^{-j p_n \theta} = \begin{bmatrix} \cos p_n \theta & \sin p_n \theta \\ -\sin p_n \theta & \cos p_n \theta \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

- напруги, що прикладаються до статора

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = e^{j p_n \theta} \begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix}, \quad e^{j p_n \theta} = \begin{bmatrix} \cos p_n \theta & -\sin p_n \theta \\ \sin p_n \theta & \cos p_n \theta \end{bmatrix}. \quad (3.34)$$

На рис. 3.4 представлено функціональну схему системи відпрацювання моменту, яка вміщує лінеаризуючий регулятор (3.18), регулятори потокозчеплення та моменту, а також регулятори струмів (3.20), (3.21).

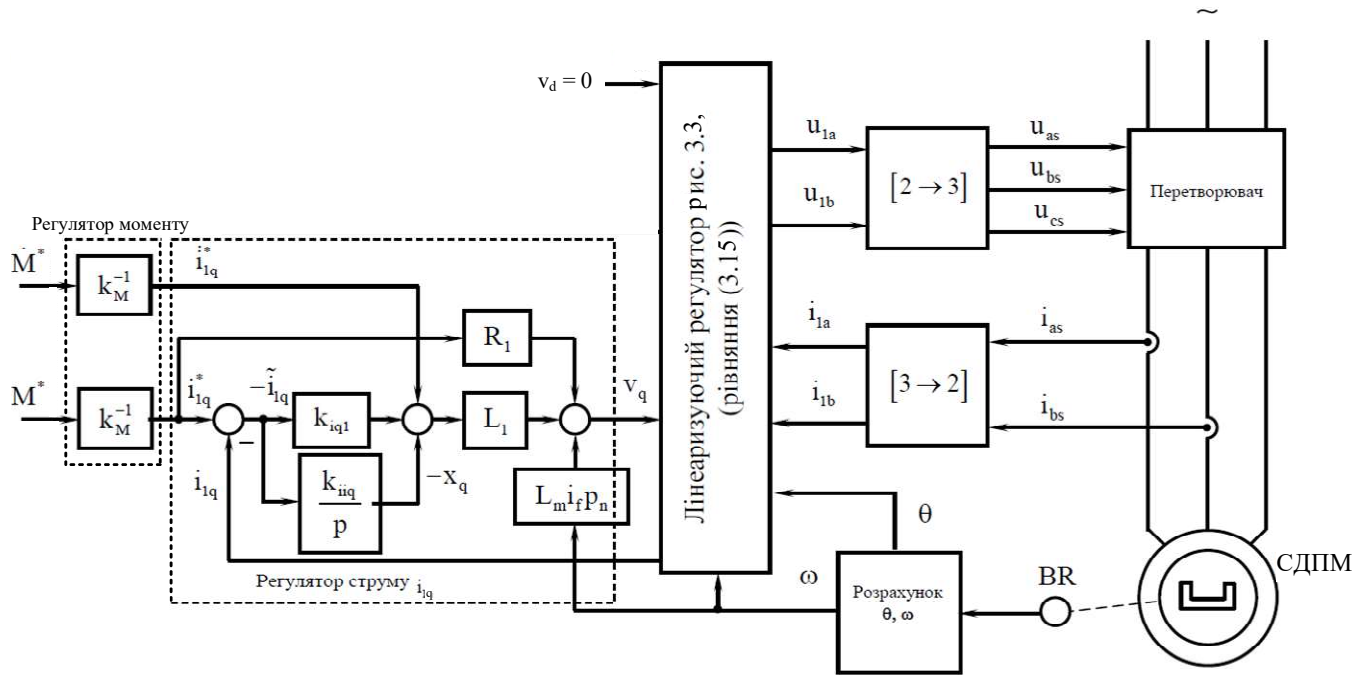


Рисунок 3.4 – Функціональна схема системи відпрацювання моменту та потокозчеплення статора СД

За рівняннями складено функціональну схему (Додаток Е).

Висновки до розділу

1. Здійснено аналіз існуючих способів керування синхронним двигуном. На основі сучасних тенденцій був вибраний алгоритм векторного прямого керування моментом, так як в більшості випадів в електромобілях використовується керування моментом.
2. Описана динамічна модель неявнополюсного синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів, за умов симетричного живлення.
3. Означені цілі керування, в досягненні яких синтезується алгоритм векторного керування моментом.
4. Переписана модель СД за допомогою перетворення Парка–Горєва та складена структурна схема двигуна на основі виведених рівнянь.
5. Векторне керування моментом СД описано за допомогою принципу розділення на електромеханічні та електромагнітну підсистеми.
6. Створено асимптотично лінеаризуючий регулятор за вимірюваним виходом, регулятор моменту, регулятор компонент струму статора по осі (d) та (q), регулятор модуля вектора потокозчеплення. Сформовано вектори напруги та струму статора. Досліджено основні співвідношення коефіцієнтів регуляторів.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Моделювання здійснюється за допомогою пакету MATLAB R2021b, де була зібрана модель векторного керування моментом СДПМ (Додаток Г).

В ході дослідження використовувалися параметри, які подані нижче.

Максимальна лінійна швидкість автомобіля $V_{\max} = 43.89$ м / с, відповідно, максимальна кутова швидкість двигуна буде:

$$\omega_{\max} = \frac{V_{\max} i_p}{r_k} = \frac{43.89 \cdot 3.8}{0.365} = 456.93 \approx 457 \text{ рад / с}, \quad (4.1)$$

тобто в тестах кутова швидкість двигуна має не перевищувати 457 рад/с.

Прийнято наступні коефіцієнти пропорційних та інтегральних складової регуляторів струму:

$$\begin{aligned} k_{iq1} &= k_{idl} = 700, \\ k_{iiq} &= k_{iid} = 120000, \end{aligned}$$

тобто виконується умова другого рівняння (3.23).

Коефіцієнт в'язкого тертя, що наведений в системі (3.1), виведено експериментально для відображення реальних умов і дорівнює $\nu = 0.005$.

Параметри R_l , L_l , $L_m i_f$, p_n взято з табл. 2.4.

Коефіцієнт моменту розраховується згідно з (3.29), враховуючи дані з табл. 2.4:

$$k_M = \frac{3}{2} L_m i_f p_n = \frac{3}{2} \cdot 0.06099 \cdot 10 = 0.91485.$$

Під час проведення тестів, враховується максимальна маса автомобіля $m_{\max} = 1491$ кг (табл. 2.1), відповідно використовується сумарне значення моменту інерції $J_{\Sigma} = 12.95$ кг · м², до якого входить момент інерції автомобіля та самого двигуна.

Модуль напруги не повинен перевищувати :

$$U_{m\max} = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}} = \frac{540}{\sqrt{3}} \approx 311 \text{ В.} \quad (4.2)$$

4.1 Дослідження системи при заданні максимально-допустимого моменту двигуна

Тест виконується за наступною послідовністю:

1. *Розгін.* На проміжок часу (2 – 2.01) с подається похідна $\dot{M}^* = 50000 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}}$, в результаті чого формується заданий момент $M^* = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$, який діє на інтервалі часу (2.01 – 12.9).
2. В результаті прикладання моменту двигун починає розганятися. До часу 12.9 с двигун досягає значення 414 рад/с (~ 143 км / год).
3. На проміжок часу (12.9 – 13) с подається від’ємна похідна $\dot{M}^* = -50000 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}}$, в результаті чого знімається заданий момент $M^* = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$.
4. Після скидання моменту двигун починає відносно повільно втрачати швидкість, внаслідок дії в’язкого-тертя.
5. *Гальмування.* На проміжок часу (18 – 18.01) с подається похідна $-\dot{M}^*$, в результаті чого формується заданий момент $-M^*$, який діє на інтервалі часу (18.01 – 28.19).
6. В результаті прикладання моменту двигун починає гальмувати. До часу 28.19 с двигун досягає значення 0 рад/с.
7. На проміжок часу (28.19 – 28.2) с подається похідна $\dot{M}^*$, в результаті чого знімається заданий момент $-M^*$. Двигун зупиняється.

В результаті виконання вище описаного тесту отримано графіки перехідних процесів, що показані на рис. 4.1

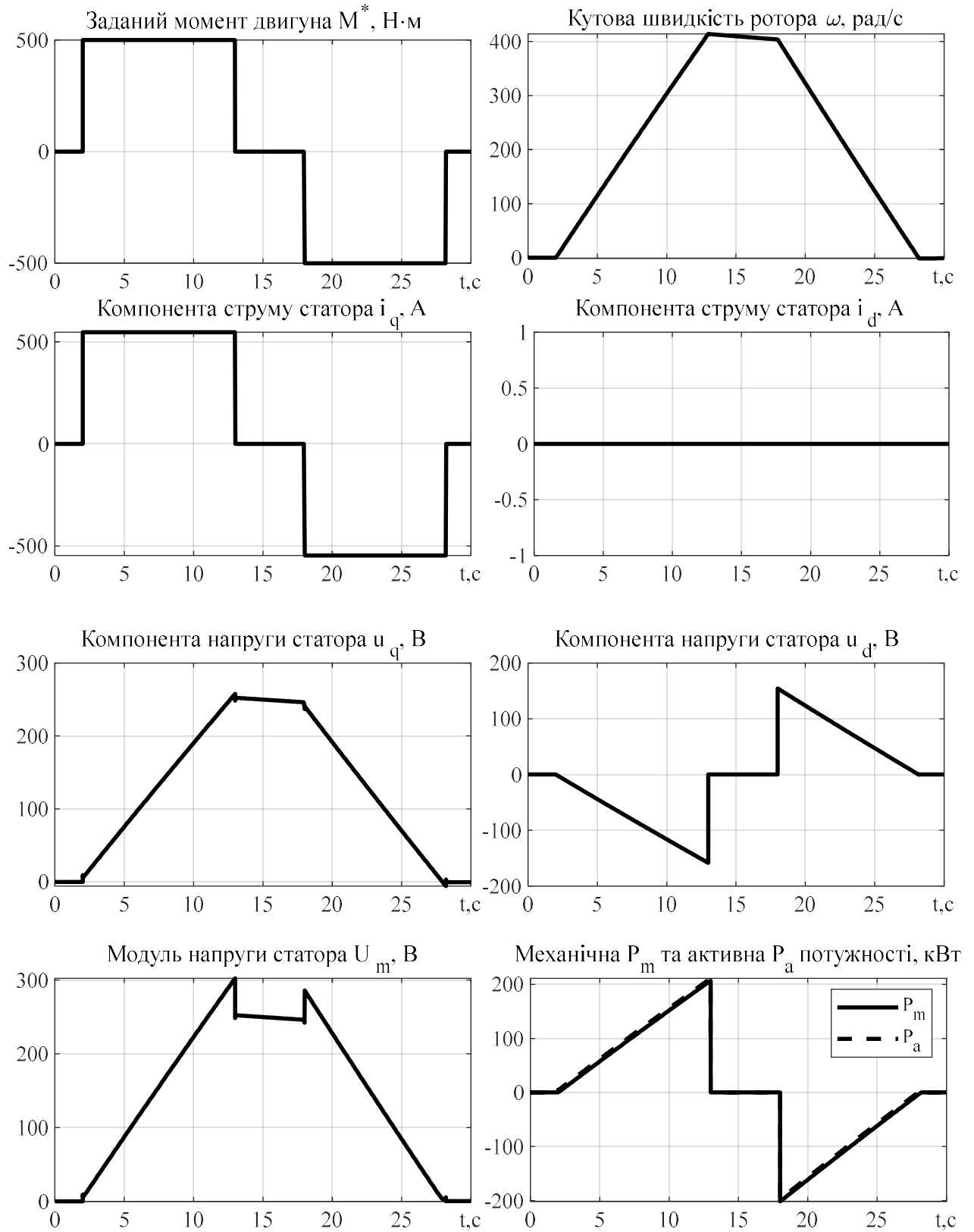


Рисунок 4.1 – Графіки перехідних процесів при завданні максимально-допустимого моменту двигуна

Згідно з даних рис. 4.1, відбувається відпрацювання заданої траєкторії моменту M^* , що видно з графіку компоненти струму статора i_q , яка повністю повторює профіль моменту. Внаслідок прикладання моменту двигун починає розганятися до швидкості, що не перевищує максимальну $\omega_{\text{макс}}$. Польова компонента струму статора i_d є нульовою, так як подається нульове задання, згідно з (3.30). Модуль напруги статора U_m не перевищує 311 В. Похибки відпрацювання моменту та компоненти i_q асимптотично збігаються в нуль. Це видно, якщо подивитися на траєкторію відпрацювання моментної компоненти i_q , яка повністю повторює заданий момент M^* , а M^* та i_q та їх похідні є пропорційними через коефіцієнт моменту k_M (3.29). Польова компонента i_d є нульовою, згідно графіку, тобто також відбувається безпомилкове відпрацювання, згідно завдання $i_d^* = 0$, тобто, можна сказати, що система вдало налаштована. Пікове значення споживаної потужності – 200 кВт, що збігається із значенням максимальної потужності в технічних характеристиках до двигуна.

Як можна побачити з графіків потужності, механічна та активна потужності майже однакові, що візуалізує високий ККД двигуна ($\sim 98\%$).

На практиці формування додатного моменту формується завдяки натискання водієм педалі «газ», а від’ємного – відповідно, педаллю «гальмування», тобто подача значення заданого моменту $|M^*|$ означає повністю натиснуту педаль.

4.2 Дослідження системи при заданні номінального моменту двигуна

Тест виконується за наступною послідовністю:

1. *Розгін.* На проміжок часу (2 – 2.01) с подається похідна $\dot{M}^* = 21300 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}}$, в результаті чого формується заданий момент $M^* = 213 \text{ Н} \cdot \text{м}$, який діє на інтервалі часу (2.01 – 30.9).
2. В результаті прикладання моменту двигун починає розганятися. До часу 30.9 с двигун досягає значення 444 рад/с (~153 км/год).
3. На проміжок часу (30.9 – 31) с подається від'ємна похідна $\dot{M}^* = -21300 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}}$, в результаті чого знімається заданий момент $M^* = 213 \text{ Н} \cdot \text{м}$.
4. Після скидання моменту двигун починає відносно повільно втрачати швидкість, внаслідок дії в'язкого-тертя.
5. *Гальмування.* На проміжок часу (41 – 41.01) с подається похідна $-\dot{M}^*$, в результаті чого формується заданий момент $-M^*$, який діє на інтервалі часу (41.01 – 64.9).
6. В результаті прикладання моменту двигун починає гальмувати. До часу 64.9 с двигун досягає значення 0 рад/с.
7. На проміжок часу (64.9 – 65) с подається похідна $\dot{M}^*$, в результаті чого знімається заданий момент $-M^*$. Двигун зупиняється.

В результаті виконання вище описаного тесту отримано графіки перехідних процесів, що показані на рис. 4.2

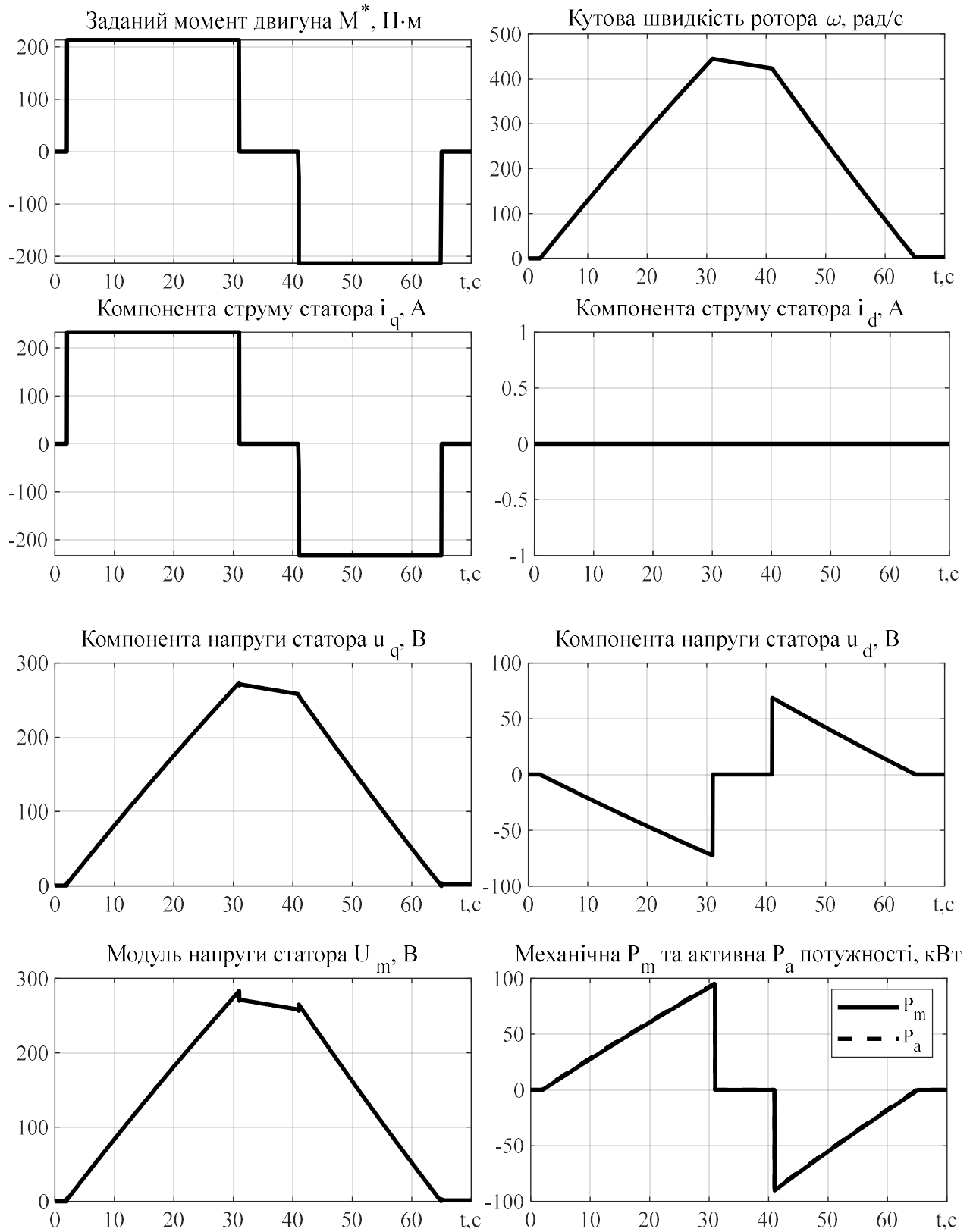


Рисунок 4.2 – Графіки перехідних процесів при завданні номінального моменту двигуна

Згідно з даних рис. 4.2, відбувається відпрацювання заданої траєкторії моменту M^* , що видно з графіку компоненти струму статора i_q , яка повністю повторює профіль моменту.

В цілому картина схожа як в минулому тесті. Пікове значення споживаної потужності – 100 кВт, що збігається із значенням номінальної потужності в технічних характеристиках до двигуна.

4.3 Визначення експлуатаційних характеристик транспортного засобу

Максимальний подоланий ухил – це граничний кут щодо горизонту тієї поверхні, по якій здатний рухатися автомобіль без сторонньої допомоги, тобто, гранична крутизна схилу, на який може в'їхати автомобіль [70].

Сучасні вантажні автомобілі на малих швидкостях переборюють ухил до 20–25% [71]; проте на практиці, поздовжні ухили для більшості доріг не більш 10%, тому що більш круті підйоми викликають швидкий знос двигунів, а при слизькій поверхні можуть призвести до буксування коліс автомобіля. Коли ухили поверхні землі перевищують максимально допустимі значення, то необхідно передбачати або розвиток траси, або певних обсягів виїмок і насипів.

Розраховуємо залежність кута ухилу α від маси автомобіля m і моменту M , який утворюється внаслідок появи сили F_{mg} (2.7):

$$F_{mg} = m_{\max} \cdot g \cdot \sin \alpha,$$

звідси

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{F_{mg}}{mg} \right). \quad (4.3)$$

Щоб подолати силу F_{mg} , необхідно створити момент на колесі згідно з (2.13):

$$M_{mg \text{ к}} = F_{mg} r_{\text{к}}, \quad (4.4)$$

тобто

$$F_{mg} = \frac{M_{mg \kappa}}{r_{\kappa}}. \quad (4.5)$$

Тоді момент, який має розвинути двигун згідно з (2.14):

$$M_{дв} = \frac{M_{mg \kappa}}{i_p \eta_p} \quad (4.6)$$

Отже, кут α враховуючи (2.7), (4.3), (4.5), (4.6) дорівнює:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{M_{дв} i_p \eta_p}{r_{\kappa} mg}\right) = \arcsin\left(\frac{M_{дв} \cdot 3.81 \cdot 0.97}{0.365 \cdot m \cdot 9.81}\right) = \arcsin\left(\frac{1.032 M_{дв}}{m}\right). \quad (4.7)$$

В залежність **Помилка! Джерело посилання не знайдено.** вирішено підставляти значення M в інтервалі $0 \div 400 \text{ Н} \cdot \text{м}$, що відповідає робочому діапазону двигуна, так як даний вид навантаження двигуна (робота на ухил) може характеризуватися тривалим часом роботи. А як відомо з технічних даних двигуна [51] моментом навантаження значенням $M = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$ можна навантажувати лише декілька секунд. В додаток до цього, необхідно генерувати додатковий момент для того щоб набрати швидкість, а також компенсувати дію в'язкого тертя.

Дослідження виконується для трьох значень маси автомобіля: $m_1 = 1200 \text{ кг}$ – споряджений автомобіль з водієм 75 кг , $m_2 = 1350 \text{ кг}$ – споряджений автомобіль з водієм 75 кг та двома пасажирями по 75 кг , $m_3 = m_{\max} = 1491 \text{ кг}$ – максимальна маса автомобіля.

Ухили доріг вимірюються в *промиле* – тисячна частина числа, або десята частина відсотка, позначається ‰.

В автомобільних дорогах кут ухилу дороги 45° – це максимальний ухил, тобто 100%, відповідно це буде 1000‰.

Звідси виникає наступна залежність:

$$1\text{‰} = 0.045^\circ \quad (4.8)$$

Промодельовавши вище наведені умови та беручи до уваги (4.8), отримано наступні залежності (рис. 4.3).

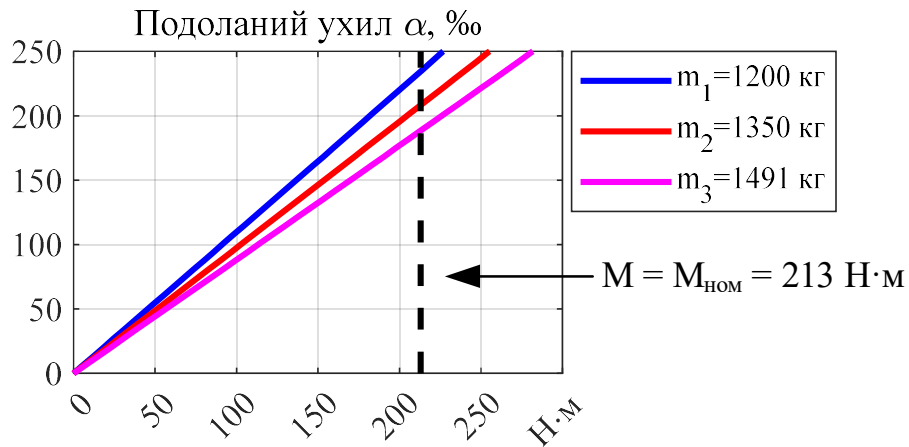


Рисунок 4.3 – Графіки залежності подоланого ухилу $\alpha = f(M, m)$

Аналізуючи рис. 4.3, бачимо, що для подолання ухилу 200 ‰ при масі автомобіля 1350 кг, необхідно розвинути двигуном номінальне значення моменту $M = M_{\text{ном}} = 213$ Н·м.

Чим більша маса автомобіля, тим більший момент необхідно розвинути двигуну, щоб подолати силу тяжіння. В цілому маса автомобіля не сильно впливає, адже розкид графіків для різних мас є незначним. І, відповідно, електродвигун задовольняє умову можливості руху при ухилі 20 – 25 % (200 – 250 ‰), не сильно перевантажуючись.

Можна сказати, що на кожну додаткову одиницю проміле ухилу припадає одиниця моменту, який утворюється, у зв'язку з силою тяжіння, що діє на автомобіль. Така зручна лінійна залежність може бути зручною для програмування алгоритму керування двигуном.

Наступною характеристикою, якою володіє автомобіль – це час, за який він розганяється до 100 км/год t_p .

Перехід від кутової швидкості двигуна в рад/с до лінійної швидкості автомобіля в км/год здійснюється наступним чином:

$$V = \frac{3.6 r_k \omega_{\text{дв}}}{i_p}. \quad (4.9)$$

Провівши моделювання, в результаті якого задавалися моменти в діапазоні $100 \div 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$, так як в зона низьких моментів не буде використовуватися для розгону транспортного засобу.

Результати моделювання відображені на рис. 4.4.

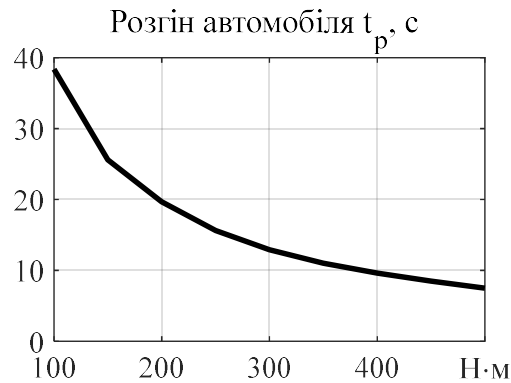


Рисунок 4.4 – Залежність часу розгону автомобіля до 100 км/год від заданого моменту

Аналізуючи рис. 4.4, можна побачити, що закон зміни часу розгону набуває гіперболічного характеру. В точці значення номінального моменту ($213 \text{ Н} \cdot \text{м}$) двигун розганяється за $\sim 18 \text{ с}$.

Згідно з технічними даними на автомобіль (табл. 2.1), час розгону $t_{100} = 15.1 \text{ с}$. Щоб досягти такого значення розгону, використовуючи електродвигун, необхідно задати момент близько $250 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Розігнатися можна ще швидше, приклавши момент більше $250 \text{ Н} \cdot \text{м}$, при $M^* = 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$, автомобіль досягне швидкісної відмітки у 100 км/год за 8 с , але слід брати до уваги, що при такому значенні моменту, сам двигун може працювати лише кілька секунд. Було б доцільно це врахувати в системі керування двигуном, що повністю натиснута педаль віддавали перші 3 с максимальний момент, а потім система обмежувала момент, скажімо, до $400 \dots 450 \text{ Н} \cdot \text{м}$. В цілому, в діапазоні моментів $300 \dots 400 \text{ Н} \cdot \text{м}$, автомобіль розганяється за $13 \dots 10 \text{ с}$ відповідно. Це демонструє досить пристойні швидкісні показники автомобіля. Також, не слід

забувати що моделювання проводилося на повністю завантаженому автомобілі, а показник t_{100} знімався при меншій масі автомобіля.

Висновки до розділу

1. На основі рівнянь в розділі 3, створено математичну модель в середовищі MATLAB Simulink.
2. Було виконано два тести для двигуна, при подачі максимального ($500 \text{ Н} \cdot \text{м}$) та номінального ($213 \text{ Н} \cdot \text{м}$) моменту двигуна. Система відпрацювала чітко траєкторію. Двигун розігнався до швидкості, що не перевищує максимальну $\omega_{\text{макс}}$. Модуль напруги статора U_m не перевищує 311 В – максимальне значення, що може видати інвертор. Пікове значення споживаної потужності – 200 кВт і 100 кВт відповідно, що збігається із значенням максимальної потужності в технічних характеристиках до двигуна.
3. Визначено максимальний ухил дороги, при якому може рухатися транспортний засіб. Розрахований автомобіль на основі СДПМ EMRAX 268 може долати ухили близько $200 - 250\%$, що характеризується в гірській місцевості. В реальних умовах України, де ми маємо, в основному, пологий рельєф в місті, або за містом автомобіль буде долати будь-які ухили без великих проблем і, навіть, набирати швидкість. Завантаженість автомобіля майже не впливає на величину можливого ухилу.
4. Побудовано залежність часу розгону автомобіля до 100 км/год від заданого моменту. Графік демонструє хороші швидкісні показники для даного класу транспортних засобів. При подачі номінального моменту ($213 \text{ Н} \cdot \text{м}$) авто розганяється до 100 км/год за 18 с , а якщо двигун трішки перевантажити, то подавши значення $350 \text{ Н} \cdot \text{м}$ до сотні можна дійти вже за 10 с .

5 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ТА КЕРУЮЧОГО КОНТРОЛЕРА

5.1 Розробка функціональної схеми електромеханічної системи транспортного засобу

Для того, щоб розробити електромеханічну систему транспортного засобу та відповідно вибрати елементну базу необхідно скласти функціональну схему синхронного електроприводу.

Електромеханічна система включає в себе силову частину та мікроконтролеру.

До силової схеми входить, враховуючи особливості розробленого електромобіля:

- акумуляторна батарея;
- варистор;
- зарядне коло конденсаторного фільтру;
- конденсаторний фільтр;
- автономний інвертор;
- драйвери;
- гальванічні розв'язки;
- давачі струму та напруги;
- енкодер;
- запобіжник;
- педаль;
- панель оператора;
- блоки живлення.

Акумуляторна батарея – призначена для живлення всієї системи транспортного засобу.

Варистор – виконує функцію захисту від перенапруг, які можуть виникати в ланці постійного струму під час перехідних процесів.

Зарядне коло конденсаторного фільтра – необхідне для обмеження струму заряду конденсаторного фільтра в початковий момент часу.

Конденсаторний фільтр – використовується для згладжування пульсацій, що виникають під час комутування плечей інвертора.

Інвертор призначений для того щоб перетворювати постійну напругу ланки постійного струму у задану трифазну напругу. Результируючий вектор цієї напруги, що знаходиться на виході перетворювача, має задані параметри: модуль, частоту та кутове положення. Щоб замикати індуктивності, що наводяться в перехідних процесах – використовуються антипаралельні діоди.

Драйвери – призначені для того, щоб забезпечити необхідний рівень напруги на базі IGBT транзистора для його надійного закриття та відкриття.

Гальванічні розв'язки – призначення для розділення живлення силової частини і схеми керування, здала уникнення електромагнітних наводок.

Давачі струму – вимірюють струми на фазах, що підходять до двигуна та передають інформацію в мікроконтролер.

Давач напруги – вимірює напругу в ланці постійного струму та передає цю інформацію в мікроконтролер.

Енкодер – давач кута повороту, що обертається, передаючи набір сигналів, які дозволяють визначити кут його повороту.

Запобіжник – захищає від струмів короткого замикання.

Педаль – пристрій для керування швидкістю електромобіля.

Панель оператора – служить для налаштування параметрів системи, подачі команд та завдання на регульовану величину в ручному режимі, спостереження за контрольними величинами та діагностики.

Блоки живлення – необхідні для живлення різноманітних пристроїв, яким потрібне як уніполярне так і біполярне живлення (± 15 В, +15 В, +5В, +3 В тощо).

Відповідно до схеми керуючого контролера входить:

- керуючий контролер;

- мікросхема пам'яті;
- годинник реального часу;
- USB- та CAN-інтерфейси;
- схеми узгодження аналогових сигналів від датчиків;
- мікросхеми-буфери для вхідних/вихідних сигналів;

Керуючий контролер – виконує всі операції автоматизації перетворювача: отримання завдання на регульовані координати, розраховує алгоритм керування двигуном, генерує імпульси керування ключами, реалізує захисні функції, здійснює комунікації з системами верхнього рівня.

Мікросхема пам'яті – призначена для розширення пам'яті контролера.

Годинник реального часу – мікросхема, яка відстежує поточний час. Використовується для різноманітних функцій.

USB-інтерфейс – використовується для передачі/прийманні інформації з ПК.

CAN-інтерфейс – призначений для зв'язку різного роду контролерів між собою. Він поєднує апаратний інтерфейс і з протоколом передачі даних, тобто підтримує одночасну роботу багатьох ведучих пристроїв. Це означає, що всі вузли CAN-мережі мають можливість передавати дані і декілька вузлів одночасно можуть давати запит на шину.

Схеми узгодження аналогових сигналів від датчиків – призначені для передачі необхідного рівня напруги на АЦП контролера.

Мікросхеми-буфери для вхідних/вихідних сигналів – використовуються узгодження напруги контролера 3.3 В або для підсилення напруги з виводів контролера до 5 В, відповідно.

Функціональну схему наведено в Додатку И.

5.1 Розрахунок та вибір основних елементів силової частини

5.1.1 Вибір варистора

Для захисту пристрою від перенапруги, рекомендовано використовувати варистор. Варистор – напівпровідниковий резистор, електричний опір якого нелінійно залежить від прикладеної електричної напруги.

Основний параметр за яким здійснюється вибір варистора, це класифікаційна напруга $U_{\text{кл}}$ – це така напруга, яка прикладена до виводів варистора, коли струм через варистор дорівнює 1мА.

Класифікаційна напруга варистора, який знаходиться в колі постійної напруги визначається за наступним співвідношенням:

$$U_{\text{роб}} \leq 0.85 U_{\text{кл}}, \quad (5.1)$$

де $U_{\text{роб}} = U_{\text{dc}} = 540 \text{ В}$ – значення напруги, яка прикладається до виводів варистора.

Тоді, класифікаційна напруга варистора буде:

$$U_{\text{кл}} \geq \frac{540}{0.85} = 635.2 \text{ В}.$$

Вибираємо варистор типу Littelfuse V460LA7PX2855 [72], зі значенням класифікаційної напруги класифікаційною напругою $U_{\text{кл}} = 643.5 \text{ В}$.

5.1.2 Розрахунок зарядного кола

Зарядне коло призначене для плавного заряду ємності фільтра. В момент часу, коли подається напруга живлення, а ємність розряджена.

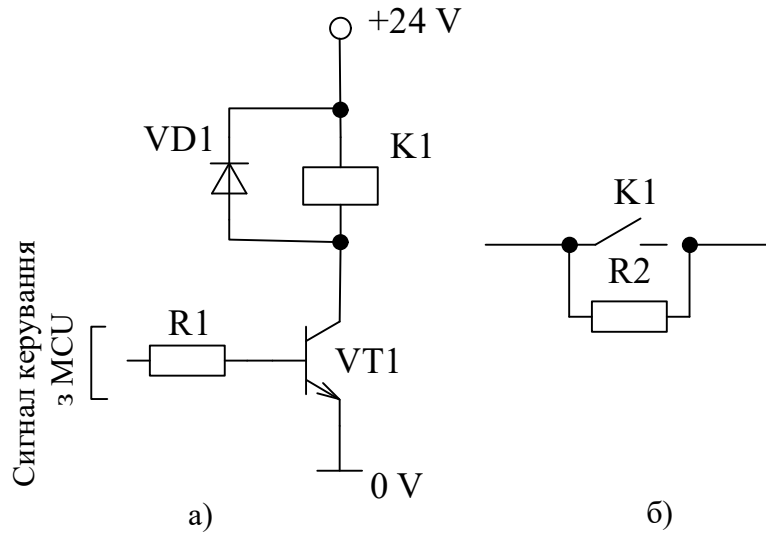


Рисунок 5.1 – Зарядне коло: а) – схема керування; б) – силова частина схеми

Сигнал видається із мікроконтролера, підсилюється, подається на базу транзистора.

Антипаралельний діод розсіює індуктивний струм, що накопичується в котушці електромагнітного реле.

Здійснимо вибір транзистора VT1, діода VD1, резистора R1 та реле K1.

Потужність в ланці постійного струму розраховується тривалій потужності двигуна:

$$I_{dc} = \frac{P_{дв}}{\eta_{дв} \eta_{inv} U_{dc}} = \frac{91000}{0.95 \cdot 0.96 \cdot 540} = 184.77 \text{ A.} \quad (5.2)$$

Вибір електромагнітного реле.

Допустимий струм через контакт:

$$I_{доп} \geq I_{dc}. \quad (5.3)$$

Комутація реле відбувається тоді, коли напруга між батареєю та конденсатором є практично однаковою, тобто в межах 30 В. Тому бажано вибирати реле, яке має постійну напругу комутації:

$$U_{ком} = 30 \text{ В.} \quad (5.4)$$

Напруга живлення котушки. В подальшому для живлення блоків живлення необхідна буде бортова мережа 24 В. Тому прийmemo:

$$U_{ж\ к} = 24\ В. \quad (5.5)$$

Опираючись на (5.3) – (5.5), обираємо електромагнітне реле типу АМР 7-1414778-3 [73] з наступними параметрами:

$$I_{доп} = 260\ А;$$

$$U_{ком} = 24\ В;$$

$$U_{ж\ к} = 24\ В,$$

$$R_{к} = 20\ Ом.$$

Струм, що протікає через котушку:

$$I_{к} = \frac{U_{ж\ к}}{R_{к}} = \frac{24}{20} = 1.2\ А.$$

Вибір транзистора та резистора.

Напруга колектор-емітер:

$$U_{CE} \geq (1.5...2)U_{CE\ роб}. \quad (5.6)$$

Приймаючи до уваги, що $U_{CE\ роб} = U_{ж.к.} = 24\ В$, тоді (5.6) буде як:

$$U_{CE} \geq (36...48)\ В. \quad (5.7)$$

Струм колектора:

$$I_C \geq I_{к}. \quad (5.8)$$

Опираючись на (5.7), (5.8) обираємо біполярний транзистор типу [74] Diodes Incorporated FMRTL619TA з наступними параметрами:

$$U_{CE} = 50\ В,$$

$$I_C = 1.25\ А,$$

$$I_B = 200\ мА.$$

З мікроконтролера на базу приходить напруга $U_{IN\ VT1} = 5\ В$. тоді опір резистора R1 розраховується за законом Ома:

$$R1 = \frac{U_{IN\ VT1}}{I_B} = \frac{5}{0.2} = 25\ Ом.$$

Примітка. Надалі вибір малопотужних резисторів, керамічних та електролітичних конденсаторів здійснюватися буде вже безпосередньо при складанні переліку елементів та обрахування вартості.

Вибір діода.

Антипаралельний діод розсіює індуктивний струм, який протікає через індуктивність. Тобто діод повинен вибиратися зважаючи на тривалий струм утримання. Для спрощення розрахунку приймемо значення цього струму як струму колектора:

$$I_{VD} \geq I_K \quad (5.9)$$

Пікова зворотна напруга:

$$U_{зв VD} \geq 2U_{CE}. \quad (5.10)$$

Опираючись на (5.9), (5.10) обираємо діоди типу Vishay RGP15B-E3/54 [75] з наступними параметрами:

$$\begin{aligned} I_{VD} &= 1.5 \text{ A}, \\ U_{зв VD} &= 100 \text{ В}. \end{aligned}$$

Вибір зарядного резистора.

Опір зарядного резистора:

$$R_3 \geq \frac{U_{dc}}{I_{dc}} = \frac{540}{184.77} = 2.92 \text{ Ом} \quad (5.11)$$

Обираємо резистор типу Rideon UAL50-3RF8 [76] з опором $R_3 = 3 \text{ Ом}$.

5.1.3 Розрахунок заряду конденсаторного фільтру

Інвертор використовує струм з ланки постійного струму. В провідниках виникають паразитні індуктивності. Інвертор постійно комутується, тобто струм I_{dc} то протікає, то переривається, внаслідок цього виникають перенапруги. Відповідно необхідно встановити конденсор, якомога ближче до інвертора, який компенсувати дану індуктивність.

Електролітичний конденсатор не здатний віддавати велику кількість енергії на високій частоті, так як інвертор працює на частоті ШІМ. Тому в електричних транспортних засобах де є батарейне живлення або живлення від суперконденсаторів розроблено спеціальні плівкові конденсатори.

Переваги плівкових конденсаторів в порівнянні з електролітичними:

- допустима робоча напруга в 2 рази більша, тобто зменшуються габарити пристрою та непотрібно вводити балансуєчі резистори тощо;
- здатні віддавати велику кількість енергії на високій частоті (набагато більша здатність компенсації імпульсних струмів);
- не мають електроліту, який може вибухнути;
- неполярні, тобто можна підключати будь-якою стороною;
- набагато менший внутрішній опір;
- більш висока швидкодія;
- витримують більші перевантаження по струму.

На фоні цих переваг плівкові мають недоліки відносно електролітичних:

- мають більшу вартість;
- мають меншу ємність.

Виконаємо розрахунок плівкових конденсаторів згідно методики [19], де досліджені процеси комутації інвертора.

Рівень пульсації струму (peak to peak) при коефіцієнті заповнення ШІМ сигналу 0.5:

$$\Delta I_{0.5t} = \frac{U_{dc}}{4f_{sw}L} = \frac{540}{4 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 118 \cdot 10^{-6}} = 114.4 \text{ A.} \quad (5.12)$$

де f_{sw} – частота ШІМ, приймаємо 10 кГц.

Далі необхідно перейти від цього значення до значення в так званих RMS одиницях, згідно таблиці [77]:

$$\Delta I_{rms} = \frac{\Delta I_{0.5t}}{2\sqrt{2}} = \frac{114.4}{2\sqrt{2}} = 40.45 \text{ A.} \quad (5.13)$$

Згідно таблиці [77] $\Delta I_{rms} = 40.45 \text{ A}$ – це 200 мкФ ємності при $U_{dc} = 550 \text{ V}$.

Вибираємо конденсатор типу CDE BLH806K601C114 [78] з параметрами:

$$U_{\phi} = 550 \text{ В};$$

$$C_{\phi} = 100 \text{ мкФ}.$$

Щоб досягти необхідної ємності необхідно два паралельно з'єднаних конденсатора. Перевіряємо рівень пульсації напруги [79]:

$$\Delta U_{0.5t} = \frac{U_{dc}}{32LC_{\phi}f_{PWM}^2} = \frac{540}{32 \cdot 171.9 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^{-6} \cdot (10 \cdot 10^3)^2} = 4.91 \text{ В.} \quad (5.14)$$

Як, правило, нормальним вважається рівень пульсацій напруг до 5%, перевіряємо:

$$K_{\text{пульс}} = \frac{\Delta U_{0.5t}}{U_{dc}} \cdot 100\% = \frac{4.91}{540} \cdot 100\% = 0.91\%. \quad (5.15)$$

Конденсатор вибраний вірно.

5.1.4 Розрахунок та вибір автономного інвертора

Автономні інвертори будуються на двох топологіях: IGBT+Driver або IPM.

Основною відмінністю IPM від IGBT+Driver це те, що в IPM поєднані кристали транзисторів та драйвери. Тобто не потрібно проектувати драйверні кола. Ці драйвери можуть виконувати наступні захисні функції: захист від КЗ, від перегріву інвертора, від втрати живлення тощо. В деяких IPM можуть бути датчики струму, температури, снабберні конденсатори тощо.

Розрахунок IPM. Струм колектора, має бути більшим за максимальний струм в системі. Тоді, відповідно, максимальний струм буде при піковій потужності двигуна:

$$I_{\max} = \frac{P_{\text{дв max}}}{\eta_{\text{дв}} \eta_{\text{inv}} U_{dc}} = \frac{200000}{0.95 \cdot 0.96 \cdot 540} = 406.11 \text{ А.} \quad (5.16)$$

Також необхідно враховувати коефіцієнт запасу. Зазвичай в datasheet вказується струм колектора при нагріві, який трохи менший, чим в холодному пристрою. Слід брати до уваги саме струм при нагріві. Тобто, маємо:

$$I_c \geq (1.1...1.2)I_{\max}. \quad (5.17)$$

Для автономних інверторів напруги їх максимально-допустима зворотна напруга (напруга колектор-емітер) має бути мінімум в 1,5 разів вищою, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму:

$$U_{CE} \geq 1.5U_{\max}. \quad (5.18)$$

Максимальна напруга в ланці постійного струму визначається максимальною робочою температурою конденсатора тобто:

$$U_{\max} = U_{dc} = 540 \text{ В}. \quad (5.19)$$

Тобто, враховуючи (5.16) – (5.19) маємо:

$$I_c \geq (446.72...487.33)\text{А},$$

$$U_{CE} \geq 810 \text{ В}.$$

На основі нерівностей вище, обираємо IPM-модуль типу Mitsubishi PM450CLA120 [80] з параметрами:

- напруга колектор-емітер $U_{CES} = 1200 \text{ В}$;
- номінальний струм колектора $I_{C \text{ nom}} = 450 \text{ А}$.

Внутрішня структура інтелектуального модуля зображено на рис. 5.2

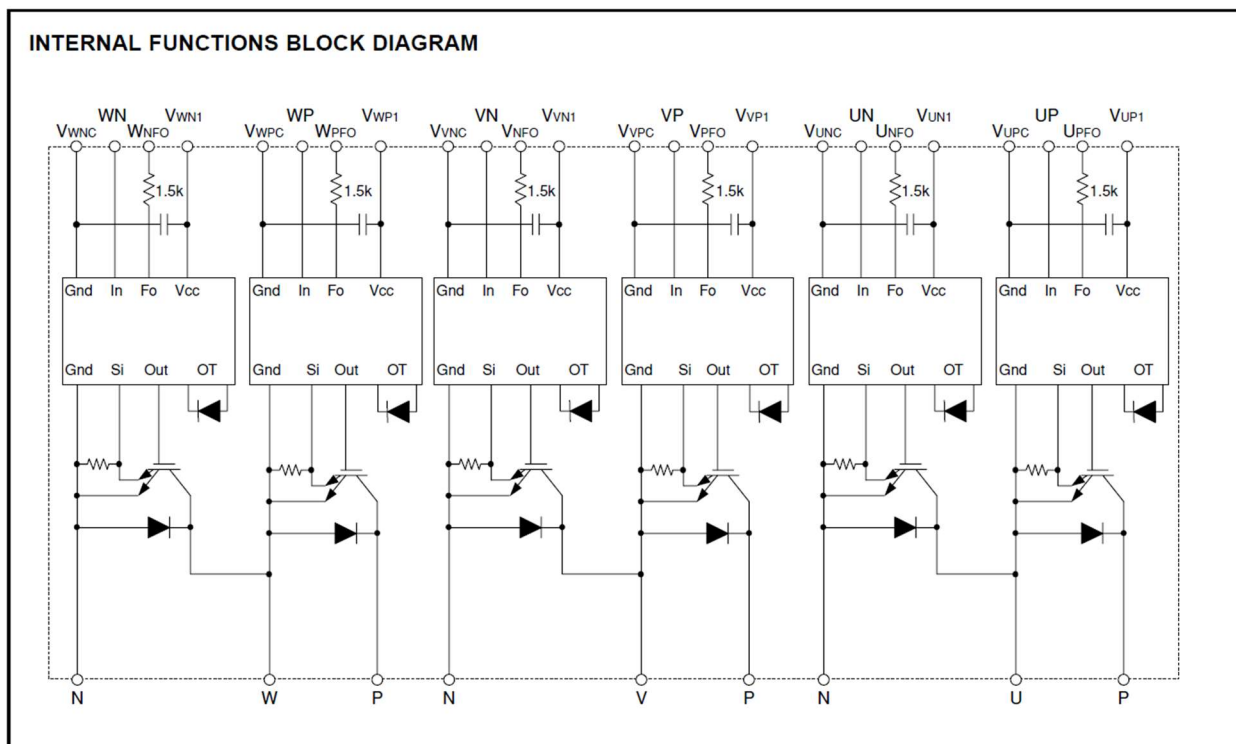


Рисунок 5.2 – Внутрішня структура PM450CLA120 [24]

До складу інтелектуального модуля входять 6 IGBT-ключів та драйвери. Сигнали, що знаходяться до драйверів: окремі 15 В живлення для кожного з драйверів, сигнали ШІМ, сигнали FAULT (помилки).

Вибір гальванічних розв'язок.

Силова частина і схема керування повинна бути гальванічно розв'язаною. В якості гальванічних розв'язок сигналів ШІМ використовуємо високошвидкісну оптичну пару Broadcom HCPL-4504 [81] $t_r = 1$ мкс, сигналів FAULT використовуємо American Bright Optoelectronics BPC-817S [82] $t_r = 4$ мкс. На рис. 5.3 показана схема включення гальванічної розв'язки на прикладі фази U, що подається на двигун.

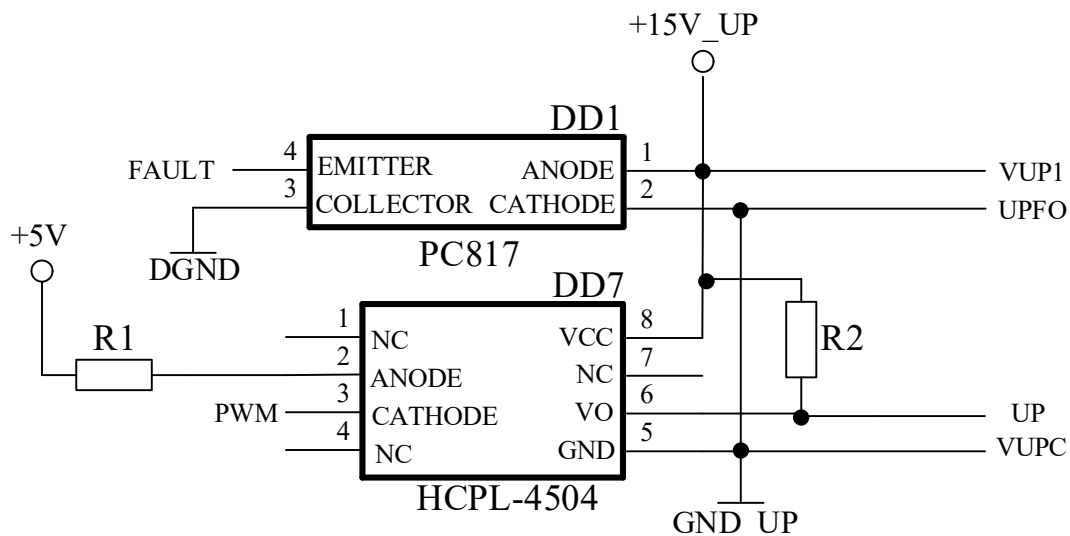


Рисунок 5.3 – Реалізація гальванічно-розв'язаних сигналів, що подаються на інвертор

5.1.5 Вибір датчиків струму та напруги

Струм, що вимірює датчик струму, має бути більший за максимальний струм в системі:

$$I_{\text{max д.с.}} > I_{\text{max}}. \quad (5.20)$$

Для давача струму використаємо датчик на ефекті Холла. Обираємо давач струму опираючись на (5.20) типу LEM LA 255-S [83] із можливістю вимірювати струми $I_p = \pm 500$ А.

Вимірювання виконується безконтактним способом. Силовий провідник поміщається у відповідне віконце, що можна побачити на рис. 5.4.

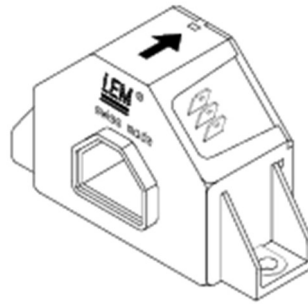


Рисунок 5.4 – Зовнішній вигляд давача струму LA 255-S [84]

Схема включення показана на рис. 5.5.

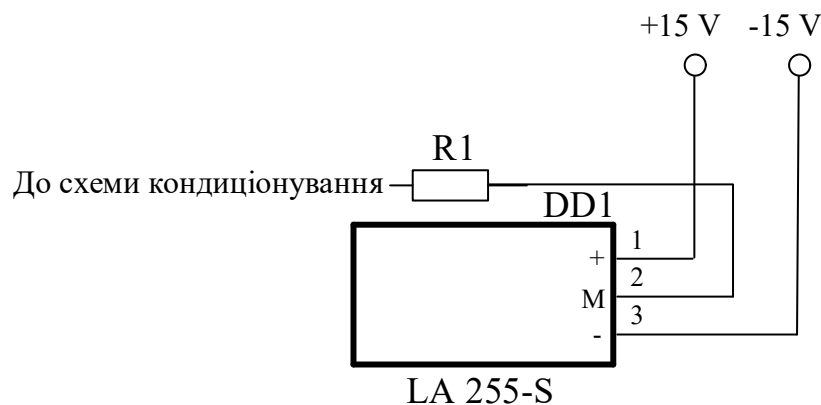


Рисунок 5.5 – Схема включення давача струму

Згідно до datasheet [84] при вимірювання струму в межах ± 500 А, необхідно задатися опором вимірювального резистора в межах (5...15)Ом. Прийmemo $R1 = 12$ Ом.

Вихідна напруга давача буде відповідно:

$$U_{OUT_CS} = I_{SN} R1 = 0.125 \cdot 12 = 1.5 \text{ В}, \quad (5.21)$$

де $I_{SN} = 125$ мА – номінальний вихідний струм.

Напруга, що вимірює датчик напруги має бути більшою за напругу в ланці постійного струму:

$$U_{\text{макс.д.н.}} > U_{\text{dc}}. \quad (5.22)$$

Обираємо датчик напруги опираючись на (5.22) типу LEM LV 25-600/SP2 [85] із номінальним значенням вимірювальної напруги 600 В.

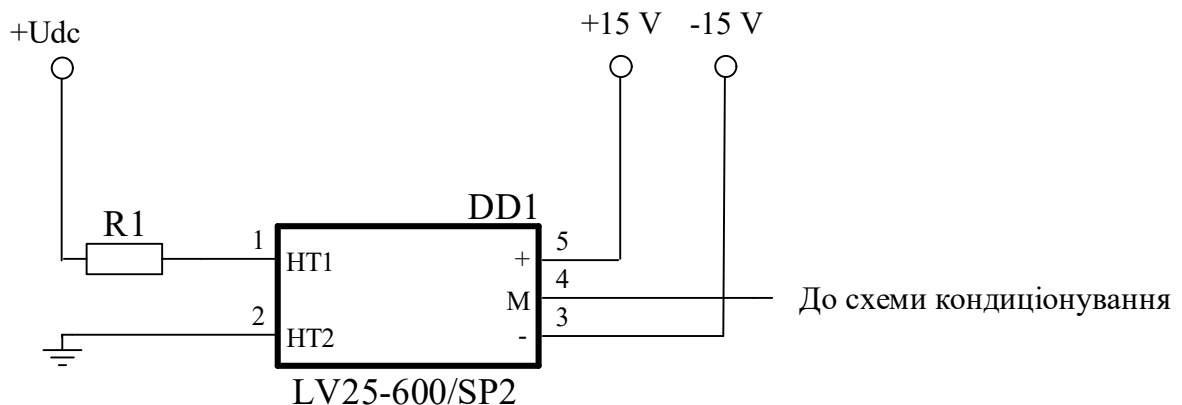


Рисунок 5.6 – Схема включення датчика напруги

Здійснимо розрахунок резистора R1. В datasheet [86] вказано, що вхідний струм датчика $I_{\text{in n}} = 10 \text{ мА}$, тоді опір R1:

$$R1 = \frac{U_{\text{dc}}}{I_{\text{IN}}} = \frac{540}{0.01} = 54 \text{ кОм}.$$

5.1.6 Вибір енкодера

Згідно до [87] для двигуна Emrax 268. Рекомендується встановити енкодер RM44 серії [88]. Енкодер буде встановлений на вал двигуна. Обираємо типу RLS RM44IE [89] інкрементального типу з розподільчою здатністю $N_{\text{enc}} = 1024 \text{ імп / об.}$

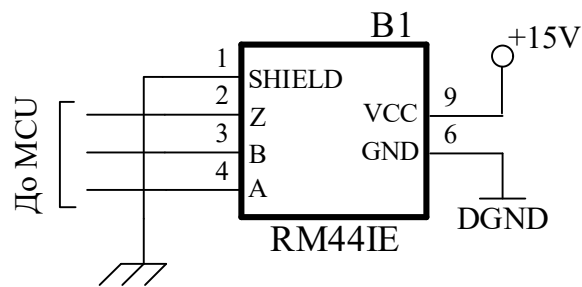


Рисунок 5.7 – Схема підключення пінів енкодера

5.1.7 Вибір запобіжника

Плавкі запобіжники використовуються для захисту електричних схем від короткого замикання.

Проведемо вибір плавкого запобіжника. Вибір запобіжника виконується за номінальним струмом запобіжника, який має бути більшим від максимального струму, який може протікати в ланці постійного струму, та номінальною напругою запобіжника, яка вибирається більшою за номінальну напругу ланцюга.

Обираємо плавкий запобіжник Littelfuse PSR030FL0450Z [90]. Основні параметри запобіжника EATON FRS-R-200: $U_{DCr} = 600$ В – номінальна напруга, $I_n = 450$ А – номінальний струм плавкої вставки.

5.1.8 Вибір педалі

Для можливості розгону/гальмування та в цілому керування швидкістю електромобіля необхідно вибрати педаль. При натисканні на педаль «газ» на двигун буде подаватися завдання позитивного значення моменту, тобто «педаль в підлогу» буде означати подачу близько до максимально допустимого значення

моменту двигуна $\sim 500 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Відповідно, при натисканні на педаль «гальмо» на двигун буде подаватися завдання на негативне значення моменту.

Оберемо типу [91] LJHDFY Foot Throttle з напругою живлення +5В. Керуючий сигнал буде надходити з CAN-шини (рис 5.8). Відповідно необхідно дві педалі для сигналів «газ» та «гальмо».

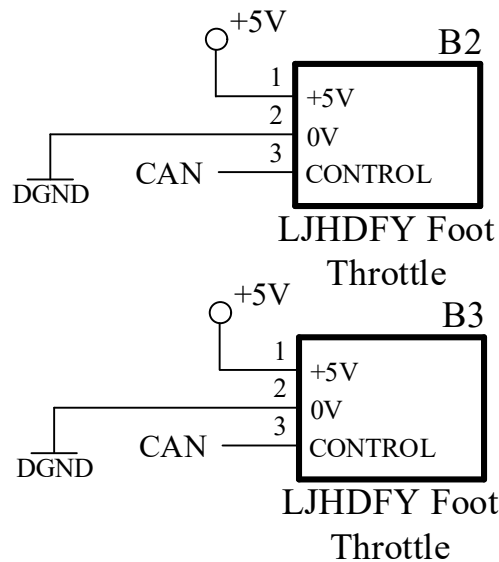


Рисунок 5.8 – Схема підключення пінів педалей

Блоки живлення входять до силової частини схеми, але будуть розраховані та внесені до силової частини пізніше, коли буде розраховано потужність всіх елементів схем.

5.2 Розробка керуючої частини контролера

5.2.1 Вибір керуючого контролера

Для реалізації керуючої частини електропривода необхідно вибрати мікроконтролер. Обираємо мікроконтролер TMS320F280021 [92], з 32-бітним DSP ядром та тактовою частотою 100 МГц [93].

Номінальна напруга живлення мікроконтролера – 3.3 В, має внутрішнє джерело живлення 1.2 В.

Містить вбудовану затримку по вмиканню, поки живлення стабілізується, проте щоб підвищити тривалість цієї затримки до піна $\overline{\text{XRS}}$ підключено RC коло ($R1 = 10 \text{ кОм}$; $C1 = 100 \text{ нФ}$).

Зображення контролера та підключення напруги живлення контролера зображено на рис. 5.9.

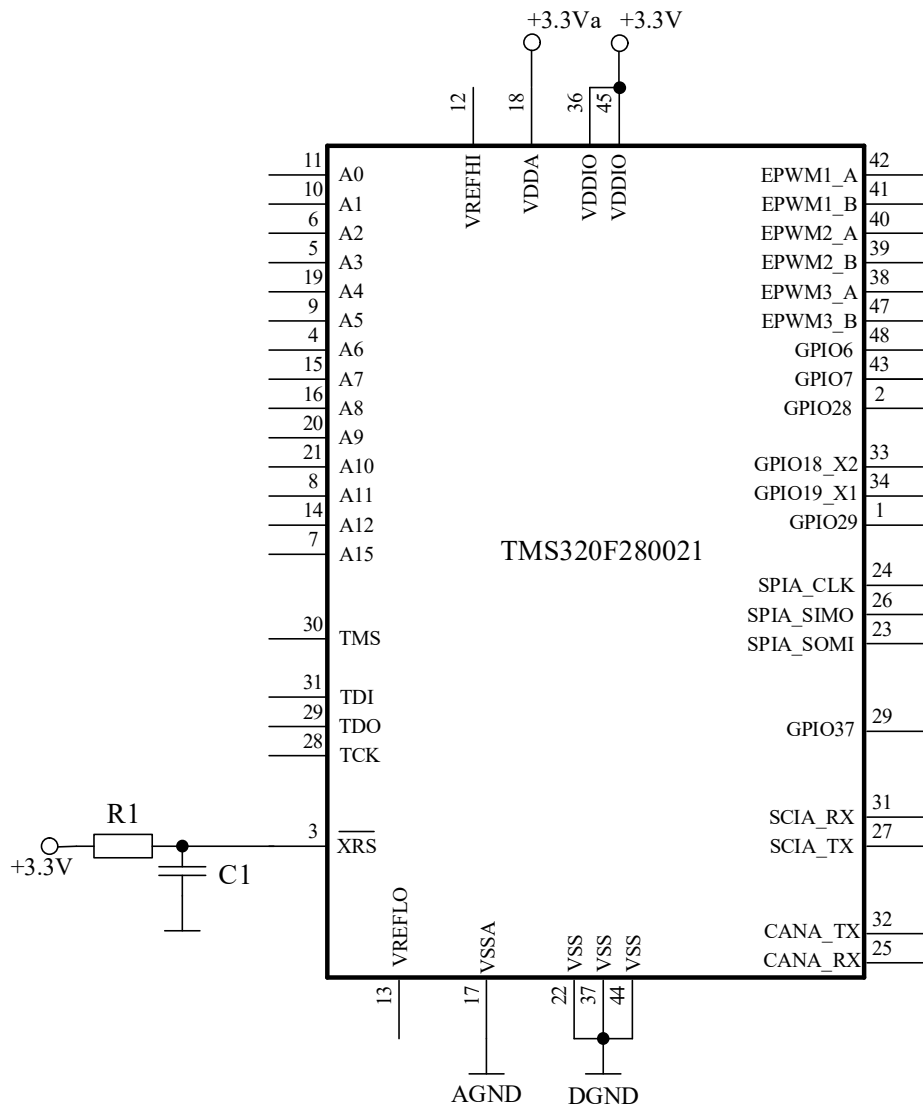


Рисунок 5.9 – Схема електрична принципова мікроконтролера TMS320F280021

5.2.2 Вибір мікросхеми пам'яті

Для розширення вбудованої пам'яті вибираємо мікросхему Cypress Semiconductor FM25V10-PG [94], що являє собою 1-Mbit ($128\text{K} \times 8$) Serial (SPI)

F-RAM. Підключення мікросхеми до мікроконтролера здійснюється по порту SPI, як зображено на рисунку 5.10.

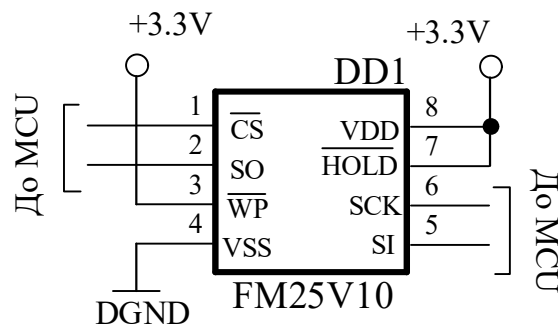


Рисунок 5.10 – Схема електрична принципова підключення мікросхеми пам'яті FM25V10-PG до мікроконтролера

5.2.3 Вибір годинника реального часу

Для реалізації годинника реального часу використаємо мікросхему Microchip MCP7951X0 [95]. Підключення мікросхеми до мікроконтролера здійснюється по порту SPI.

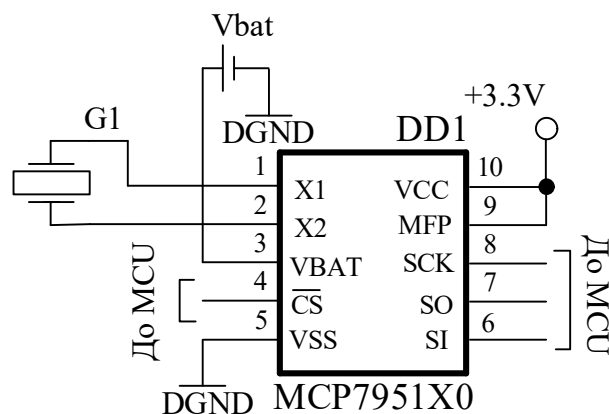


Рисунок 5.11 – Схема електрична принципова підключення мікросхеми годинника реального часу MCP7951X0 до мікроконтролера

Для живлення мікросхеми, коли мікроконтролер вимкнений, використовується зовнішнє живлення від батарейки $V_{\text{bat}} = 3 \text{ В}$.

Також до мікросхеми підключається кварцовий резонатор ECS-.327-8-14X [96] частотою $G1 = 32678$ Гц та з параметром ємність навантаження – 8пФ.

5.2.4 Вибір USB- та CAN-інтерфейсів

Для того, щоб можна було обмінюватися інформацією між мікроконтролером та ПК, необхідно встановити спеціальну мікросхему.

FTDI FT232RL [97] – трансформує сигнал з USB в асинхронний послідовний інтерфейс передачі даних (UART).

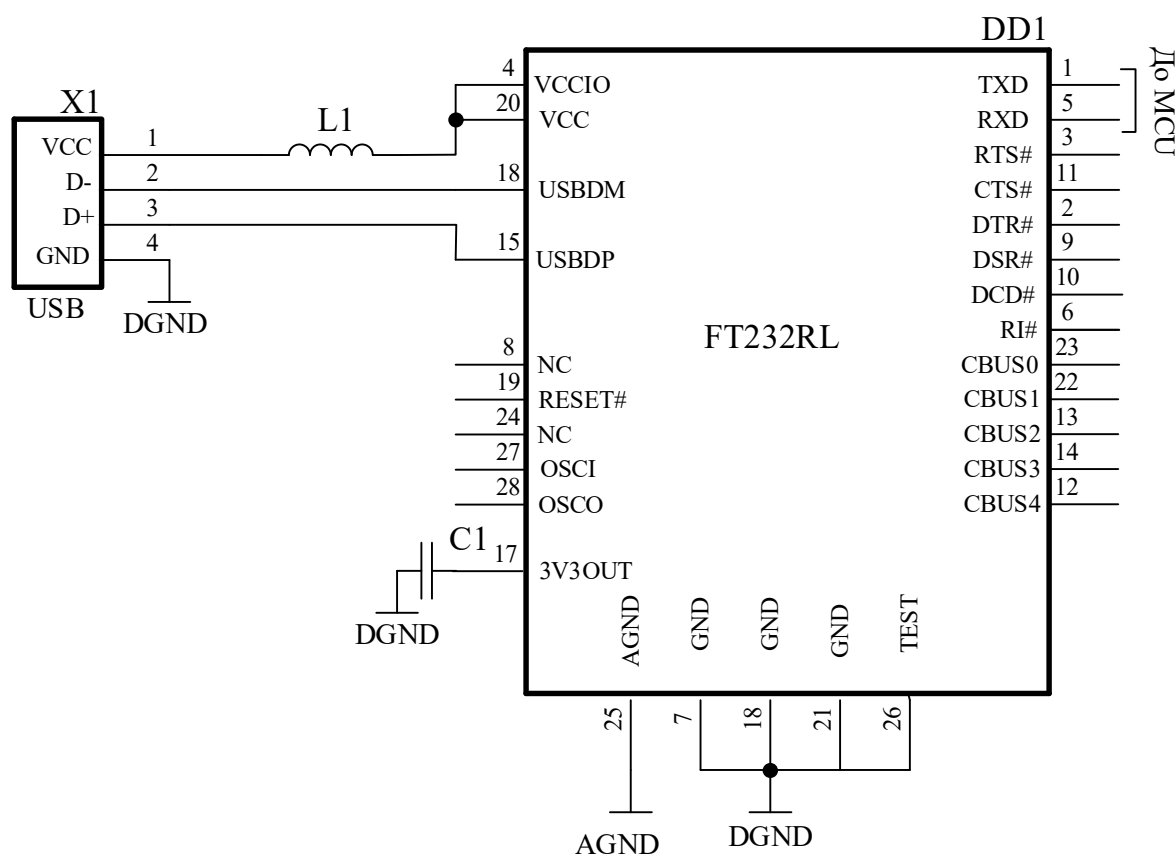


Рисунок 5.12 – Схема електрична принципова підключення USB-інтерфейсу FT232RL до мікроконтролера

На рис. 4.4 параметри елементів наступні:

- $L1 = 68 \text{ мГн}$;
- $C1 = 0.1 \text{ мкФ}$.

CAN – інтерфейс з послідовною шиною, що підтримує одночасну роботу багатьох ведучих пристроїв. Це означає, що всі вузли CAN-мережі мають можливість передавати дані і декілька вузлів одночасно можуть давати запит на шину.

CAN-інтерфейс призначений для зв'язку різного роду контролерів між собою. Він поєднує апаратний інтерфейс і з протоколом передачі даних.

Для реалізації CAN-інтерфейсу використаємо мікросхему NXP PCA82C250 [98], рис. 5.13.

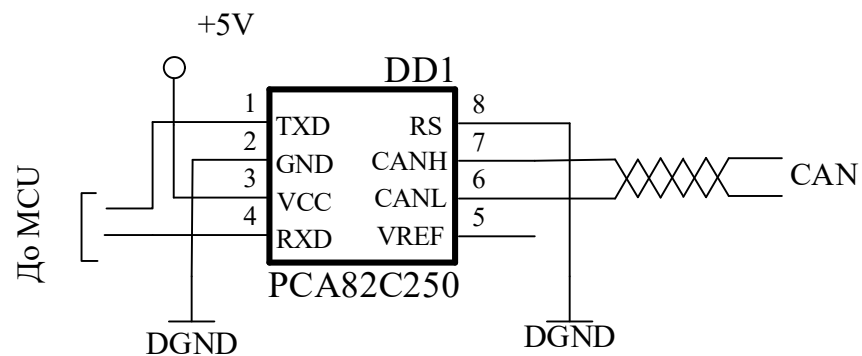


Рисунок 5.13 – Схема електрична принципова підключення CAN-інтерфейсу PCA82C250 до мікроконтролера

RS під'єднано до «землі», щоб ввімкнути високошвидкісний режим.

5.2.5 Розрахунок схем узгодження аналогових сигналів від датчиків

Сигнали, що виходять з датчиків необхідно узгодити, так як входи АЦП сприймають значення напруги до 3 В. Згідно з (5.21) вихідний струм датчиків струму $U_{\text{OUT_CS}} = 1.5 \text{ В}$,

Тобто схема кондиціонування сигналу з давача напруги спроститься і буде наступною, рис. 5.15.

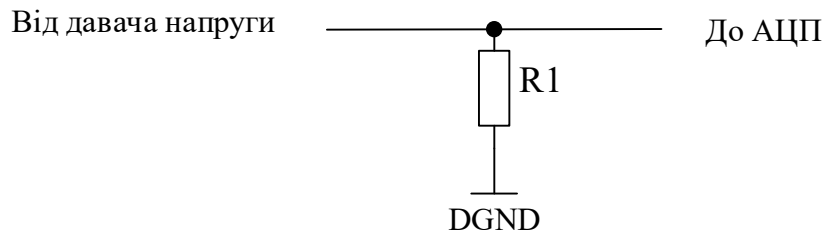


Рисунок 5.15 – Схема кондиціонування сигналів з давача напруги

5.2.6 Вибір мікросхем буферів для входних/вихідних сигналів

Для керування інвертором з мікроконтролера надходять сигнали ШІМ на рівні 3.3 В, які необхідно підсилити до 5 В. Саме 5 В необхідні для керування оптопарами, що в свою чергу керують драйверами IGBT-транзисторів. Для реалізації такого перетворення напруги використаємо мікросхему-буфер Toshiba 74HCT541D [101] для підсилення сигналів з контролера до 5 В.

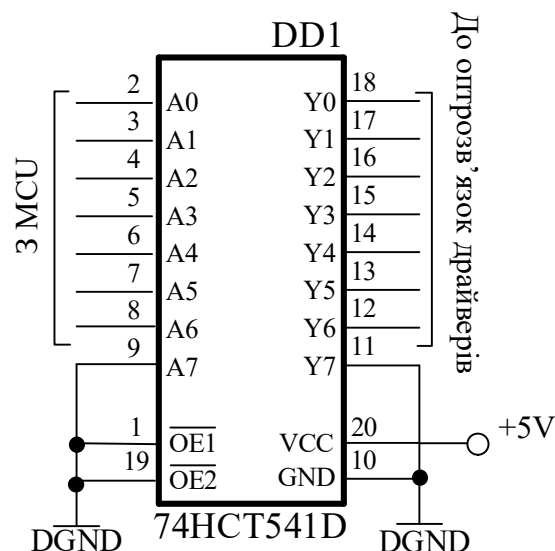


Рисунок 5.16 – Схема електрична принципова мікросхеми-буферу 74HCT541D

Невикористані входи підтягуємо до цифрової землі, щоб не відбувалися додаткові наводки, що слугують протіканням небажаних імпульсних струмів.

Від енкодера, USB- та CAN-інтерфейсів надходять імпульси напругою 5В. Щоб їх можна було передати на контролер необхідно перетворити ці сигнали на рівень напруги 3.3 В. Використаємо мікросхему Texas Instruments SN74LVC245ANSR [102], яка є 5В-толерантною.

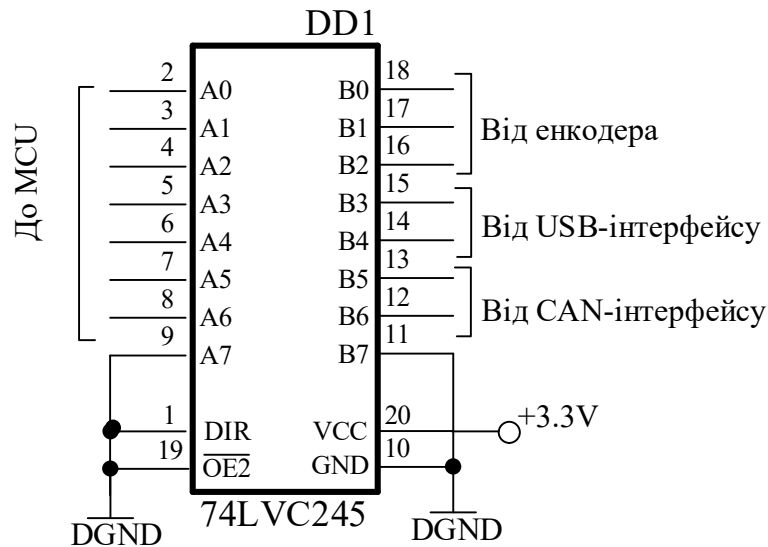


Рисунок 5.17 – Схема електрична принципова мікросхеми-буферу 74LVC245

5.2.7 Розробка блоку живлення

Для розробки блоку живлення необхідно розрахувати потужність, яку споживають всі елементи. Блок живлення реалізовуємо у силовій частині, передаємо необхідні напруги в контролерну частину за допомогою роз'єму.

Для організації блоку живлення використовується бортова мережа з акумуляторної батареї 24В.

Складемо таблицю елементів, які будуть житися від напруги ± 15 В (давачі струму та напруги). Енкодер RM44IE також буде житися від даного джерела живлення, проте його «земля» буде під'єднана до «нуля» джерела біполярного живлення.

Таблиця 5.1 – Споживання струму елементів, що живляться від напруги ± 15 В

Елемент	Кількість елементів	Споживаний струм елемента	Сумарний споживаний струм
LV 25-600/SP2	1	35 мА	35 мА
LA 255-S	2	145 мА	290 мА
RM44IE	1	50 мА	50 мА
Всього:			375 мА

Для реалізації біполярного виходу ± 15 В використаємо DC/DC-перетворювач Traco Power THN 20-2423WI з вихідним струмом 500 мА, схема підключення згідно до [103] наведена на рис. 5.18.

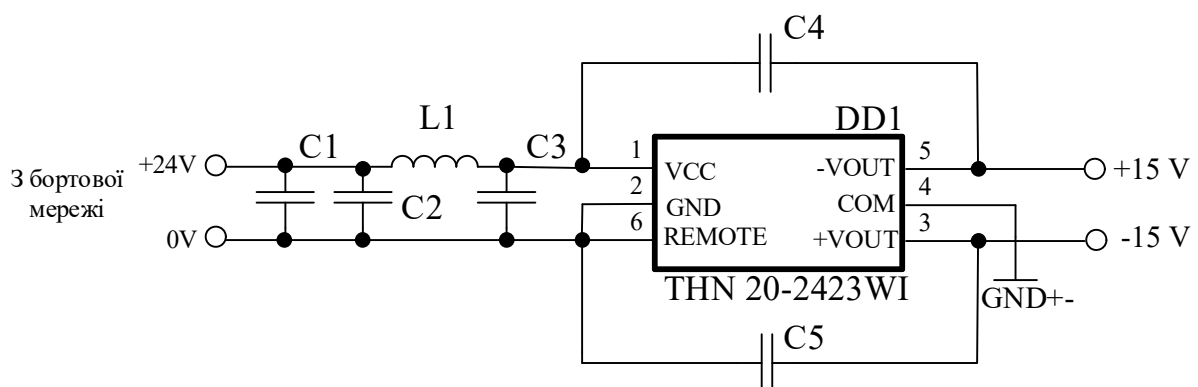


Рисунок 5.18 – Схема підключення DC/DC-перетворювача THN 20-2423WI

На рис. 5.18 значення параметрів обв'язки перетворювача:

- $C1 = 2.2$ мкФ;
- $C2 = 2.2$ мкФ;
- $C3 = 2.2$ мкФ;
- $C4 = 1000$ пФ
- $C5 = 1000$ пФ;
- $L1 = 325$ мкГн [104].

Також необхідно реалізувати уніполярну напругу +15В для керування драйверами, що вбудовані в обраний ІРМ-модуль.

Таблиця 5.2 – Споживання струму елементів, що живляться від напруги +15 В

Елемент	Кількість елементів	Споживаний струм елемента	Сумарний споживаний струм
PC817	1*	50 мА	50 мА
HCPL-4504	1*	25 мА	25 мА
PM450CLA120	1	20 мА	20 мА
Всього:			95 мА

* – тому що використовується тільки 1 елемент в кожному плечі інвертора.

Для реалізації живлення +15 В використаємо лінійне джерело живлення Texas Instruments LM78M15 [105] з вихідним струмом 500 мА. Таких джерел необхідно 6 шт, так як кожне плече інвертора живиться від окремого живлення. Також необхідно гальванічно розв'язати ці +15 В, щоб не було загальної «землі» на плечах інвертора. Для цього використаємо DC/DC-перетворювач Traco Power TEL 5-1223 [106] з вихідним струмом 200 мА, що цілком достатньо, щоб живити драйвер інвертора (див. табл. 4.2).

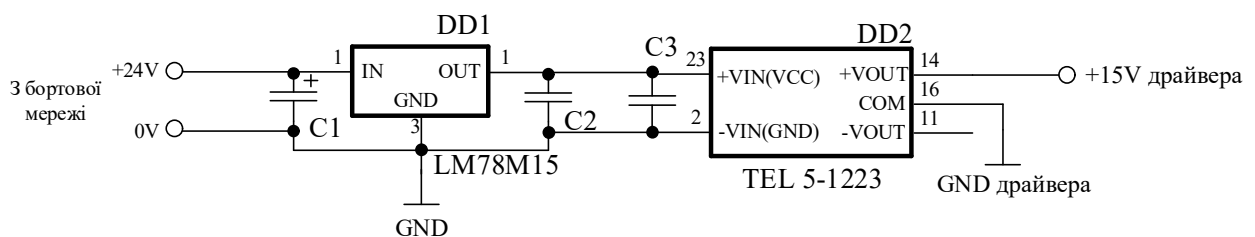


Рисунок 5.19 – Схема організації живлення драйверів підключення лінійного регулятора напруги LM78M15

На рисунку 5.19:

- C1 = 0.33 мкФ 50 В;
- C2 = 0.1 мкФ;
- C3 = 0.1 мкФ.

Коло зарядного резистора живиться від напруги бортової мережі +24В.

Також наведемо значення споживання струмів мікросхем, що живляться від +5В та +3.3В.

Таблиця 5.3 – Споживання струму елементів, що живляться від напруги +5 В

Елемент	Кількість елементів	Споживаний струм елемента	Сумарний споживаний струм
REF3130	2	0.1 мА	0.2 мА
LM393D	2	25 мА	50 мА
74HCT541D	1	70 мА	20 мА
PCA82C250	1	70 мА	70 мА
LJHDFY Foot Throttle	2	100 мА	200 мА
Всього:			340.2 мА

Таблиця 5.4 – Споживання струму елементів, що живляться від напруги +3.3 В

Елемент	Кількість елементів	Споживаний струм елемента	Сумарний споживаний струм
TMS320F280021	1	106 мА	106 мА
74LVC245	2	50 мА	50 мА
MCP7951X0	1	5 мА	5 мА
PCA82C250	1	3 мА	3 мА
Всього:			164 мА

Для реалізації живлення +5В використаємо мікросхему Onsemi MC7805BTG [107], що має вихідний струм 1А. Такий струм був обраний, щоб можна було реалізувати живлення +3.3В на основі цих +5В. +3.3В реалізовано на основі мікросхеми Analog Devices ADP151AUJZ-3.3-R7 [108].

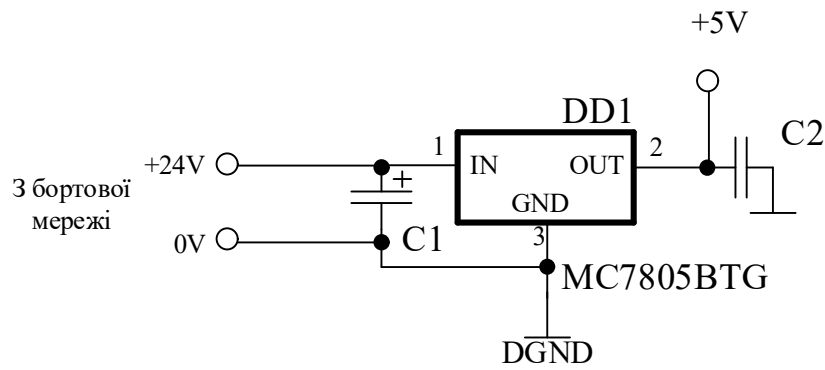


Рисунок 5.20 – Схема підключення лінійного регулятора напруги MC7805BTG

На рисунку 5.20:

- $C1 = 0.33 \text{ мкФ } 50 \text{ В};$
- $C2 = 0.1 \text{ мкФ}.$

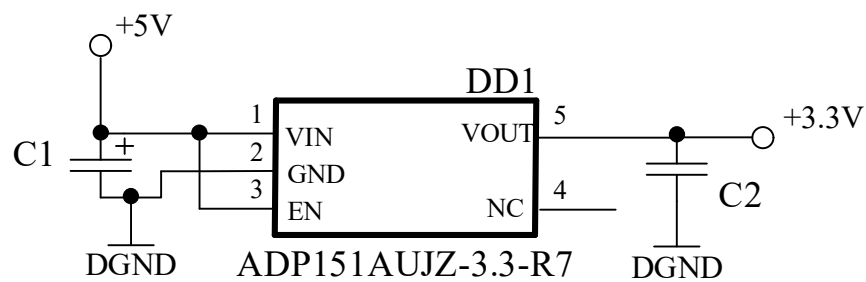


Рисунок 5.21 – Схема підключення лінійного регулятора напруги MC7805BTG

На рисунку 5.21:

- $C1 = 1 \text{ мкФ } 10 \text{ В};$
- $C2 = 0.1 \text{ мкФ}.$

Для живлення мікроконтролера необхідно створити аналогове джерело 3.3 В (рис. 5.22).

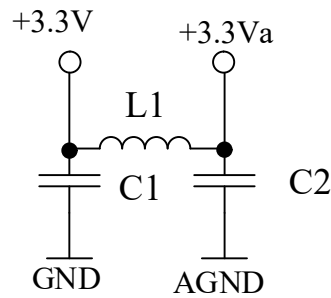


Рисунок 5.22 – Реалізація аналогового живлення 3.3 В

На рисунку 5.22:

- $L1 = 68 \text{ мГн}$;
- $C1 = C2 = 0.1 \text{ мкФ}$.

Для зменшення рівня електромагнітних наводок в схему включаються конденсатори якомога ближче до виводів мікросхем, де вони під'єднані до живлення. Ємність даних конденсаторів приймається на рівні 0.1 мкФ.

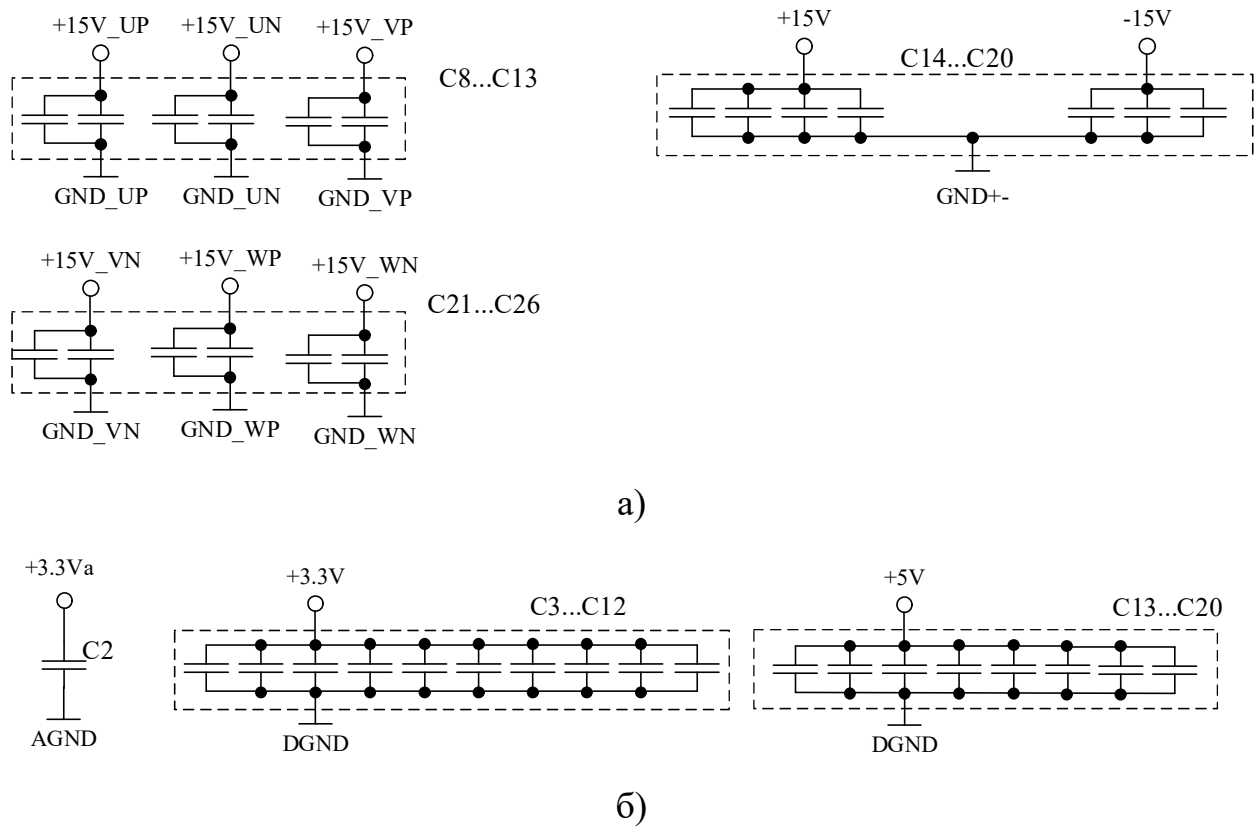


Рисунок 5.23 – Організація конденсаторних кіл: а) схема силова; б) схема керуючого контролера

Схема силова наведена в Додатку К, схема керуючого контролера в Додатку Л.

Висновки до розділу

1. Складено функціонально схему синхронного електроприводу, на основі якої здійснено вибір елементної бази силової частини та керуючого контролера.
2. Здійснено розрахунок основних елементів силової частини. Робоча напруга варистора буде рівною напруги ланки постійного струму 540 В. Отже, в якості варистора обрано Littelfuse V460LA7PX2855 з класифікаційною напругою 643.5 В. Коло для плавного заряду ємності складено на основі транзистора та електромагнітного реле.
3. Силовий фільтр розроблений на базі плівкового конденсатора типу CDE BLN806K601C114 з $U_{\phi} = 550$ В та $C_{\phi} = 100$ мкФ, для досягнення необхідної ємності необхідна два паралельно з'єднаних конденсатора.
4. В якості автономного інвертора обрано інтелектуальний модуль Mitsubishi PM450CLA120 з напругою напруга колектор-емітер 1200 В та номінальний струм колектора 450 А, що задовольняє вимоги.
5. Враховуючи струми, що будуть протікати в силовому колі та значення напруги ланки постійного струму обрано давач струму LA 255-S із можливістю вимірювати струми $I_p = \pm 500$ А. та давач напруги LEM LV 25-600/SP2 із номінальним значенням вимірювальної напруги 600 В.
6. Для вимірювання кутового положення двигуна було обрано енкодер RLS RM44IE інкрементального типу з розподільчою здатністю $N_{\text{enc}} = 1024$ імп / об, спеціально рекомендованого до двигуна Emrax 268.
7. Для захисту від короткого замикання був обраний плавкий запобіжник Littelfuse PSR030FL0450Z. Основні параметри запобіжника EATON FRS-

R-200: $U_{DCr} = 600 \text{ В}$ – номінальна напруга, $I_n = 450 \text{ А}$ – номінальний струм плавкої вставки.

8. Для керування швидкістю електромобіля обрано педалі типу LJHDFY Foot Throttle, відповідно для сигналів «газ» та «гальмо». Сигнали від педалей будуть передаватися через CAN-шину до контролера.
9. Здійснено розрахунок основних елементів керуючої частини контролера. В якості мікроконтролера обрано TMS320F280021, з 32-бітним DSP ядром та тактовою частотою 100 МГц.
10. Для розширення вбудованої пам'яті обрано мікросхему Cypress Semiconductor FM25V10-PG, що являє собою 1-Mbit ($128\text{K} \times 8$) Serial (SPI) F-RAM. Для реалізації годинника реального часу використано мікросхему Microchip MCP7951X0.
11. Для того, щоб можна було обмінюватися інформацією між мікроконтролером та ПК, встановлено мікросхем FTDI FT232RL – трансформує сигнал з USB в асинхронний послідовний інтерфейс передачі даних (UART).
12. Реалізована CAN-шина. Він поєднує апаратний інтерфейс і з протоколом передачі даних. Для реалізації CAN-інтерфейсу використана мікросхема NXP PCA82C250.
13. Для підсилення вихідних сигналів контролерів з 3.3В до 5В використано мікросхеми-буферу 74HCT541D, а SN74LVC245ANSR для перетворення з 5В в 3.3В.
14. Розроблені блоки живлення для необхідних частин схеми, а також організовано конденсаторні кола, для захисту від електромагнітних наводок.

6 РОЗРАХУНОК ВАРТОСТІ ПРОЕКТУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДУ ОКУПНОСТІ

6.1 Перелік елементів проекту та загальна вартість

Для визначення загальної вартості необхідно скласти перелік елементів та порахувати ціну кожного елементу (табл. 6.1 – 6.2).

Таблиця 6.1 – Перелік елементів силової частини

Позначення	Назва	Кіл.	Ціна
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Перетворювачі неелектричних величин в електричні			
B1	RM44IE	1	1609грн/шт
B2, B3	LJHDFY Foot Throttle	2	265,56/шт
Конденсатори			
C1, C2	BLH806K601C114 550B 110 мкФ	2	556.42/шт
C3 – C5	2.2 мкФ	3	2 грн/шт
C6, C7	1 нФ	2	2 грн/шт
C8 – C26, C28, C31 – C32, C39 – C50	0.1 мкФ	34	2 грн/шт
C27, C33 – C38	0.33 мкФ 50 В	7	7 грн/шт
Схеми інтегральні			
DD1 – DD6	PC817	6	15.8 грн/шт
DD7 – DD12	HCPL-4504	6	60.27 грн/шт
DD13	PM450CLA120	1	21862 грн/шт
DD14	LV 25-600/SP2	1	2077.1 грн/шт
DD15, DD16	LA 255-S	2	6114.27 грн/шт
DD17	THN 20-2423WI	1	184 грн/шт

Продовження табл. 6.1

1	2	3	4
DD18	MC7805BTG	1	22.53 грн/шт
DD19	ADP151AUJZ-3.3-R7	1	30.91 грн/шт
1	2	3	4
DD20 – DD25	LM78M15	6	49.5 грн/шт
DD26 – DD31	TEL 5-1223	6	759.91 грн/шт
Запобіжник			
FU1	PSR030FL0450Z 450 A	1	7347.37 грн/шт
Батареї			
GB1	Акумуляторна батарея на основі [10]	1	548627.89 грн
Реле			
K1	AMP 7-1414778-3	1	2720.71 грн/шт
Котушки індуктивності			
L1	TCK-050 325 мкГн	1	1625.9 грн/шт
L2	KLS18-EC36 68 мкГн	1	3 грн/шт
Двигуни			
M1	СДПМ EMRAX 268 91 кВт	1	131647 грн/шт
Резистори			
R1 – R6	MFR-25FTF52-400R 400 Ом	6	0.4 грн/шт
R7	MFR-25FRF52-25R5 25.5 Ом	1	0.4 грн/шт
R8 – R13	MFR-25FRF52-10K 10 кОм	6	0.4 грн/шт
R14	UAL50-3RF8 3 Ом	1	0.4 грн/шт
R15	MFR-25FTF52-53R6 56 кОм	1	0.4 грн/шт
R16, R17	MFR-25FTF52-12R 12 Ом	2	0.4 грн/шт
RU1	V460LA7PX2855 643.5 В	1	19.1/шт

Продовження табл. 6.1

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Пристрої напівпровідникові			
VD1	RGP15B-E3/54	1	19.69/шт
VT1	FMMTL619TA	1	15.27/шт
З'єднання контактні			
X1 – X4	DG126-5.0-02P-14-00A(H) 2к	24	2,2 грн/шт
Всього			739654 грн

Таблиця 6.2 – Перелік елементів схеми керуючого контролера

Позначення	Назва	Кіл.	Примітки
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Конденсатори			
C1 – C21	0.1 мкФ	19	2 грн/шт
Схеми інтегральні			
DD1 – DD2	REF3130	2	103.85 грн/шт
DD3– DD4	LM393D	2	4 грн/шт
DD5	TMS320F280021	1	84.52 грн/шт
DD6	74HCT541D	1	23.11 грн/шт
DD7	74LVC245	1	26.91 грн/шт
DD8	MCP7951X0	1	40.96/шт
DD9	FM25V10	1	3.22 грн/шт
DD10	PCA82C250	1	48 грн/шт
DD11	FT232RL	1	265 грн/шт
Батареї, кварцові резонатори			
G1	ECS-.327-8-14X 32.768 кГц	1	29.25/шт
GB1	CR2032	1	33 грн/шт

Продовження табл. 6.2

1	2	3	4
Котушки індуктивності			
L1	KLS18-EC36 68 мкГн	7	3 грн/шт
Резистори			
R1, R6	2 кОм	6	0.4 грн/шт
R2, R5, R7, R10	1 кОм	4	0.4 грн/шт
R3, R8	374 Ом	2	0.4 грн/шт
R4, R9	1.5 кОм	2	0.4 грн/шт
R12, R13	10 кОм	2	0.4 грн/шт
З'єднання контактні			
X1 – X4	DG126-5.0-02P-14-00A(H) 2к	24	2.2 грн/шт
X5	USB type A роз'єм	1	15/шт
Всього			907 грн

При обчисленні вартості елементної бази використовувалися зарубіжні сайти [55], [56], [109] та українські [110], [111]. Ціни компонентів були переведені в гривні за курсом НБУ \$1 = 36.57 грн на листопад 2022 року.

Вартість переведення автомобіля Renault Logan на електротягу складає:

$$Q = Q_{\text{силова}} + Q_{\text{мікроконтролена}} = 739654 + 9037 = 748691 \text{ грн } (\$20472.82)$$

Якщо звернутися до сервісу AUTO.RIA [2], бачимо, що ціна на вторинному ринку автомобіля Renault Logan сягає близько ~\$5000, тому загальна ціна електромобіля на базі Renault Logan буде сягати ~\$25000.

Причому, якщо не враховуючи вартість батареї 548627.89 грн (\$15000), то вартість переробки буде коштувати приблизно ~\$5000, тобто сумарно з самим автомобілем буде коштувати ~\$10000.

Висока вартість на акумулятори зумовлена останніми подіями, які спричинили дефіцит акумуляторів, і відповідно необхідно було штучно підняти ціну, щоб всі покупці могли отримати акумулятори. Тому, щоб адекватно

оцінювати період окупності, було прийнято відштовхуватися від суми \$10000 або 365700 грн.

6.2 Визначення періоду окупності проекту

Розрахуємо період окупності електромеханічної системи. Розхід пального Renault Logan складає приблизно 6.2 л на 100 км, тобто $W_{\text{бенз}} = 0.062$ л/км.

Визначимо к-сть електроенергії яка споживається за проїзд транспортним засобом 1 км після модернізації за виразом:

$$W_{\text{ел.ен}} = \frac{W_2}{3600S_{\text{max}}} = \frac{1.356 \cdot 10^8}{3600 \cdot 200} = 188.33 \text{ Вт} \cdot \text{год/км}. \quad (6.1)$$

Визначимо вартість проїзду дистанції 1 км, для умов до та після модернізації за наступними виразами:

$$p_{\text{км.бенз}} = W_{\text{бенз}} \cdot p_{\text{бенз}} = 0.062 \cdot 51.62 = 3.2 \text{ грн/км}, \quad (6.2)$$

де $p_{\text{бенз}} = 51.62$ грн/л – середня ціна бензину А-95 в Україні станом на листопад 2022 р.

$$p_{\text{км.ел}} = W_{\text{ел.ен}} \cdot p_{\text{ел.ен}} = 188.33 \cdot 1.44 \cdot 10^{-3} = 0.27 \text{ грн/км} \quad (6.3)$$

де $p_{\text{бенз}} = 1.44$ грн/кВт·год – ціна за 1 кВт-год електроенергії для споживачів в Україні станом на 23.06.2022р.

Розрахуємо різницю в ціні проїзду на дистанцію 1км для умов до та після модернізації за наступною рівністю:

$$p_{\text{різн}} = p_{\text{км.бенз}} - p_{\text{км.ел}} = 3.2 - 0.27 = 2.93 \text{ грн/км}. \quad (6.4)$$

Розрахуємо, за який пробіг транспортного засобу окупиться вартість електромеханічної системи.

Береться до уваги декілька показників вартості:

- $p_1 = \$20000$ (вартість переробки, акумулятора);
- $p_2 = \$5000$ (вартість переробки).

Тоді, переводячи в грн, пробіг буде:

$$\begin{aligned} S_{\text{окуп1}} &= \frac{p_1}{p_{\text{різн}}} = \frac{731400}{2.93} = 249625 \text{ км}, \\ S_{\text{окуп2}} &= \frac{p_2}{p_{\text{різн}}} = \frac{182850}{2.93} = 62406 \text{ км}. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Нехай в день в середньому транспортний засіб проїжджає $S_{\text{день}} = 50$ км, розрахуємо період окупності електромеханічної системи за виразом:.

$$\begin{aligned} T_{\text{окуп1}} &= \frac{S_{\text{окуп}}}{S_{\text{день}}} = \frac{249625}{50} \approx 4993 \text{ днів} \approx 13.7 \text{ років}, \\ T_{\text{окуп2}} &= \frac{S_{\text{окуп}}}{S_{\text{день}}} = \frac{62406}{50} \approx 1248 \text{ днів} \approx 3.4 \text{ років}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

З виразу (6.6) видно, що на окупність електромеханічної системи становить 13,7 років, а якщо не враховувати вартість батареї – то 3,4.

Висновки до розділу

1. Обрахована вартість елементної бази. Загальна вартість силової частини схеми становить 739654 грн, а мікроконтролерної – всього 907 грн, тобто всього 748691 грн (\$20472.82). Більша частина вартості складає батарея (\$15002.13).
2. Вартість Renault Logan на вторинному ринку складає ~ \$5000, тобто загальна вартість розробки складає ~ \$25000.
3. Окупність переробки на електротягу з врахуванням ціни батареї складає 13,7 років, без врахування – 3,4. Але слід звернути увагу, що зараз ринок акумуляторних батарей переживає не найлегші часи, тому очікувано що з часом ціни на батареї знизяться і окупність збільшиться.
4. Основну вартість складає силова частина, тому відшукавши більш дешевше обладнання можна здешевити розробку. В мікроконтролерній частині можна розвиватися, додавати пристрої, покращувати функціонал, що підвищує цінність розробки.

7 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

Необхідно провести маркетинговий аналіз [112] стартап-проекту задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження. Проведення маркетингового аналізу передбачає виконання нижче-наведених етапів.

7.1 Початковий етап стартап-проекту

В ході роботи проаналізовано зміст ідеї (мети дисертації), що пропонується, можливі напрямки застосування, основні вигоди, що може отримати користувач товару за кожним напрямком застосування та зведено до табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Переведення традиційної електромеханічної системи автомобіля з двигуном внутрішнього згорання на електричну тягу на основі СДПМ	Комплекти, що необхідні для переобладнання транспортних засобів	Можливість самостійно зробити електромобіль, взявши за основу автомобіль з ДВЗ
	Технічна інформація, про напрацювання над реальним об'єктом	Економія часу та коштів при використанні готових технологій
	Виготовлення серійних електромобілів	Полягають у перевагах електромобілів відносно традиційних транспортних засобів

Далі було визначено потенційні техніко-економічні переваги ідеї (табл. 7.2), тобто чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників. Порівняння із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні).

Порівняння виконано відносно бюджетних електромобілів Nissan Leaf [113] та Renault Zoe [114] .

Таблиця 7.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні конкуренти			W	N	S
		Наша ідея	Nissan Leaf	Renault ZOE			
1	Вартість, дол. США	25000	30000	30000			+
2	Розгін до 100 км/год, с	10*	7,9	11.4		+	
3	Вага батареї, кг	319.41	300**	326		+	
4	Тип елементів батареї	LiFePo ₄	Li-ion	Li-ion			+
5	Максимальна швидкість, км/год	158	144	134			+
6	Використання готового загальнопромислового рішення	+	-	-			+
7	Можливість модернізації	+	-	-			+

* згідно з рис. 4.4 при подачі моменту навантаження 400 Нм.

** так, як в технічній документації немає, тому взяте усереднене значення, взяте Інтернет-джерел.

Виходячи з табл. 7.2 видно, що стартап є конкурентоспроможним.

7.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових, що зведені в табл. 7.3.

Таблиця 7.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Вибір основи ТЗ	Закупівля на вторинному ринку автомобіля (можливо без двигуна) та подальше використання	+	+
2	Вибір АКБ	Закупівля готових елементів, пайка, монтаж та підключення	+	+
3	Вибір ЕД	Закупівля готового виробу, монтаж та підключення	+	+
4	Вибір силової схеми	Закупівля готових елементів, пайка, монтаж та підключення	+	+
5	Вибір схеми керування	Закупівля готових елементів, пайка, монтаж та підключення	+	+
6	Розробка алгоритму керування	Програмування контролера	+	+

Аналізуючи табл. 7.3, можна зробити висновок, що технологічна реалізація виробу можлива. В основному це закупка готової елементної бази, і, відповідно, її збір в готовий ТЗ.

7.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Необхідно визначити ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити реалізації проекту. Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 7.4).

Таблиця 7.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	8*
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1 000 000
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Обов'язкова сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Оцінка відповідності за підсумками проведення випробувань товару**
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	4.4***

* згідно з даними [115].

** згідно норм та правил [116].

*** рентабельність діяльності транспорту та логістики за 1 кв. 2021 р. [117].

Потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи занесено до табл. 7.5

Таблиця 7.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Пересування в місті	Фізичні та юридичні особи	Відмінна візуальна складова та презентабельність, орієнтація на критиків	До продукції: виправдана ціна, якість, надійність. До компанії: офіційний сервіс, кредитні програми, гарантійні зобов'язання.
2	Робочі поїздки та виклики	Патрульні служби, мед. заклади, комунальні компанії, таксі, інші компанії	Використання ТЗ протягом усього робочого дня	До продукції: виправдана ціна, якість, надійність, можливість перевозити додаткове обладнання До компанії: офіційний сервіс, кредитні програми, гарантійні зобов'язання.
3	Малогабаритні доставки в межах міста	Приватні підприємці, служби доставки	Використання ТЗ протягом усього робочого дня	До продукції: виправдана ціна, якість, надійність. До компанії: офіційний сервіс, кредитні програми, гарантійні зобов'язання.

Після визначення потенційних груп клієнтів складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. №№ 7.6-7.7).

Таблиця 7.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Наявність компаній монополістів на ринку	Розширення рекламної кампанії як товар вітчизняного виробника
2	Недостатність потужностей для серійного випуску продукції	Висока вартість виготовлення виробу, відсутність необхідного обладнання для виробництва	Знаходження більш дешевших технологій, і розробка нових технологічних операцій, або залучення додаткових потужностей
3	Поставки з КНР	Переривання поставок	Тримання у резерві 2-3 постачальників
4	Поставки з внутрішньо-українського ринку	Затримка поставок	Тримати резерв складових пристроїв на випадок затримок
5	Український ринок збуту	Корупційна складова	Постійна робота з юристами, поставки через прозорі тендери

Таблиця 7.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Наявність в Україні спеціалістів, що розуміються над більшістю складових пристроїв	Можливість з часом перейти на власне виробництва головних складових пристроїв	Залучення цих спеціалістів у перспективне проектування
2	Невисока ціна ТЗ	Можливість надати споживачу міський ТЗ, котрий не потребує великих затрат відносно традиційних ТЗ з ДВЗ	Маркетингова компанія націлена на міського споживача
3	Збільшення попиту на продукцію	Бажання багатьох покупців придбати товар	Розширення виробничих потужностей або знаходження виробничих потужностей за кордоном
4	Збільшення якості та усунення недоліків, які були помічені покупцем	Бажання компанії рухатись в правильному напрямку	Кооперація з існуючими компаніями

Визначимо загальні риси конкуренції на рику, табл. 7.8.

Таблиця 7.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції: олігополія	Відносно невелика кількість виробників	Диктування вимог для ринку, нешвидке входження на ринок, малий відсоток проданої продукції, необхідність рекламної кампанії
Рівень конкурентної боротьби: національна	Компанії націлені на українського споживача	Підбір обладнання за мінімально можливою ціною із збереженням якості
За галузевою ознакою: міжгалузева	Конкуренти можуть запропонувати велику кількість різних інших ТЗ	Можлива розробка інших проектів, для виготовлення більш широкого асортименту продукції
За видами товарів: товарно-родова, товарно-видова	Товарно-родова: види товарів конкурентів є різними, оскільки використовуються різні технології і процеси. Товарно-видова: електромобілі ціною 30 000 \$.	Товарно-родова: при таких самих можливостях і функціях реалізований електромобіль має низьку собівартість. Товарно-видова: забезпечення ТЗ всіма додатковими пристроями.
За характером конкурентних переваг: цінова	Бюджетні електромобілі до 30 000 \$	Використання технологічних операцій, з метою зменшення собівартості
За інтенсивністю: марочна	Конкуренти являються відомими брендами в цій сфері	Створення власної фірми та використання активної рекламної кампанії. Надання знижок та збільшення гарантійного терміну.

Після аналізу конкуренції необхідно провести більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера [1] (табл. 7.9).

Таблиця 7.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Nissan, Renault, Volkswagen, Hyundai	Конкуренція, маловідомість, відсутність репутації	Затримки, відсутність товарів	Платоспром., популярність серед людей, зовнішня критика	Ціна, більш презентаб. вигляд
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

В табл. 6.9 (1) – (6) позначено як:

- (1) – *Висновок*: робота на ринку ускладнена макроекономічною ситуацією, проте наявна перспектива розвитку.
- (2) – Кожен з конкурентів пропонує свої ТЗ, але кожен з них має свої особливості, а також переваги і недоліки.
- (3) – Можливості входу в ринок є. В залежності від потреб покупців конкурентами можуть бути всі компанії. Термін виходу на ринок – 6 місяців
- (4) – Напрямку постачальників нема, проте опосередковано затримки доставок елементної бази можуть впливати на дату виходу автомобіля.
- (5) – Клієнти диктують умови своєю платоспроможністю на технічні та цінові характеристики продуктів, при цьому обираючи надійні та відомі бренди.
- (6) – Товари-замінники можуть бути замінені запропонованим електромобілем з кращими технічними характеристиками і якістю. Робота на ринку обмежена використанням авто з вторинного ринку.

На основі проведеного аналізу конкуренції (табл. 7.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 7.2), вимог споживачів до товару (табл. 7.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 7.6-7.7)

визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлено в табл. 7.10.

Таблиця 7.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Можливість збільшення запасу ходу, модернізації та покращення деяких характеристик транспортного засобу	Робить товар для користувачів привабливим, і з такими характеристиками, яких немає в інших
2	Мала собівартість	Робить товар для покупців привабливим, оскільки, вже можливо задуматись над більш дешевою продукцією
3	Покращена батарея	Тип елементів батареї LiFePo ₄
4	Швидкісні характеристики	Розгін до 100 км/год на рівні з автомобілями за 30000 \$, і навіть вище
5	Вага батареї	Вага батареї на рівні автомобілями за 30000 \$

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 7.10) здійснено аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 7.11).

Таблиця 7.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Nissan Leaf						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Можливість апгрейду	20	*						
2	Менша собівартість	20		*					
3	Покращена батарея	15	*						
4	Швидкісні характеристики	10							*
5	Вага батареї	15				*			

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 7.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 7.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 7.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
Низька собівартість, можливість апгрейду, велика швидкість та час розгону	Середній рівень комфорту, бідний перелік можливостей в салоні, невеликий пробіг від одного заряду
Можливості	Загрози
Збільшення якості виробу та можлива розробка інших проектів, для виготовлення більш широкого асортименту продукції, перехід на власне виробництво	Конкуренція, втрата можливих клієнтів в наслідок здороження компонентів для випробу, обмежений час на впровадження та пошук ринку збуту.

На основі SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки (табл. 7.13) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл. 7.9, аналіз потенційних конкурентів).

Таблиця 7.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Виготовлення готових комплектів для самостійного створення транспортного засобу з використанням доступних елементів, виготовлення електромобіля самостійно з підручних матеріалів	90%	2 місяці
2	Розробка технічної документації, завдання виробництва та готового проекту для заводського виготовлення готових комплектів та електромобілів	40%	6 місяців

Виходячи з аналізу ринкової можливості запуску проекту, робиться висновок, що альтернатива №1 є більш привабливою, оскільки строки реалізації менші і отримання ресурсів ймовірніші. Хоча альтернатива №2 є також досить привабливою, але свої плоди вона почне приносити значно пізніше, і ймовірність отримання ресурсів є меншим і туманними.

7.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 7.14).

Таблиця 7.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенц. клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Індивідуальне використання	Можливе виникнення зауважень щодо функціональних можливостей та комфортності транспортного засобу	Користувачі будуть зацікавлені в подібній системі для зменшення грошових витрат порівняно з іншими	Існує багато конкуренти. Але їх запропонован а продукція є більш дорогою, та складнішою в експлуатації,	При вході у сегмент можуть виникнути проблеми через рекламацію продукту, та невідомість фірми
2	Комерційне використання	Дешевизна готової продукції, а також її велика кількість зацікавить великих споживачів	аналогами та економії на паливі, при використанні електроенергії.	хоча має гарні технічні характеристи ки.	
Обрано основну цільову групу – індивідуального споживача, оскільки для них питання економії фінансів на транспортному засобі є більш пріоритетні і додаткову – підприємства, якщо їх потреби будуть забезпечуватися, і вони будуть співпрацювати з фірмою яка має малий стаж роботи на ринку. Це характеризує стратегію диференційованого маркетингу.					

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 7.15).

Таблиця 7.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Виготовлення готових комплектів для самостійного створення транспортного засобу з використанням доступних елементів, виготовлення електромобіля самостійно з підручних матеріалів.	Робота через представників	Можливість збільшення запасу ходу, модернізації та покращення деяких характеристик, ціна, покращена батарея, пристойна швидкість та час розгону	Стратегія диференціації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 7.16).

Таблиця 7.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так	Компанія буде шукати нових споживачів і приваблювати споживачів конкурентів	Буде, адже електромобілі описуються за однаковими характеристиками	Стратегія наслідування лідеру

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. табл. 7.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 7.15) та стратегії конкурентної

поведінки (табл. 7.16) розробляється стратегія позиціонування (табл. 7.17), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 7.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Виправдана ціна, якість, надійність.	Стратегія диференціації	Можливість збільшення запасу ходу, модернізації та покращення деяких характеристик, ціна, покращена батарея, пристойна швидкість та час розгону	Доступність, ціна, швидкість

Результатом виконання підрозділу має стати узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначатиме напрями роботи стартап-компанії на ринку.

7.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 7.18 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 7.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Готовий комплект електромеханічної системи для встановлення (переобладнання) на транспортний засіб	Можливість досить дешево переобладнати свій ТЗ в електромобіль	Рішення підходить для будь якого транспортного засобу, ідеально підходить для пересування в місті.
2	Пересування	Комфортне пересування	Ціна, комфорт, комплектація
3	Нульові викиди та відсутність вібрацій	Електропривод	Електромобіль цілком забезпечує дані потреби
4	Економія та менші витрати коштів	Заряджання від мережі, меча ціна покупки	Електромобіль цілком забезпечує дані потреби

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 7.19).

Таблиця 7.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Дешеве пересування містом при малих капіталовкладеннях, наявність великої кількості додаткових пристроїв за низькою ціною		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм*	Вр/Тх/Тл/Е/Ор*
	1. Можна переобладнати будь який транспортний засіб в електромобіль	М	Тх
	2. Запас ходу	Нм	Тх
	3. Простота та комфорт	М	Е
	4. Дешевизна	Нм	Вр
	5. Екологічність	М	-
	6. Відсутність шуму, вібрацій	М	Ор
	7. Швидкість	Нм	Тх
	Якість: Тестування при налаштуванні та випробування проводитимуться або на заводі для готового електромобіля; або індивідуальним власником готового комплекту, за допомогою спеціального ПЗ. Система контролю якості ISO 9001		
	Пакування: відсутнє		
Марка: TCP RL-22			
III. Товар із підкріпленням	До продажу: програмування і наладка		
	Після продажу: Технічна підтримка проданого товару спеціалістами		
Потенційний товар буде захищено від копіювання за допомогою створення патенту			

* М/Нм – монотонні/немонотонні; Вр/Тх/Тл/Е/Ор – вартісні/ технічні/ технологічні/ ергономічні/ органолептичні.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 7.20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 7.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	30 000 \$	30 000 \$	600\$ на міс.	25 000 – 35 000 \$

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 7.21):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 7.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Полягає у створення системи збуту та відповідної інфраструктури	Поставка, виїзний сервіс	Напрямую або через одного посередника	З залученням сторонніх компаній

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 7.22).

Таблиця 7.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Купівля продукції компанії для встановлення на транспортний засіб. Транспортний засіб використ. для пересування	Живе спілкування, інтернет, мобільний зв'язок.	Електромобіль використанням готових комплектів.	Представити можливість закупки товару за низькою ціною, показати переваги розробленої системи електромобіля у тому числі і в порівнянні з конкурентами.	Привітання, загальна інформація, технічні дані, вартість.

Висновки до розділу

В результаті розробки стартап-проекту ідеї отримано наступні результати:

1. На ринку наявний попит на бюджетні електромобілі, динаміка ринку має зростаючий характер, рентабельність в галузі 4.4 %.
2. Потенційними клієнтами можуть бути як фізичні та юридичні особи, так і патрульні служби, мед. заклади, комунальні компанії, таксі. Також приватні підприємці та служби доставки охоче будуть використовувати даний вид транспортного засобу.

3. Діяльність масового виробництва буде характеризуватися диктуванням вимог для ринку, нешвидким входженням на ринок, малим відсотком проданої продукції та необхідності рекламних кампаній.
4. Конкуренція в галузі характеризується олігополією, рівень конкурентної боротьби: національна. За галузевою ознакою – міжгалузева, а за видами товарів – товарно-родова та товарно-видова. Характер конкурентних переваг – ціновий, інтенсивність – марочна.
5. Основними конкурентоспроможними техніко-економічними характеристиками транспортного засобу може стати: вартість, час розгін до 100 км/год, вага батареї, тип елементів батареї, максимальна швидкість. Також основними перевагами даного електромобіля може стати використання даного прототипу як готового загальнопромислового рішення та можливість модернізації.
6. Альтернативою впровадження проекту стало виготовлення готових комплектів для самостійного створення транспортного засобу з використанням доступних елементів, виготовлення електромобіля самостійно з підручних матеріалів.
7. Подальша імплементація проекту є доцільною, так як ринок транспортних засобів такого сегменту є недостатньо наповнений.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Магістерська дисертація присвячена вирішенню актуального питання – розробка електромеханічної системи електромобіля на основі синхронного двигуна із постійними магнітами. За результатами роботи отримані наступні результати:

1. Для розробки електромеханічної системи обарно бюджетний транспортний засіб на базі двигуна внутрішнього згорання – Renault Logan.
2. Використовуючи типову тахограму руху (driving cycle) для їзди в місті була розрахована навантажувальна діаграма. По максимальному моменту навантаження $400 \text{ Н} \cdot \text{м}$ було вибрано СДПМ EMRAX 268, яких підходить по попереднім вимогам та розрахункам.
3. Встановлено, що для забезпечення запасу ходу в 200 км необхідно використати елементи Shenzhen GTech LiFePO4 3.2V 25Ah в кількості 507 шт., при цьому маса батареї складає 319.41 кг, об'єм $0,17 \text{ м}^3$, вартість \$15002.13. Суперконденсатори в порівнянні з АКБ мають досить високу ціну (\$73728), тому будувати тягову батарею суто на суперконденсаторах не є доцільним рішенням.
4. Здійснено аналіз існуючих способів керування синхронним двигуном. На основі сучасних тенденцій вибрано алгоритм векторного прямого керування моментом, так як в більшості випадів в електромобілях використовується керування моментом. Векторне керування моментом СД описано за допомогою принципу розділення на електромеханічну та електромагнітну підсистеми.
5. Проведено моделювання, система відпрацює чітко задану траєкторію моменту. Також результати моделювання підтверджують технічні характеристики двигуна. Визначено максимальний ухил дороги, при якому може рухатися транспортний засіб. Розрахований автомобіль на

основі СДПМ EMRAX 268 може долати ухили близько %, що характеризується в гірській місцевості. Завантаженість автомобіля майже не впливає на величину можливого ухилу. При подачі номінального моменту ($213 \text{ Н} \cdot \text{м}$) авто розганяється до 100 км/год за 18 с , а якщо двигун трішки перевантажити, то подавши значення $350 \text{ Н} \cdot \text{м}$, яке забезпечує розгін до сотні за 10 с .

6. Розроблено силову схему синхронного електроприводу на базі ІРМ та схему керуючого контролера TMS320F280021. Здійснено розрахунок основних елементів. Обрахована вартість елементної бази. Загальна вартість силовій частини схеми становить 739654 грн , а мікроконтролерної – 907 грн , тобто всього 748691 грн ($\$20472.82$). Окупність переробки на електротягу з врахуванням ціни батареї складає $13,7$ років, без врахування – $3,4$.
7. Розроблено стартап-проект ідеї, визначено, що потенційними клієнтами можуть бути як фізичні та юридичні особи, так і патрульні служби, мед. заклади, комунальні компанії, таксі. Діяльність масового виробництва буде характеризуватися диктуванням вимог для ринку, нешвидким входженням на ринок, малим відсотком проданої продукції та необхідності рекламних кампаній. Основними конкурентоспроможними показниками автомобіля може стати: вартість, час розгін до 100 км/год , вага батареї, тип елементів батареї, максимальна швидкість тощо. Альтернативою впровадження проекту стало виготовлення готових комплектів для самостійного створення транспортного засобу з використанням доступних елементів, виготовлення електромобіля самостійно з підручних матеріалів. Подальша імплементація проекту є доцільною, так як ринок транспортних засобів такого сегменту є недостатньо наповнений.

Отже, опираючись на результатах та висновках можна відмітити, що всі задачі дослідження магістерської дисертації було вирішено.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Modling A., Åbrandt B. Electric conversion of combustion engine cars. 2022. P. 64.
2. Altenburg T. From combustion engines to electric vehicles //Deutsches Institut für Entwicklungspolitik, Bonn. 2014. 56 p.
3. Eydgahi A., Long E. Converting an Internal Combustion Engine Vehicle to an Electric Vehicle. 2011 ASEE Annual Conference & Exposition, Vancouver, BC, 26–29 June 2011. URL: <https://doi.org/10.18260/1-2--17662> (date of access: 12.12.2022).
4. Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу. Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу. URL: <https://epa.kpi.ua/> (дата звернення: 12.12.2022).
5. Мельник, О. О. До вибору електромеханічної частини електробуса для міських перевезень / О. О. Мельник, Є. О. Ніконенко, С. М. Пересада // Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації : збірник наукових праць XV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у м. Кременчук 11–12 квітня 2017. Кременчук : КрНУ, 2017. С. 17–19.
6. Бугайчук, Б. В. Прототип електромобіля з векторно керованим асинхронним електроприводом : магістерська дис. : 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Бугайчук Богдан Вікторович. - Київ, 2021. - 144 с.
7. Грабченко А. І. Методи наукових досліджень : навч. посібник / А. І. Грабченко, В. О. Федорович, Я. М. Гаращенко ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків : НТУ "ХПІ", 2009. 142 с.
8. Statistical pocketbook 2011. Mobility and Transport. URL: https://transport.ec.europa.eu/media-corner/publications/statistical-pocketbook-2011_en (date of access: 12.12.2022).

9. Kohn, E., Huang, C., Kong, N., & Hardman, S. Electric Vehicle Incentives in 15 Leading Electric Vehicle Markets. 2022. 31 p.
10. A Study on Additive Manufacturing for Electromobility / D. Schuhmann et al. World Electric Vehicle Journal. 2022. Vol. 13, no. 8. 154 p. URL: <https://doi.org/10.3390/wevj13080154> (date of access: 12.12.2022).
11. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges / J. A. Sanguesa et al. Smart Cities. 2021. Vol. 4, no. 1. P. 372–404. URL: <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022> (date of access: 12.12.2022).
12. Kane M. Nissan Reveals LEAF e-Plus: 62 kWh Battery, 226-Mile Range. InsideEVs. URL: <https://insideevs.com/news/341958/nissan-reveals-leaf-e-plus-62-kwh-battery-226-mile-range/> (date of access: 12.12.2022).
13. 2022 Outlander PHEV Specs, Battery, Torque & More | Mitsubishi Motors. Mitsubishi Motors US. URL: <https://www.mitsubishicars.com/cars-and-suvs/outlander-phev/specs> (date of access: 12.12.2022).
14. 2014 Toyota Prius PHV: To plug in or not to plug in?. The Car Guide. URL: <https://www.guideautoweb.com/en/articles/21152/2014-toyota-prius-phv-to-plug-in-or-not-to-plug-in/> (date of access: 12.12.2022).
15. Maggetto, G.; Van, M.J. Electric vehicles, hybrid electric vehicles and fuel cell electric vehicles: State of the art and perspectives. Ann. De Chim. Sci. Des Matériaux 2001, 26, P. 9–26. [CrossRef]
16. Furukawa, J.; Takada, T.; Monma, D.; Lam, L.T. Further demonstration of the VRLA-type Ultra Battery under medium-HEV duty and development of the flooded-type Ultra Battery for micro-HEV applications. J. Power Sources 2010. P. 1241–1245.
17. Liu, Z.F.; Andrej, I.; Simona, O. Aging characterization and modeling of nickel-manganese-cobalt lithium-ion batteries for 48V mild hybrid electric vehicle applications. J. Energy Storage 2019. P. 519–527.
18. Benajes, J.; García, A.; Monsalve-Serrano, J.; Martinez-Boggio, S. Optimization of the parallel and mild hybrid vehicle platforms operating under conventional and advanced combustion modes. Energy Convers. Manag. 2019. P. 73–90.

19. Zhang, J.M.; Liu, J.L.; Xue, M.Z. Analyses of the relation between degree of mixing and regenerative braking in hybrid electric vehicles. *Adv. Mater. Res.* 2014. P. 743–746.
20. What is a belt or integrated starter generator?. *Electronics News | Electronic Specifier*. URL: <https://www.electronicspecifier.com/industries/automotive/what-is-a-belt-or-integrated-starter-generator> (date of access: 12.12.2022).
21. A Comprehensive Review on Classification, Energy Management Strategy, and Control Algorithm for Hybrid Electric Vehicles / Q. Xue et al. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 20. P. 5355. URL: <https://doi.org/10.3390/en13205355> (date of access: 12.12.2022).
22. NEXO press kit. Hyundai Europe. URL: <https://www.hyundai.news/eu/models/electrified/nexo/press-kit.html> (date of access: 12.12.2022).
23. Kane M. 2019 BMW i3, i3 REx, i3s & i3s REx: Full Specs. *InsideEVs*. URL: <https://insideevs.com/news/339970/2019-bmw-i3-i3-rex-i3s-amp-i3s-rex-full-specs/> (date of access: 12.12.2022).
24. Chan C. C. The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2007. Vol. 95, no. 4. P. 704–718. URL: <https://doi.org/10.1109/jproc.2007.892489> (date of access: 12.12.2022).
25. Roadmap for Electric Mobility 2022 | Climate Policy Database. Home | Climate Policy Database. URL: <https://www.climatepolicydatabase.org/policies/roadmap-electric-mobility-2022> (date of access: 12.12.2022).
26. Global EV Outlook 2022 – Analysis - IEA. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022> (date of access: 12.12.2022).
27. EV-Volumes - The Electric Vehicle World Sales Database. EV-Volumes - The Electric Vehicle World Sales Database. URL: <https://www.ev-volumes.com/> (date of access: 12.12.2022).

28. Best-Selling Electric Vehicles of All Time. MotorBiscuit. URL: <https://www.motorbiscuit.com/best-selling-electric-vehicles-of-all-time/> (date of access: 12.12.2022).
29. Eardley, C. Electric Mobility: Inevitable, or Not? Final report 43. URL: https://www.platformelectromobility.eu/wpcontent/uploads/2022/01/20220110_InevitableEV_Final.pdf (date of access: 12.12.2022).
30. Gieras/Wing. Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications Revised and Expanded. Marcel Dekker Ltd, 2002. 608 p.
31. T. Sebastian, G.R. Slemon, "Operating limits of inverter driven permanent magnet motor drives", IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 23, No. 2, P. 327-333,
32. Chin Y. K., Soulard J. A permanent magnet synchronous motor for traction applications of electric vehicles //IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE, 2003. T. 2. P. 1035-1041.
33. Permanent Magnet Synchronous Motor : Construction & Its Working. ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students. URL: <https://www.elprocus.com/what-is-a-permanent-magnet-synchronous-motor-its-working/> (date of access: 12.12.2022).
34. Design and research of permanent magnet synchronous motor controller for electric vehicle / Q. Huang et al. Energy Science & Engineering. 2022. URL: <https://doi.org/10.1002/ese3.1316> (date of access: 12.12.2022).
35. Bai Shan, Yu Songjian. Design and Analysis on Permanent Magnet Synchronous Motor for Modern Electric Vehicle [J]. Electric Age, 2016, 12 (12): P. 58-60.
36. Yousfi D., Elbacha A., Ouahman A. A. Efficient sensorless PMSM drive for electric vehicle traction systems //Electric Vehicles-Modelling and Simulations. 2011. P. 199.
37. Yang S. In-wheel motors for electric vehicles : Electronic Thesis or Dissertation. 2017. URL: <http://hdl.handle.net/10443/4054> (date of access: 12.12.2022).

38. Motor Types | Renesas. Renesas Electronics Corporation. URL: <https://www.renesas.com/us/en/application/key-technology/motor-control-robotics/motor-types> (date of access: 12.12.2022).
39. C. Studer, A. Keyhani, and T. Sebastian, "Study of cogging torque in permanent magnet machines," *Electric Machines Power Syst.*, vol. 27. 1999. P. 665–678.
40. T. Renyuan, *Theory and Design of the Modern Permanent Magnet Electric Machines*. Beijing, China: Publishing House of Mechanical Industry, 1997, P. 268–270.
41. E-MOTORS - EMRAX. EMRAX. URL: <https://emrax.com/e-motors/> (date of access: 12.12.2022).
42. EMRAX 368. URL: <https://emrax.com/e-motors/emrax-348/> (date of access: 12.12.2022).
43. Учасники проєктів Вікімедіа. Dacia Logan – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Dacia_Logan (дата звернення: 26.06.2022).
44. Технічні характеристики Renault Logan (Рено Логан) | Офіційний дилер Renault в Україні. Renault Ukraine | Офіційний імпортер Renault в Україні. URL: <https://www.renault.ua/passenger/logan/features.html> (дата звернення: 26.06.2022).
45. Брошура Renault Logan. Виробництво в січні 2022. УкрАвтопром. URL: <https://cdn.group.renault.com/ren/ua/2020/pdf/logan-brochure.pdf.asset.pdf/c583c76c80.pdf> (дата звернення: 12.12.2022).
46. 2017 Dacia Sandero SCe 75. URL: https://www.automobile-catalog.com/car/2017/2514575/dacia_sandero_sce_75.html (дата звернення: 12.12.2022).
47. ІПС ЛІГА:ЗАКОН - система пошуку, аналізу та моніторингу нормативно-правової бази. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/NT1475> (дата звернення: 12.12.2022).
48. Розміри шин 185/65R15" – таблиці розмірів. URL: <https://razmery.info/tehnika/shiny/razmery-shin-185-65r15.html> (дата звернення: 12.12.2022).

49. Modern Electric Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Third Edition / M. Ehsani et al. Taylor & Francis Group, 2018. P. 546.
50. Driving Cycle (Simulink Block). MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46777-driving-cycle-simulink-block> (date of access: 12.12.2022).
51. EMRAX 268. URL: <https://emrax.com/e-motors/emrax-268/> (дата звернення: 12.12.2022).
52. Магазин литиевых аккумуляторов GreenTECH. GreenTech. URL: <https://greent.com.ua/> (дата звернення: 12.12.2022).
53. Интернет-магазин электротехники. Интернет-магазин электротехники Home-Energy: ⚡ Гарант надежного электропитания. URL: <https://home-energy.com.ua/> (дата звернення: 12.12.2022).
54. LogicPower - електроустаткування для дому, офісу та виробництва. LogicPower - електроустаткування для дому, офісу та виробництва. URL: <https://logicpower.ua/> (дата звернення: 12.12.2022).
55. DigiKey. URL: <https://www.digikey.com/> (дата звернення: 12.12.2022).
56. Mouser URL: <https://eu.mouser.com/> (дата звернення: 12.22.2022).
57. Аккумулятор LiFePO4 3.2V 25Ah – купить в Украине. GreenTech. URL: <https://greent.com.ua/akkumulyator-lifepo4-3-2v-25ah-art-2003> (дата звернення: 12.12.2022).
58. Аккумулятор LogicPower LP LiFePO4 6V - 12 Ah купить в Украине, низкая цена в Киеве. Интернет-магазин электротехники Home-Energy: ⚡ Гарант надежного электропитания. URL: <https://home-energy.com.ua/akkumulyatory/1934-logicpower-lp-lifepo4-6-12-ah.html> (дата звернення: 12.12.2022).
59. Ultracapacitors URL: <https://www.electronicstutorials.ws/capacitor/ultracapacitors.html> (date of access: 12.12.2022).

60. Как устроен суперконденсатор URL:
<https://bestenergy.com.ua/support/battery/bu-209> (дата звернення:
 12.12.2022).
61. Суперконденсаторы на транспорте и в электронике: есть ли смысл и перспективы? URL: <https://hype.tech/@boevoy-homyak/superkondensatory-natransporte-i-v-elektronike-est-li-smysl-i-perspektivy-3m58fgng> (дата звернення: 12.12.2022).
62. Supercapacitors URL:
https://www.sechsa.com/products/?gclid=Cj0KCQjw5PGFBhC2ARIsAIFIMNeH4p6IGiRm7CnB4O0q6pyaryh3oHXBJ76jOoqpG9bIpa2UvhyCmgaAuj6EALw_wcB (date of access: 12.12.2022).
63. Supercapacitor PR9000F05R3-111W245L-T URL:
<https://www.digikey.com/en/products/detail/powerresponder/PR9000F05R3-111W245L-T/13880121> (date of access: 12.12.2022).
64. Ultracapacitors . URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/ultracapacitors.html> (дата звернення: 26.06.2022).
65. Основи мехатроніки [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. М. Пересада, М. В. Пушкар. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,87 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 137 с.
66. Ocen D. Direct torque control of a permanent magnet synchronous motor. 2005. 62 p
67. Kronberg A. Design and simulation of field oriented control and direct torque control for a permanent magnet synchronous motor with positive saliency. 2012. 66 p.
68. Mudili A., Devendra P. Direct Torque Control Of Permanent Magnet Synchronous Motor. International Journal of Power System Operation and Energy Management. 2011. P. 27–30.
 URL: <https://doi.org/10.47893/ijpsoem.2011.1007> (date of access: 12.12.2022).

69. Liu H., Lin Y., Zhang J. Electromagnetic Torque Control for Three-phase Permanent Magnet Synchronous Motor //2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG). – IEEE, 2019. – P. 723-726.
70. Що таке геометрична прохідність автомобіля? | Заліщики Авто. Заліщики Авто | Ремонт коробок передач Рено Трафік,Мастер Renault Trafic,Master. URL: <https://zauto.com.ua/shcho-take-heometrychna-prokhidnist-avtomobilia/> (дата звернення: 12.12.2022).
71. 2.2. Поздовжні ухили на автомобільних дорогах. StudFiles. URL: <https://studfile.net/preview/5380092/page:2/> (дата звернення: 12.12.2022).
72. Варистор V460LA7PX2855. URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/littelfuse-inc/v460la7px2855/2501925>
73. Реле 7-1414778-3 URL: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/TE-Connectivity-AMP/7-1414778-3?qs=%252BJwDEtia2tXbipeJfFSg%3D%3D> (дата звернення: 26.06.2022).
74. Транзистор FMMTL619TA. URL: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Diodes-Incorporated/FMMTL619TA?qs=z1586jurcfz10cixyVSFLw%3D%3D> (дата звернення: 26.06.2022).
75. Діод RGP15B-E3/54. URL: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Vishay-General-Semiconductor/RGP15B-E3-54?qs=lBaII7KQBwp9m6kI4VJKVg%3D%3D> (дата звернення: 26.06.2022).
76. Резистор UAL50-3RF8. URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/riedon/UAL50-3RF8/3886547> (дата звернення: 26.06.2022).
77. Type BLH, DC Link Capacitors for Harsh Environments. URL: <https://www.cde.com/resources/catalogs/BLH.pdf> (дата звернення: 26.06.2022).

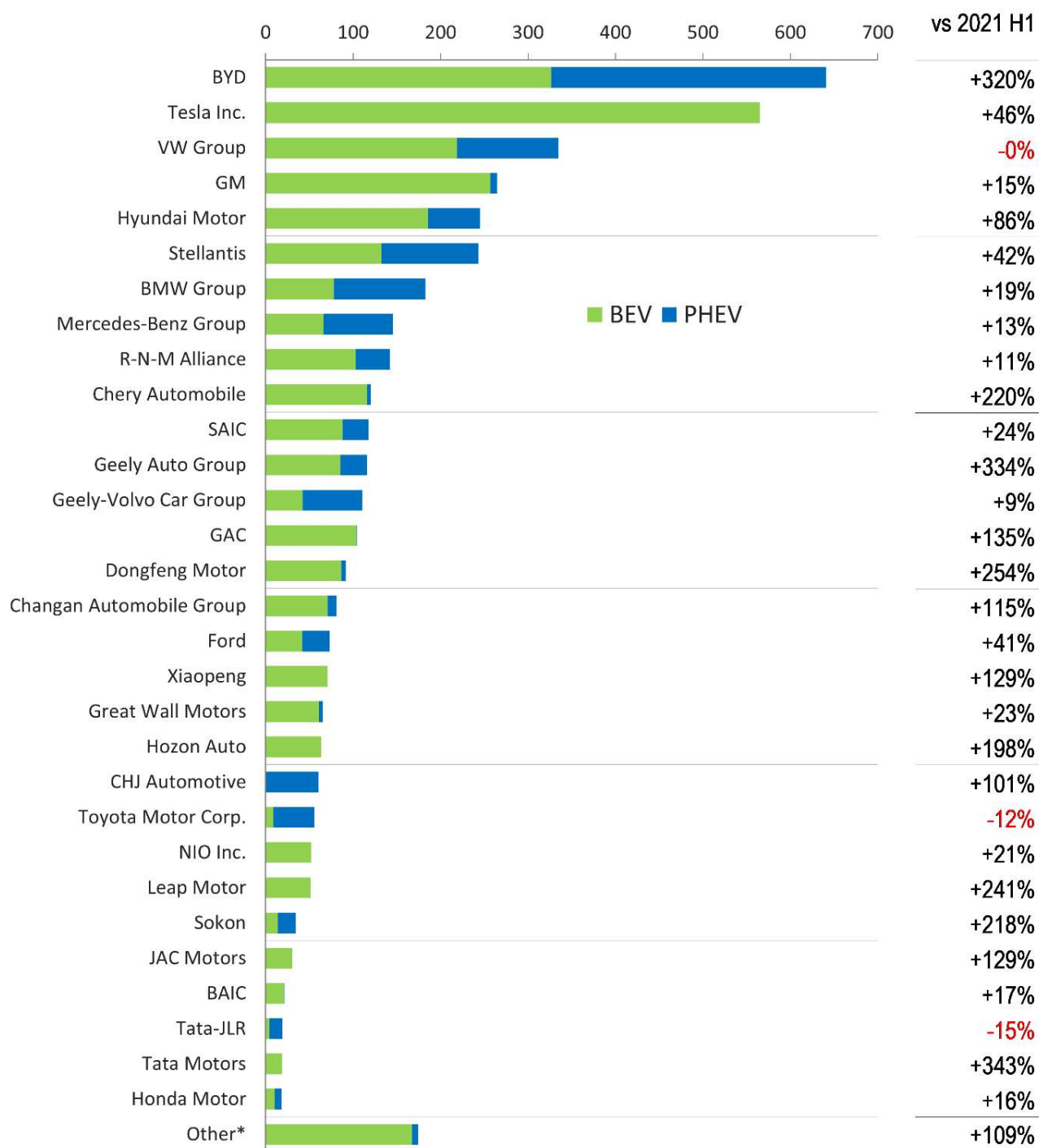
78. Конденсатор BLH107K551C114.
URL: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Cornell-Dubilier-CDE/BLH107K551C114?qs=4qgZ1GHix0Xzkrm79N2d4Q%3D%3D> (дата звернення: 26.06.2022).
79. M. Salcone and J. Bond, "Selecting film bus link capacitors for high performance inverter applications," 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009, P. 1692-1699.
80. ІПМ-модуль PM450CLA120. datasheet URL: https://www.mitsubishielectric-mesh.com/products/pdf/pm450cla120_e.pdf (дата звернення: 26.06.2022).
81. Оптипара HCPL-4504.
URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/broadcom-limited/HCPL-4504/637290> (дата звернення: 26.06.2022).
82. Оптипара BPC-817S.
URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/american-bright-optoelectronics-corporation/BPC-817S-C-BIN/9678143> (дата звернення: 26.06.2022).
83. Давач струму LA255. URL: <https://www.lem.com/en/la-255s> (дата звернення: 26.06.2022).
84. Давач струму LA255 datasheet.
URL: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la%20255-s%20e.pdf (дата звернення: 26.06.2022).
85. Давач напруги LV 25-600/SP2. URL: <https://www.lem.com/ru/lv-25600sp2> (дата звернення: 26.06.2022).
86. Давач напруги LV 25-600/SP2 datasheet.
URL: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_25-600_sp2.pdf (дата звернення: 26.06.2022).
87. Manual for EMRAX Motors/Generators. URL: https://emrax.com/wp-content/uploads/2020/03/manual_for_emrax_motors_version_5.4.pdf (дата звернення: 26.06.2022).

88. RM44 and RM58 rotary magnetic encoders.
URL: https://www.rls.si/eng/fileuploader/download/download/?d=1&file=custom%2Fupload%2FRM44D01_15.pdf (дата звернення: 26.06.2022).
89. Енкодер RM44 / RM5. 8 URL: <https://www.rls.si/eng/rm44-rm58> (дата звернення: 26.06.2022).
90. Запобіжник PSR030FL0450Z.
URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/littelfuse-inc/PSR030FL0450Z/8474052> (дата звернення: 26.06.2022).
91. Педаль LJHDFY Foot Throttle. URL: <https://www.aliexpress.com/i/1005004359310472.html> (дата звернення: 12.12.2022).
92. Мікроконтролер TMS320F280021.
URL: <https://www.ti.com/product/TMS320F280021/part-details/F280021PTSR> (дата звернення: 26.06.2022).
93. Мікроконтролер TMS320F280021 datasheet.
URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f280021.pdf?ts=1656255788965&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTMS320F280021%252Fpart-details%252FF280021PTSR (дата звернення: 26.06.2022).
94. Мікросхема пам'яті FM25V10-PG.
URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/cypress-semiconductor-corp/fm25v10-pg/7362824> (дата звернення: 26.06.2022).
95. Мікросхема годинника реального часу.
URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP7951X-MCP7952X-Battery-Backed-SPI-RTCC-20002300C.pdf> (дата звернення: 26.06.2022).
96. Кварцовий резонатор ECS-.327-8-14X.
URL: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/ECS/ECS-.327-8-14X?qs=gmcn8Ik9O3GnUY9EOA0Ggw%3D%3D> (дата звернення: 26.06.2022).

97. USB-інтерфейс FT232RL.
URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/ft232rl_22404.html (дата звернення: 26.06.2022).
98. CAN-інтерфейс PCA82C250.
URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/pca82c250_56808.html (дата звернення: 26.06.2022).
99. Джерело опорної напруги REF3130AIDBZR.
URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/texas-instruments/REF3130AIDBZR/1573931> (дата звернення: 26.06.2022).
100. Мікросхема двох операційних підсилювачів LM393D.
URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/lm393d_165487.html (дата звернення: 26.06.2022).
101. Мікросхема буфер 5В 74HCT541D.
URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/toshiba-semiconductor-and-storage/74HCT541D/6198963> (дата звернення: 26.06.2022).
102. Мікросхема буфер 3.3В SN74LVC245ANSR.
URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/texas-instruments/SN74LVC245ANSR/499514> (дата звернення: 26.06.2022).
103. DC/DC-перетворювач THN20-2423WI $\pm 15\text{В}$.
URL: <https://www.tracopower.com/int/model/thn-20-2423wi> (дата звернення: 26.06.2022).
104. Дросель TCK-050. URL: https://www.digikey.co.uk/en/products/detail/tracopower/TCK-050/9382114?utm_source=oemsecrets&utm_medium=aggregator&utm_campaign=buynow (дата звернення: 26.06.2022)
105. Лінійний регулятор напруги +LM78M15CT/NOPB 15В.
URL: <https://www.digikey.co.uk/en/products/detail/texas-instruments/lm78m15ct-nopb/7312547> (дата звернення: 26.06.2022).

106. DC/DC-перетворювач TEL 5-1223 15 В. URL: <https://www.tracopower.com/int/model/tel-5-1223> (дата звернення: 26.06.2022).
107. Лінійний регулятор напруги 5В MC7805BT. URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/onsemi/mc7805bt/594144> (дата звернення: 26.06.2022).
108. Лінійний регулятор напруги 3.3В ADP151AUJZ-3.3-R7. URL: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Analog-Devices/ADP151AUJZ-3.3-R7?qs=WIvQP4zGanide73FjU7r2Q%3D%3D> (дата звернення: 26.06.2022).
109. Ebay URL: <https://www.ebay.com/> (дата звернення: 26.06.2022).
110. РКС URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/> (дата звернення: 26.06.2022).
111. Voltmarket URL: <https://voltmarket.ua/> (дата звернення: 26.06.2022).
112. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / КІП ім. Ігоря Сікорського ; уклад. О. А. Гавриш, С. О. Солнцев, В. В. Дергачова, О. В. Зозульов [та ін.]. – Електронні текстові дані (1 файл: 526 Кбайт). – Київ : НТУУ «КІП», 2016. – 28 с.
113. Nissan LEAF – 100% технологічний електромобіль | Nissan. Nissan. URL: <https://www.nissan.ua/vehicles/new-vehicles/leaf.html> (дата звернення: 12.12.2022).
114. Renault Zoe URL: <https://cdn.group.renault.com/ren/ie/transversal-assets/brochures/car-ebrochures/ZOE-eBrochure.pdf.asset.pdf/6cd53aed3c.pdf> (дата звернення: 12.12.2022).
115. ТОП-10 електромобілів з запасом ходу. Федерація роботодавців автомобільної галузі. URL: <https://fra.org.ua/uk/an/publikatsii/novosti/top-10-ieliektromobiliv-z-zapasom-khodu> (дата звернення: 12.12.2022).

116. Сертифікація електротранспорту. Сертифікат на скутер, моноколесо, сігвей – Unus Finis. Сертифікат Укрчастотнагляду | Сертифікація GPS Wi-Fi Bluetooth NFC 5G – Unus Finis. URL: <https://ucrf-pro.com.ua/ua/jnformatsjya/nashj-poslugj/267-sertifikatsjya-malogo-elektrotransportu-sertifikatsjya-samokatjv-na-elektrotyazj-gjroskuterjv-monokoles-ta-jnshogo-transportu-z-bluetooth-blyutuz-j-abo-wj-fj-vaj-faj-ta-abo-m-gsm-m-bus-m-gps.html> (дата звернення: 12.12.2022).
117. Які галузі української економіки є найбільш прибутковими та збитковими. Слово і Діло. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2021/07/07/infografika/ekonomika/yaki-haluzi-ukrayinskoyi-ekonomiky-ye-najbilsh-prybutkovymy-ta-zbytkovymy> (дата звернення: 12.12.2022).



* Subaru, Suzuki, Mazda, Yema, Yudo, Yogomo, JMC, Jemmell, Seres, Yunque, Aiiways, Karma, and 10 more

Source: EV-volumes - Aggregated Sales / Registrations by Country

Light Vehicles

Рисунок А.2 – Глобальні продажі електромобілів серед виробників в першому кварталі 2022 року [39]

ДОДАТОК Б



Рисунок Б.1 – Зображення автомобіля [6]

ДОДАТОК В

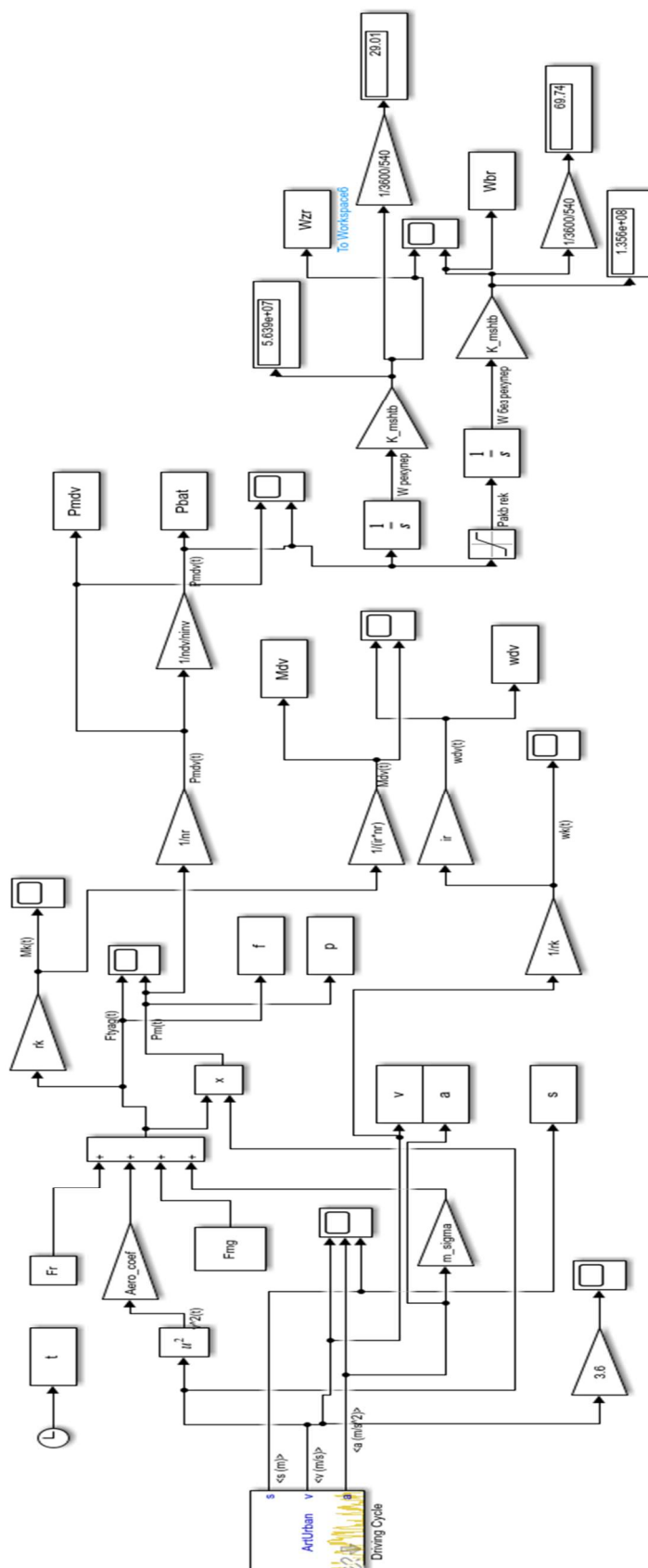


Рисунок В.1 – Модель для дослідження поведінки транспортного засобу за заданою тахограмою руху

ДОДАТОК Д

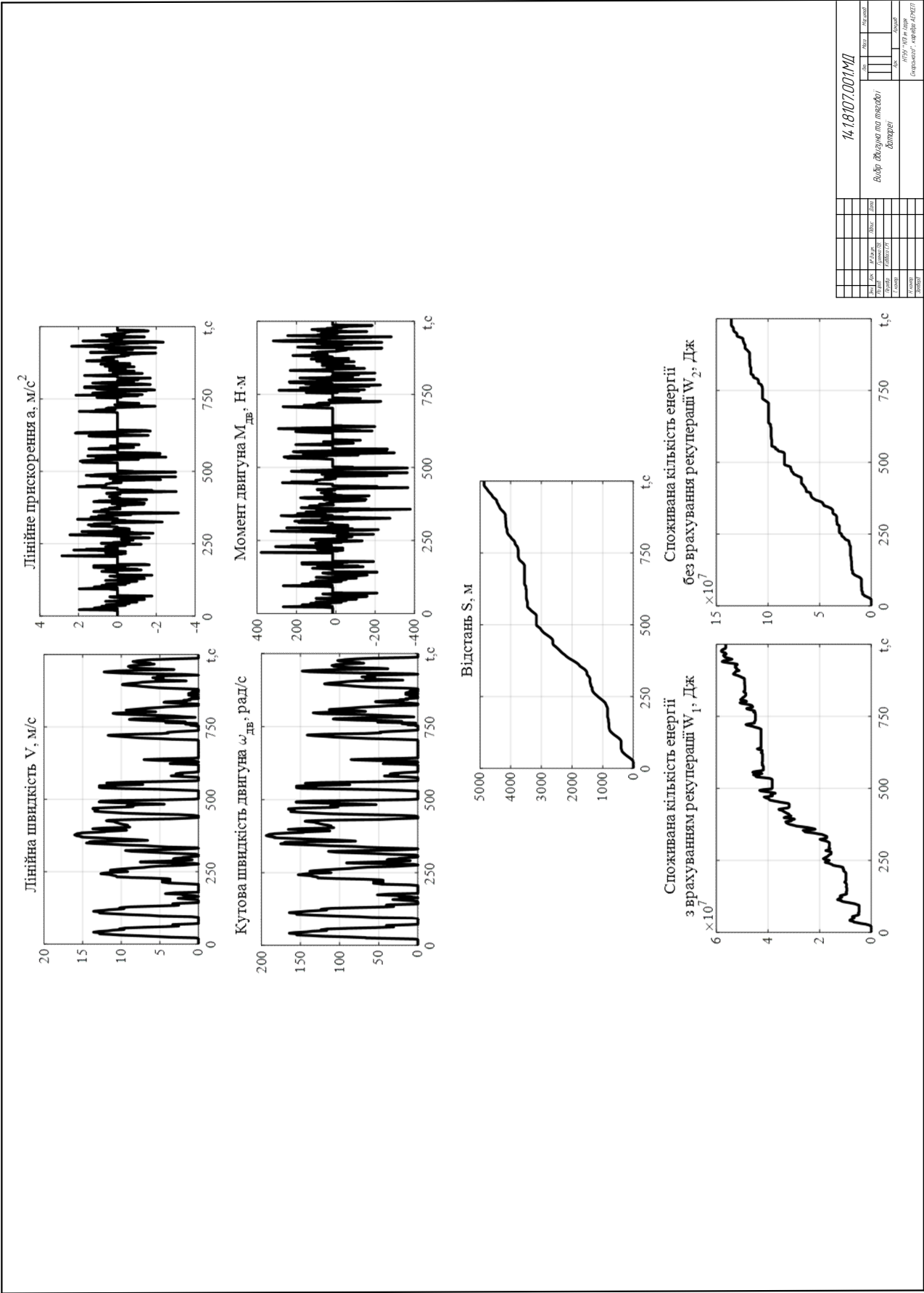


Рисунок Д.1 – Вибір двигуна та тягової батареї

ДОДАТОК Е

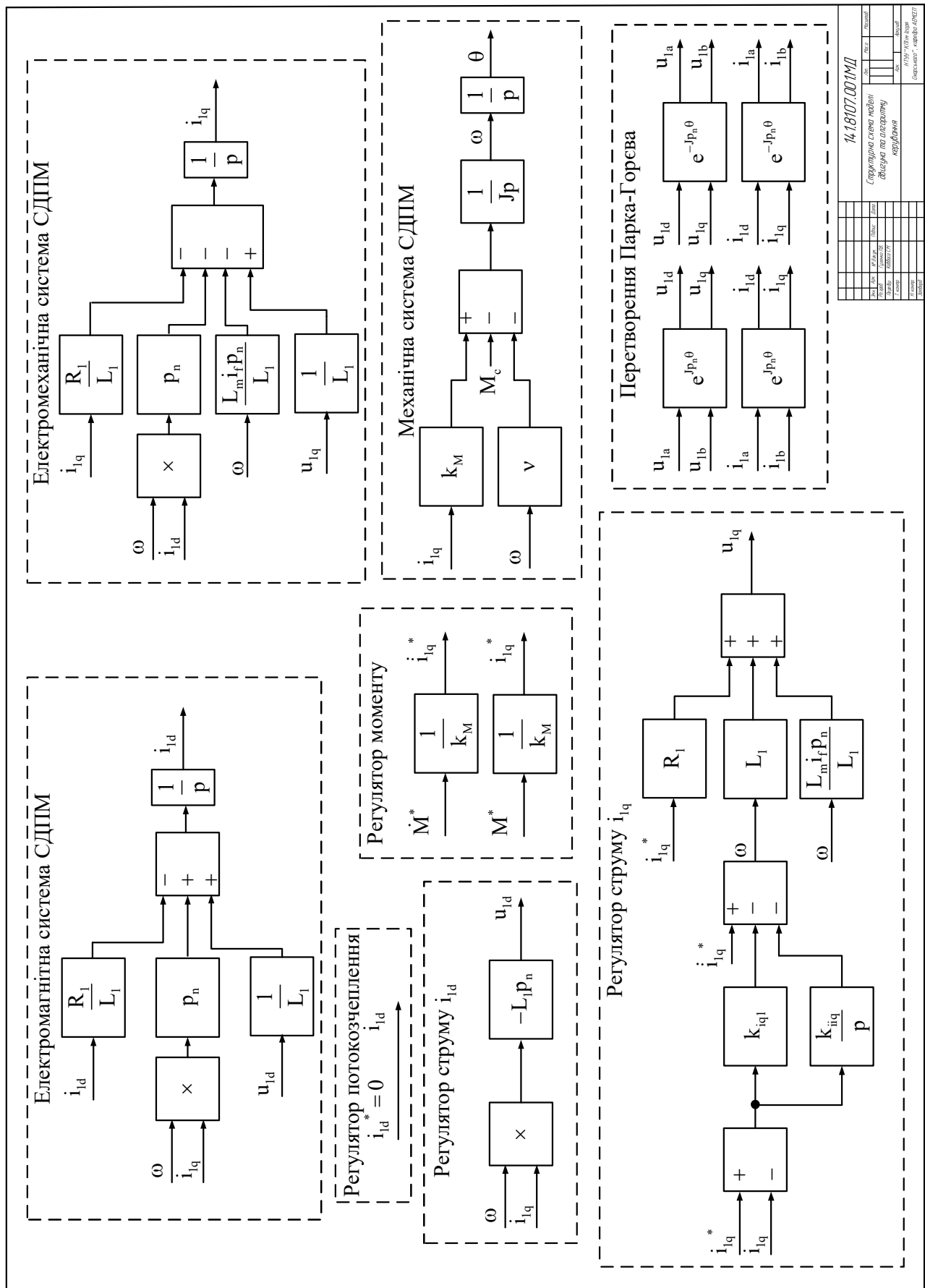


Рисунок Е.1 – Структурна схема моделі двигуна та алгоритму керування

ДОДАТОК Ж

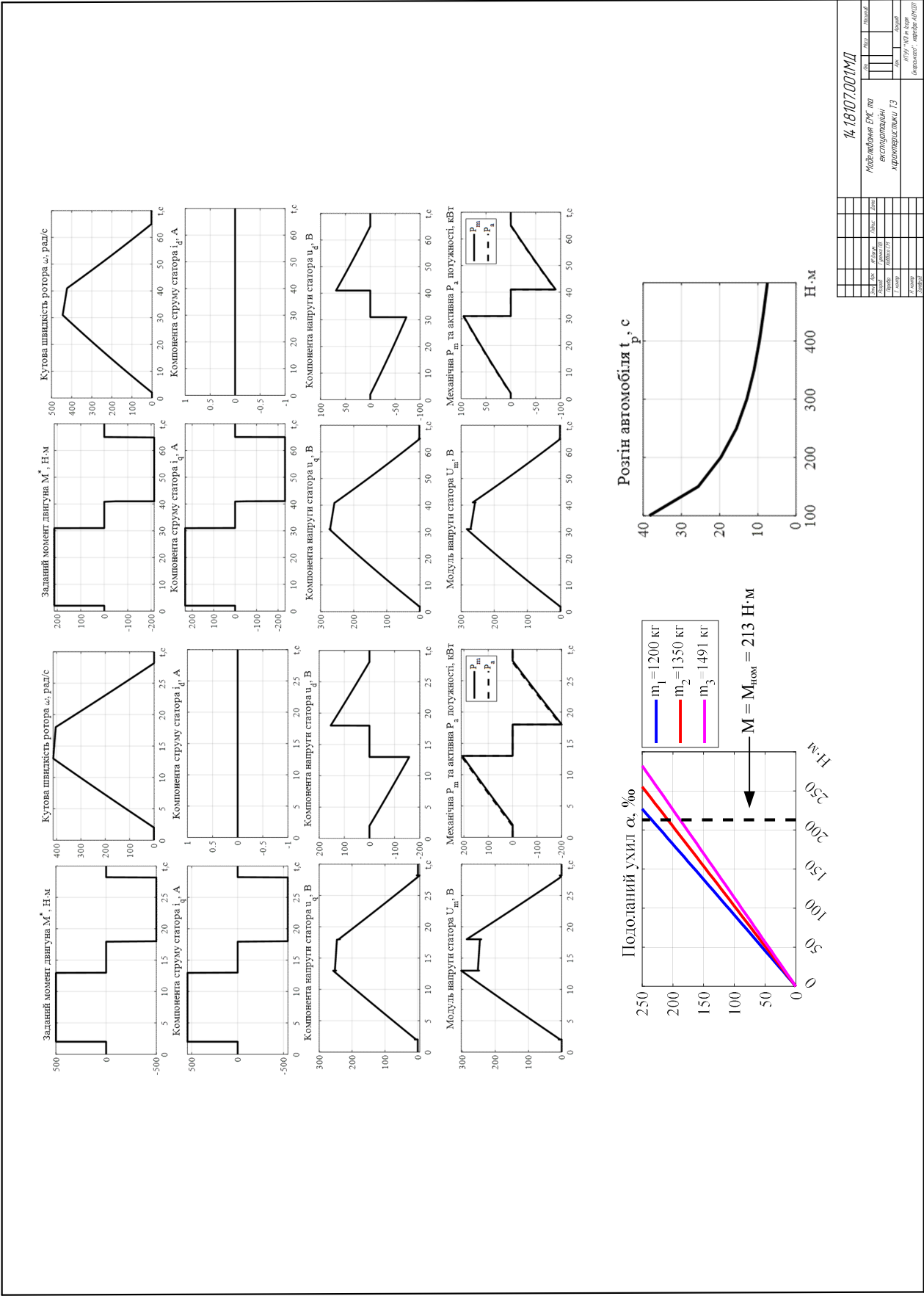


Рисунок Ж.1 – Моделювання ЕМС та експлуатаційні характеристики ТЗ

ДОДАТОК И

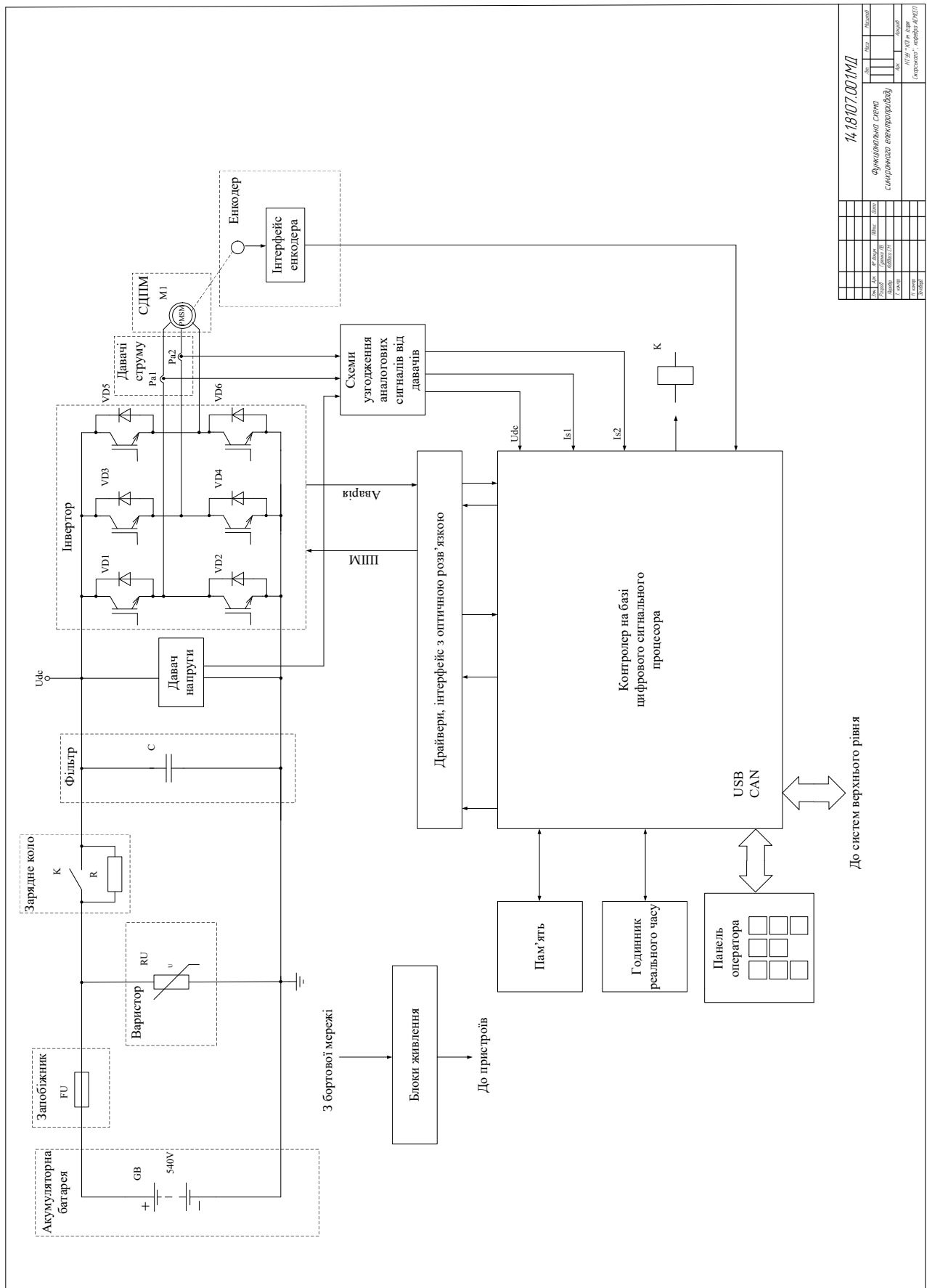


Рисунок И.1 – Функціональна схема синхронного електроприводу

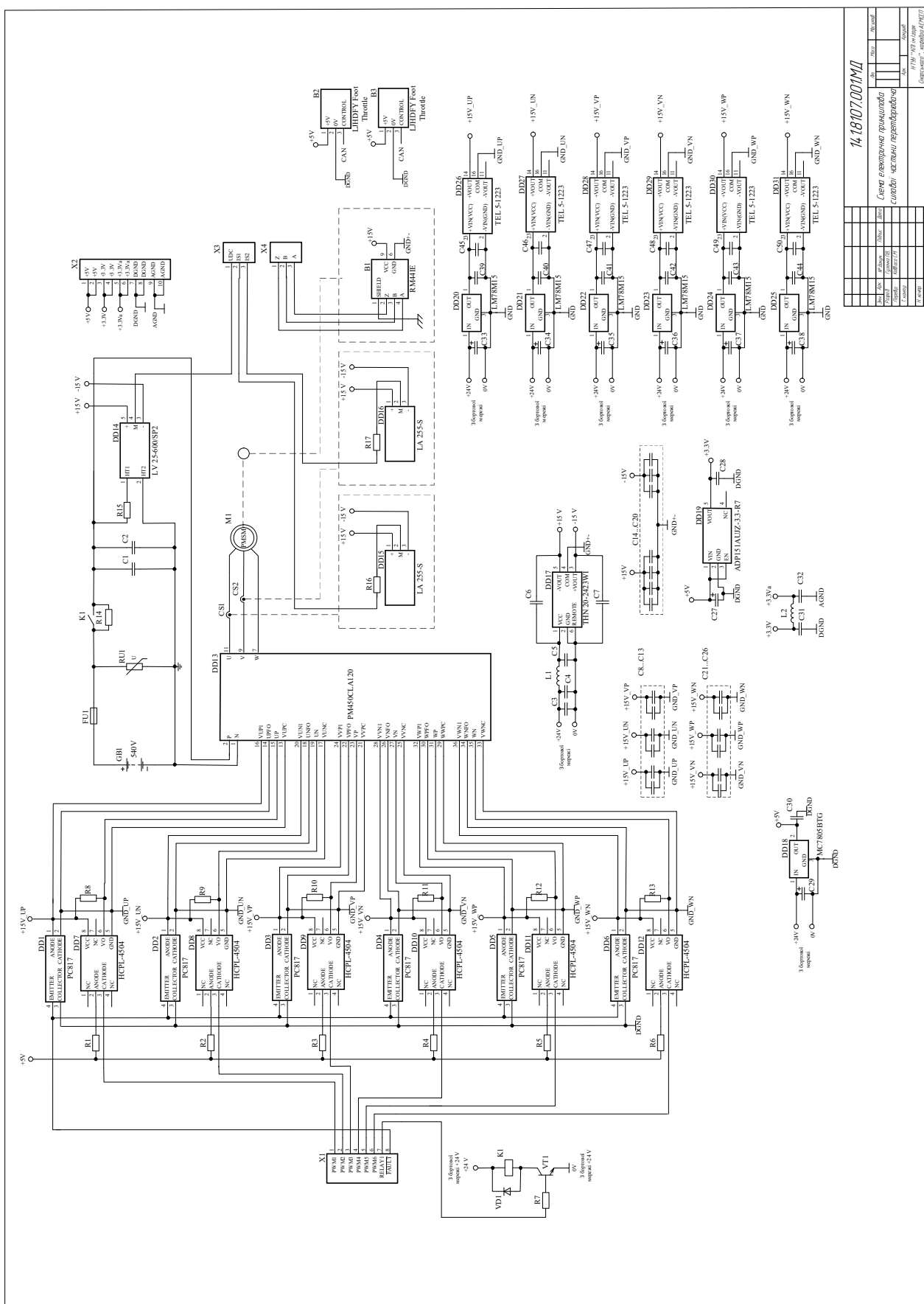


Рисунок К.1 – Схема електрична принципова силової частини перетворювача

ДОДАТОК Л

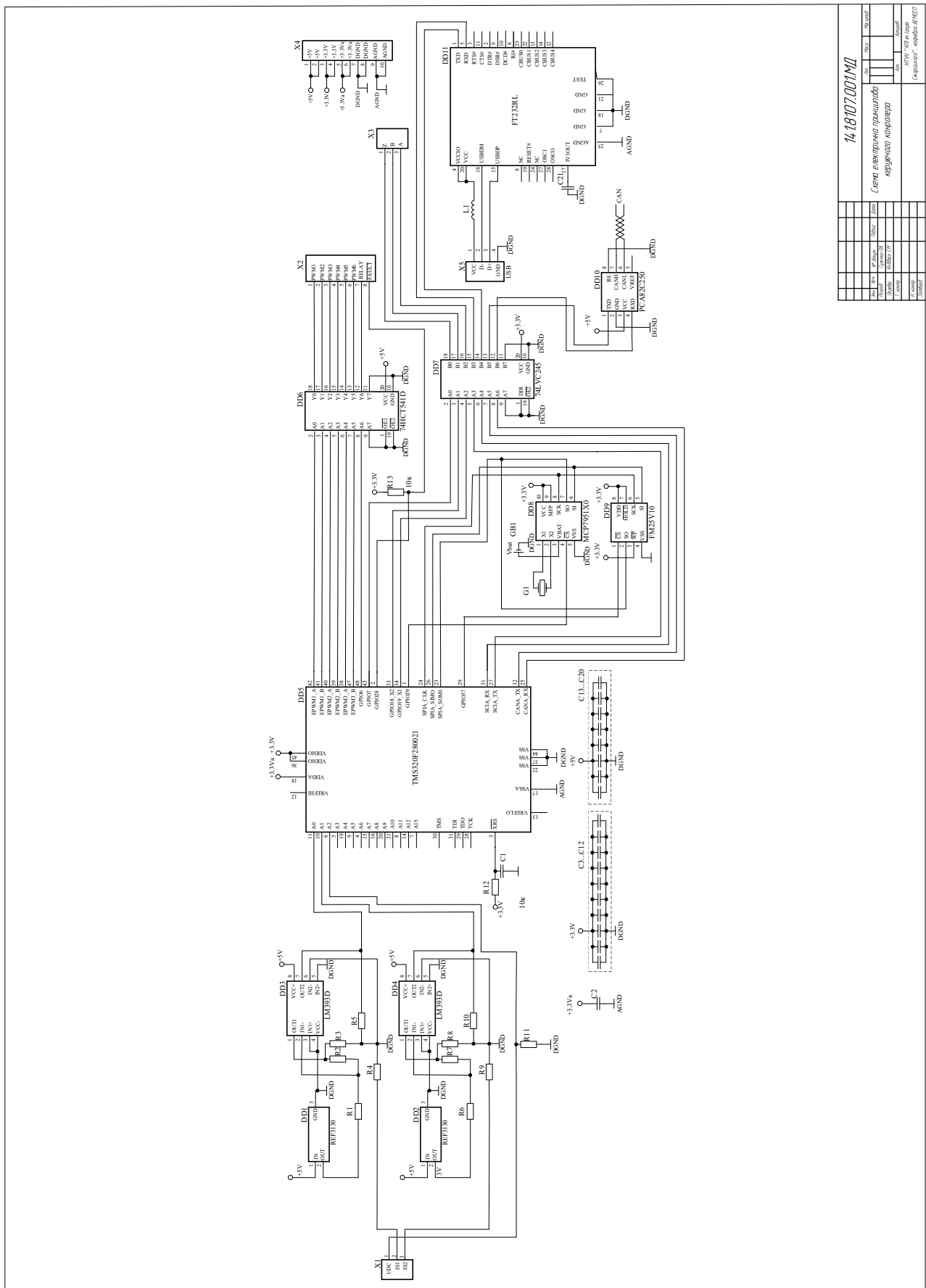


Рисунок Л.1 – Схема електрична принципова керуючого контролера