

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

С. М. Пересада

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2019 р.

Дипломний проект

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» по спеціалізації «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(код і назва)

на тему: Електромеханічна система гоночного боліда класу Formula SAE

Виконав (-ла): студент 3 курсу, групи ЕП-г62-2

(шифр групи)

Рибка Вячеслав Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник доц. к. т. н. Шаповал Іван Андрійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доц. Чумак В. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

(підпис)

Київ – 2019 р.

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: Електромеханічна система гоночного боліда класу Formula SAE

Київ – 2019р.

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Спеціалізація – Електромеханічні системи автоматизації та електропривод

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ С. М. Пересада
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ___ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Рибці Вячеславу Юрійовичу

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Електромеханічна система гоночного боліда класу Formula SAE

керівник проекту _____ доц. к. т. н. Шаповал Іван Андрійович _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом проекту _____ 14.06.2019 _____

3. Вихідні дані до проекту максимальна потужність тягового двигуна 80 кВт, номінальний момент 80 Н·м, максимальний момент 150 Н·м, максимальна швидкість 130 км/год , повна маса боліда 290 кг, запас пробігу 25 км

4. Зміст пояснювальної записки Зміст. Вступ. 1. Аналітичний огляд. 2. Визначення потрібної потужності електродвигуна. 3. Вибір електродвигуна та силового електрообладнання. 5. Проектування системи керування. Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи. 7. Опис схеми керування. Висновок.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 1. Креслення загального виду установки _____ 2. Схема електрична. Структурна схема алгоритму керування. 3. Результати дослідження динамічних режимів. _____

6. Консультанти розділів проекту*

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

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

7. Дата видачі завдання _____ 15.04.2019 _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд. Опис технологічного процесу.	19.04.2019	
2	Вибір електродвигуна та силового електрообладнання	25.04.2019	
3	Математична модель електромеханічного об'єкта	13.05.2019	
4	Проектування системи керування	20.05.2019	
5	Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи.	27.05.2019	
6	Опис схеми керування	03.06.2019	
7	Оформлення пояснювальної записки	10.06.2019	
8	Оформлення графічного матеріалу	14.06.2019	

Студент

_____ (підпис)

В. Ю. Рибка
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

_____ (підпис)

І. А. Шаповал
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 59, рисунків – 27, таблиць – 5, графічна частина на 3 листах А1.

Метою роботи є розробка та дослідження електроприводу для гоночного боліду класу Formula SAE для участі в міжнародних змаганнях Formula Student.

В роботі проведено аналітичний огляд існуючих систем електроприводу, які застосовуються для розробки болідів для змагань Formula SAE/Formula Student Electric, проаналізовано та обрано оптимальну систему приводу для побудови боліда командою Формула Студент «КПІ». Виконано розробку математичної моделі боліда, яка із задовільною точністю відображає поведінку майбутнього боліда в стандартних умовах, розраховано потужність, яку болід витратить на максимальній швидкості та тягове зусилля, яке він розвиватиме на колесах.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та виготовленні боліда класу Formula SAE, та дають порівняльну характеристику із болідом з ДВЗ.

Графічна частина включає в себе схему загального виду установки та її розташування в рамі боліда, структурну схему системи керування болідом із графіками, що отримані шляхом математичного моделювання та схема електрична функціональна тягового електроприводу боліда.

СИНХРОННИЙ ДВИГУН ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ, ГОНОЧНИЙ БОЛІД, FORMULA SAE, FORMULA STUDENT ELECTRIC, ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ.

					141.6209.032.БР			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Електромеханічна система гоночного боліда класу Formula SAE РЕФЕРАТ	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Рибка В. Ю.					6	
Перевір.		Шаповал І. А.						
Н. Контр.		Приймак Б. І.						6
Затверд.		Пересада С. М.						НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

SUMMARY

The diploma project comprises: 59 pages, 27 figures, 5 tables and graphical part on 3 pages A1.

The purpose of the project is to develop and research electromechanical system for racing EV for Formula SAE/Formula Student Electric competition.

In this work an analytical review of existing electric traction systems that is used by Formula Student teams. It is carried out the optimal traction system for use by Formula Student KPI. It was developed mathematics model for simulation behavior of racing car, calculated power required for desired top speed and traction force of potential racing car.

The obtained results can be used for designing and building of a Formula SAE car, and give comparative characteristics with combustion vehicle.

The graphical part includes: the sketch of tractive system, the structure of the control algorithm, schematic circuit diagram of the traction system of electric vehicle and graphs of transients obtained by mathematical simulation

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR, ELECTRIC VEHICLE, FORMULA SAE, FORMULA STUDENT ELECTRIC, FIELD ORIENTED TORQUE CONTROL ALGORITHM.

					141.6209.032.BW			
	Letter	№ of doc.	Sign.	Date				
Devel.	V. Rybka				<i>Electromechanical system of a racing car for Formula SAE competition</i> SUMMARY	L.	Page	Pages
Checked	I. Shapoval					7		
N. Contr.	B.Pryymak			NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA				
Approved.	S Peresada			EP-62-2 7				

Перелік умовних позначень

$(a - b)$ – позначення стаціонарної системи координат, що пов'язана зі статором синхронного двигуна;

$(d - q)$ – позначення системи координат ротора;

θ – кутове положення синхронної системи координат $(d - q)$ відносно нерухомої системи координат $(a - b)$.

ω – кутова швидкість ротора;

M – електромагнітний момент двигуна;

M^* – заданий момент двигуна;

\tilde{M} – похибка відпрацювання електромагнітного моменту;

M_c – момент навантаження;

ψ – вектора потокозчеплення ротора;

$\tilde{\psi}$ – похибка відпрацювання модуля потокозчеплення ротора;

i_a, i_b – компоненти струму статора в системі координат $(a - b)$;

i_d, i_q – компоненти струму статора в системі координат $(d - q)$;

u_a, u_b – компоненти вектора напруги в системі координат $(a - b)$;

u_d, u_q – компоненти вектора напруги в системі координат $(d - q)$;

R_1 – активний опір статора;

L_1 – індуктивність статора;

L_m – індуктивність контуру намагнічування;

СД – синхронний двигун;

СДПМ – синхронний двигун зі збудженням від постійних магнітів

ФОС – векторне керування.

Зміст

ВСТУП.....	10
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	11
1.1. Аналітичний огляд	11
1.2. Опис технологічного процесу	18
1.3 Формулювання вимог до електроприводу та системи керування технологічним об'єктом	19
2. ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА	21
3. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	28
4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБ'ЄКТА	39
5.1. Синтез регуляторів струму	44
5.2. Синтез регулятора моменту	46
5.3 Перевірка стійкості системи векторного керування моментом СДПМ .	47
6. ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ.....	49
6.1 Дослідження роботи системи векторного керування.....	49
6.2 Дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи при відпрацюванні експериментального руху боліда	52
7. ОПИС СХЕМИ КЕРУВАННЯ.....	55
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	59

Вступ

Formula Student, Formula SAE – це міжнародні студентські змагання, що щорічно проходять з 1982 року. За легендою змагань, кожна команда – це окрема інженерна група, яка повинна розробити та виготовити гоночний автомобіль з відкритими колесами для ринку аматорських перегонів.

У 2009 році із актуалізацією розвитку електротранспорту, до регламенту був доданий клас EV (electric vehicle), в якому описуються вимоги для болідів з електродвигунами.

Окремо проводяться змагання FSAE Hybrid, в яких дозволяється поєднання ДВЗ та тягового двигуна.

Актуальність такого роду заходів полягає у формуванні у студентів окрім теоретичних знань ще й практичних навичок роботи із справжнім обладнанням та розробки реальних проектів. Такий підхід дозволяє надати критично необхідний для кожного студента досвід роботи та скоротити час на здобутті першого досвіду роботи. Крім того, міжнародні корпорації, які працюють в сферах виробництва, мають можливість за відносно невеликий кошт виростити потрібні їм кваліфіковані кадри, які будуть здатні з першого робочого дня долучатись роботи над проектами.

Для студентів такі змагання, окрім практичної підготовки, формують базові навички роботи в колективі та дають унікальну можливість спробувати себе в будь-якій цікавій для них роботі без необхідності в тривалому кар'єрному рості до бажаної професії.

На даний момент у світі налічується понад 600 команд Formula SAE, більша частина яких представляють різні університети Європи.

Мета даної роботи розробити та дослідити шляхом моделювання систему тягового електроприводу для боліда команди Формула Студент КПІ з метою подальшого проектування боліда і участі в змаганнях Formula Student Electric в 2020 році.

1. Аналітичний огляд. Опис технологічного процесу

1.1. Аналітичний огляд

Згідно з регламентом Formula Student [1], змагання поділяються на Static Events (огляд боліду на відповідність регламенту та захист конструкції і бізнес-плану) та Dynamic Events (ходові випробування). В ході цього дипломного проекту будуть розглядатися саме Dynamic Events, а саме Acceleration Event, та Endurance and Efficiency Event. Skidpad Event та Autocross Event до уваги приймати не будемо, так як у першому з них випробування проходить підвіска боліду, тому навантаження на тяговий двигун менше номіналу (рух зі сталою швидкістю по колу) та тривалість заходу менше 10 секунд, а в другому випадку – кваліфікаційний заїзд для Endurance and Efficiency Event тривалістю до 90 секунд (як правило 50-75с), при якому тяговий двигун не встигне вийти на робочу температуру.

Згідно з пунктом EV2.2.1 [1, ст. 73] максимальна потужність, що споживається з акумулятора не може перевищувати 80 кВт. За цією вимогою, для забезпечення функціонування бортових споживачів боліду – систем телеметрії, кіл керування та захисної автоматики, відводиться потужність до 300 Вт, і належить окремому розрахунку низьковольтної мережі боліда. Отже, для живлення електроприводу відводиться решта потужності – 79,7 кВт.

При проектуванні тягового ЕП можливі наступні компоновки:

- 1) Повний привід з індивідуальним приводом на кожне колесо (мотор-редуктор-колесо, рис. 1.1);
- 2) Задній привід з індивідуальним приводом ведучих коліс (мотор-редуктор-колесо в тому числі з розташуванням в рамі, рис. 1.3 та 1.4);
- 3) Задній привід з 2-моторним ЕП, що працює на спільний диференціал (рис. 1.5);
- 4) Задні привід з одним мотором та диференціалом (рис. 1.6).

Використання приводу виключно на передні колеса не доцільно, так як при прискореннях сили перерозподіляються на задню вісь, що спричиняє розвантаження ведучої осі та погіршення зчеплення з дорогою, що суттєво

обмежує допустимі моменти на ведучій осі, крім того, передня вісь – поворотна, і у разі передачі моменту через піввісі скоротиться кут повороту коліс із-за наявності шарнірів рівних кутових швидкостей (ШРКШ).



Рисунок 1.1 – Схема ЕП з приводом на всі колеса

До переваг даної схеми можна віднести:

- 1) Низька інерційність системи – завдяки використанню високооборотних тягових двигунів з малим моментом інерції ротора;
- 2) Гнучкість системи – є можливість передавати момент на одну з осей, або на кожне колесо окремо для реалізації різних стратегій керування болідом, електрична симуляція осьових та міжосьових диференціалів, в тому числі з компенсацією ефектів недостатнього та надмірного стернування всього автомобіля;
- 3) Висока енергетична ефективність – при русі з неповними навантаженнями достатньо припинити живлення будь-якого з двигунів, чи осей, зменшивши втрати на недовантажених двигунах/осях;
- 4) Широкі можливості рекуперації, в тому числі й електричне гальмування, завдяки наявності приводу на передній осі, яка довантажується підчас перерозподілу зусиль при гальмуванні;

- 5) Відсутність рухомих частин в межах кокпіту/рами, що дозволяє зробити компактніший, а отже і легший болід/автомобіль;
- 6) Компактність ЕП
- 7) Висока надійність, що пов'язано із відсутністю ШРКШ, та валів приводу, що вимагає меншого запасу міцності деталей механічної системи, а отже і їх маси.

До недоліків такої системи можна віднести:

- 1) Висока вартість – такі системи виготовляються на замовлення команд, так як немає типових конструкцій ступиць та поворотних кулаків і планетарних редукторів;
- 2) Складність алгоритмів керування кожним ЕП та їх синхронізації;
- 3) Великі невіднесені маси.



Рисунок 1.2 – Система мотор-редуктор-колесо на боліді TU Delft

Дана компоновка широко використовується більшістю великих європейських команд TU Delft, Munich Motorsport, AMZ, TU Eindhoven, тому що їх, як правило, підтримують великі автомобільні компанії типу VAG, Daimler-Chrysler, BMW, що мають необхідне обладнання для виготовлення шестерень та корпусів редукторів. На боліді такої компоновки команда AMZ

(Цюрих) встановила в 2016 році світовий рекорд прискорення до 100 км/год в 1,513с [2].



Рисунок 1.3 – Схема індивідуального ЕП задньої осі

До переваг даної схеми можна віднести:

- 1) Низька інерційність системи – завдяки використанню високооборотних тягових двигунів з малим моментом інерції ротора, але потужність цих двигунів вища, порівняно із попередньою схемою, а отже і момент інерції ротора теж буде дещо вищим;
- 2) Гнучкість системи – є можливість передавати момент на потрібне колесо. Порівняно із попередньою схемою залишаються можливості компенсації поворотності боліду за рахунок векторів моменту на колесах, але зникає можливість приводу на всі колеса, дещо гірша енергетична ефективність, так як не можна припинити живлення недовантаженого мотора;
- 3) Відсутність рухомих частин в межах кокпіту/рами, що дозволяє зробити компактніший, а отже і легший болід/автомобіль;
- 4) Компактність ЕП;
- 5) Висока надійність, що пов'язано із відсутністю ШРКШ, та валів приводу, що вимагає меншого запасу міцності деталей механічної системи, а отже і їх маси.

До недоліків такої системи можна віднести:

- 1) Висока вартість – такі системи виготовляються на замовлення команд, так як немає типових конструкцій ступиць та поворотних кулаків і планетарних редукторів;
- 2) Складність алгоритмів керування кожним ЕП та їх синхронізації;
- 3) Великі невіднесорені маси на ведучій осі.

Серед команд Формула Студент така компоновка не зустрічається, так як більші команди мають можливість реалізувати попередню, а для менших команд конструктивно та фінансово вигідніші інші компоновки – мотори в рамі боліда для зменшення невіднесорених мас.

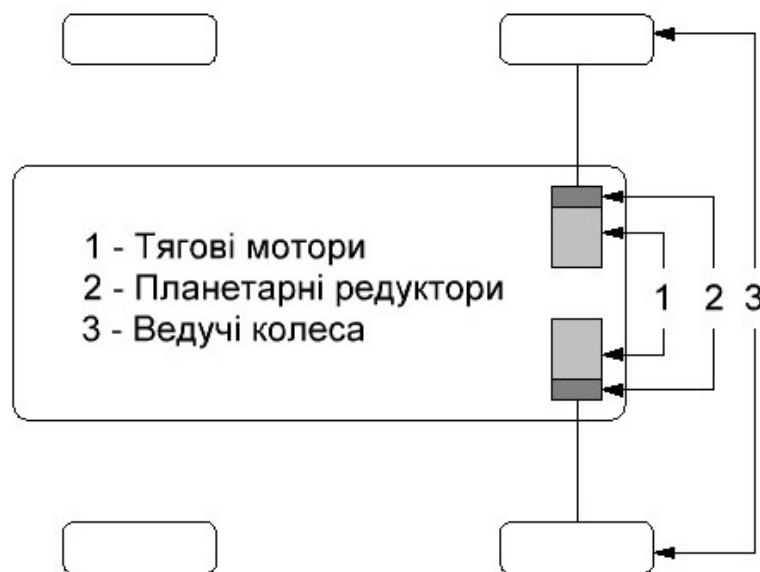


Рисунок 1.4 – Схема індивідуального ЕП із двигунами в рамі боліда

До переваг даної схеми можна віднести:

- 1) Низька інерційність системи – завдяки використанню високооборотних тягових двигунів з малим моментом інерції ротора, але потужність цих двигунів вища, порівняно із першою схемою, а отже і момент інерції ротора теж буде дещо вищим;
- 2) Гнучкість системи – є можливість передавати момент на потрібне колесо. Порівняно із першою схемою залишаються можливості компенсації поворотності боліда за рахунок векторів моменту на колесах, але зникає можливість приводу на всі колеса, дещо гірша енергетична ефективність, так як не можна припинити живлення недовантаженого мотора;

- 3) Відносна компактність приводу, так як він займає найменше місця в рамі боліду
- 4) Типова для всіх автомобілів на ЕП надійність.

До недоліків такої системи можна віднести:

- 1) Висока вартість – такі системи також виготовляються на замовлення команд, так як немає типових конструкцій мотор-редуктор, серед яких можна було б обрати саме необхідну;
- 2) Відносна складність алгоритмів керування кожним ЕП та їх синхронізації;

Даний тип ЕП зустрічається серед команд із середніми фінансовими та технологічними можливостями, наприклад Ka.Racing, University Racing Eindhoven.

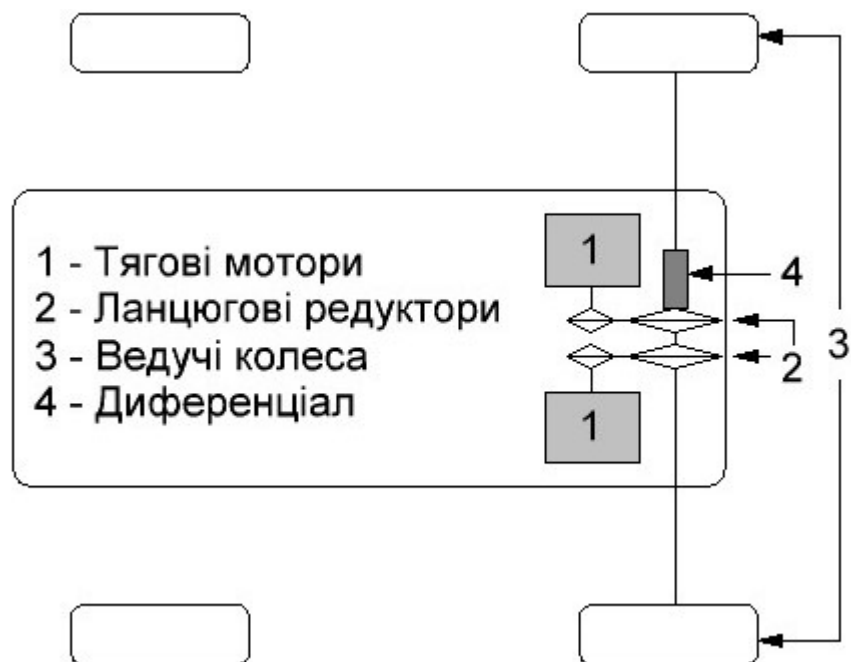


Рисунок 1.5 – Схема приводу на задню вісь з 2-моторним ЕП

До переваг даної схеми можна віднести:

- 1) Висока енергетична ефективність – при русі з неповними навантаженнями достатньо припинити живлення недовантаженого двигуна, зменшивши на ньому електричні втрати;
- 2) Ширші можливості рекуперативного гальмування, порівняно із одномоторною системою;

3) Типова надійність для автомобілів з ЕП.

До недоліків такої системи можна віднести:

- 1) Складність алгоритмів керування кожним ЕП та їх синхронізації;
- 2) Вища вартість, ніж одномоторного приводу;
- 3) Великі габарити, порівняно з іншими системами;
- 4) Потребує трансмісії.

Дана система не користується популярністю, хоча зрідка зустрічається серед команд середнього рівня фінансових та технологічних можливостей. Така система здебільшого підходить для звичайних автомобілів, так як дасть більший пробіг при рівному запасі енергії в батареях. Зокрема, дана компоновка була запатентована компанією Tesla Motors в 2013 році та належить до відкритих в 2014 році патентів цієї компанії (патент 20130241445) [3].

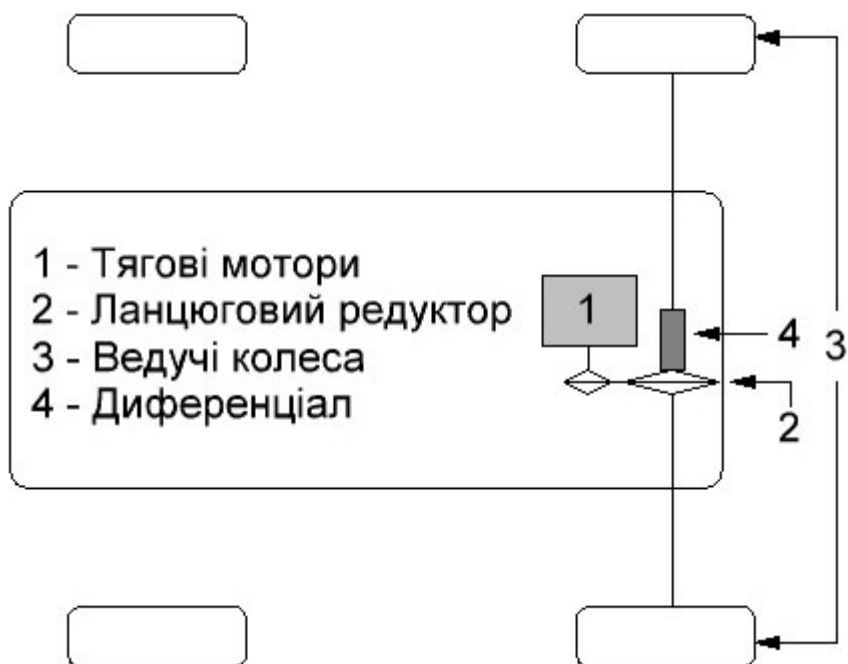


Рисунок 1.6 – Схема тягового ЕП з приводом на задню вісь

До переваг даної системи можна віднести:

- 1) Простота системи ЕП;
- 2) Простота алгоритмів керування, відсутня необхідність синхронізації кількох приводів;

- 3) Низька вартість – диференціали, вали приводів коліс та ШРКШ можна використати від будь-якого серійного автомобіля та мотоцикла (ланцюгова передача);
- 4) Низька непідресорена маса;
- 5) Надійність, яка притаманна всім автомобілям з ЕП.

До недоліків слід віднести:

- 1) Негнучка система – необхідність пошуку компромісу між максимальною швидкістю та тягою, або використання коробок швидкостей;
- 2) Найгірші енергетичні характеристики з усіх представлених систем;
- 3) Потребує місце в рамі боліда;
- 4) Потребує трансмісії.

Дана система широко розповсюджена серед команд початкового рівня можливостей, так як потребує найменших фінансових та технологічних затрат серед представлених вище компоновок.

Оскільки в команді FS KPI відсутній досвід побудови болідів на електричному приводі, тому на даному етапі доцільно зупинитись на останній схемі – однодвигунний ЕП з приводом на задню вісь через ланцюгову передачу та диференціал.

1.2. Опис технологічного процесу

Як було згадано вище, в ході роботи розглянемо два види Dynamic Events: Acceleration Event та Endurance and Efficiency Event.

Acceleration Event – драг (гонка на прискорення) на 75 м. Під час цього випробування автомобіль повинен рушити з місця за командою маршала з максимальним ривком та прискоренням, яке може розвинути двигун та може реалізувати п'ятно контакту між покриттями ведучих коліс та асфальтом без проковзування. Середня тривалість заїзду 4 секунди (3,6 с для найшвидших електричних болідів, 4,2 с для швидких бензинових болідів та до 5 с для команд із середини пелотону), повернення на стартову позицію 20-25 секунд

та до 10 секунд стартова процедура. Водій може зробити 2 спроби підряд, таким чином маємо період робочого циклу 44 секунди, який візьмемо за основу в подальших розрахунках по перевірці за тепловим перевантаженням для цього заходу.

Endurance and Efficiency Event – гонка на витривалість, протягом якої болід повинен подолати 22 км дистанцію із обов’язковою заміною водія після 11 км. Ця гонка відбувається на одній трасі з Autocross Event, яка побудована таким чином, щоб одне коло мало довжину близько 1 км та середню швидкість руху 30-40 км/год [4]. Коло будується із поєднанням коротких прямих, поворотів із постійним та змінним радіусом, шпильок, слалому та шикан. Отже, беручи за основу для розрахунку номінальної потужності саме цей захід, згідно з прийнятими вище даними, час безперервної роботи ЕП складатиме до 35 хвилин, отже розрахунок потужності двигуна варто проводити за середнім значенням споживаної потужності в безперервному робочому циклі S1. Також, для цього випробування необхідно забезпечувати рекуперативне гальмування для хоча б часткового повернення енергії.

1.3 Формулювання вимог до електроприводу та системи керування технологічним об’єктом

Для забезпечення керування електричним болідом необхідно налаштувати електропривод на керування моментом, завдання якого задається потенціометром положення педалі газу. Крім того, забезпечити функціонування всіх систем безпеки описаних в регламенті [1].

Враховуючи розглянуті вище умови ЕП гоночного боліду повинен забезпечувати:

- 1) Тривалий рух зі змінним навантаженням;
- 2) Максимальну потужність до 80 кВт;
- 3) Рекуперативне гальмування;
- 4) Мінімальну витрату енергії;
- 5) Максимальні динамічні характеристики.

Висновки до розділу 1

В даному розділі було зроблено аналітичний огляд систем приводу, що використовується на болідах класу Formula SAE, описано всі переваги та недоліки, обрано компоновку із приводом від одного двигуна та диференціал.

В даному розділі ми визначили необхідні для моделювання цикли руху боліда і сформулювали вимоги до електроприводу.

2. Визначення потрібної потужності електродвигуна

Загальна формула потужності:

$$P = F_T \cdot v, \quad (2.1)$$

де F_T – тягове зусилля боліду;

v – максимальна швидкість.

Розглянемо сили, що діють на болід під час руху:

- F_a – сила, що дає прискорення боліду;
- $F_{\text{коч}}$ – сила тертя кочення;
- $F_{\text{ковз}}$ – сила тертя ковзання;
- $F_{\text{оп}}$ – сила опору повітря;
- $F_{\text{під}}$ – сила опору при русі по похилій площині;

Серед перелічених зусиль корисною є лише сила F_a , яка й надає необхідну боліду динаміку, і в загальному випадку є різницею між F_T , яку створює тяговий двигун та втратами на опір руху:

$$F_a = F_T - F_{\text{коч}} - F_{\text{ковз}} - F_{\text{оп}} - F_{\text{під}} \quad (2.2)$$

Також,

$$F_a = m_{\text{бп}} \cdot a \quad (2.3)$$

З формули (3) може бути виражене прискорення боліду:

$$a = \frac{F_a}{m_{\text{бп}}}, \quad (2.4)$$

де $m_{\text{бп}}$ – маса боліду повна, кг;

Для розрахунку F_T скористаємося наступною формулою:

$$F_T = \frac{\eta_{\text{тр}} \cdot M_{\text{дв}} \cdot i}{r}, \quad (2.5)$$

де $\eta_{\text{тр}}$ – ККД трансмісії, в нашому випадку – ланцюгової передачі від тягового мотора до диференціала $\approx 0,97$;

$M_{\text{дв}}$ – крутний момент двигуна, Н·м;

i – передаточне число головної передачі;

r – радіус колеса.

Для обчислення радіусу колеса використаємо наступну формулу:

$$r = \frac{D \cdot 25,4}{2} + a_1 \cdot a_2, \quad (2.6)$$

$$\frac{175}{a_1} \frac{55}{a_2} \frac{R13}{D}$$

a_1 – ширина шини, мм;

a_2 – висота борту шини, % від ширини шини;

D – діаметр колісного диску, дюйм.

Для розрахунку швидкості руху боліду залежно від частоти обертання ведучого валу двигуна використовуватимемо наступну формулу:

$$v = \frac{\pi \cdot r \cdot n}{30 \cdot i}, \quad (2.7)$$

де v – швидкість боліда, м/с;

n – частота обертання ведучого валу двигуна, об/хв.

Для розрахунку сили опору кочення використаємо наступну формулу:

$$F_{\text{коч}} = c_r \cdot m_{\text{бп}} \cdot g, \quad (2.8)$$

де c_r – коефіцієнт тертя кочення коліс по дорожньому полотну.

Згідно з даними в [5, с. 13] для болідів класу Formula Student, c_r залежить від множини факторів: тиску повітря в шинах, температури шин, властивостей компаунду шини, властивостей покриття дороги, його запиленості, температури тощо. Тому для розрахунку пасажирських автомобілів c_r беруть в межах 0.01-0.015, а для нашого випадку $c_r=0.035$, так як гоночні шини містять значно м'якший компаунд, ніж звичайні автомобілі, крім того ці шини призначені для роботи при значно менших тисках.

При розрахунку сил опору для звичайних автомобілів, опором шини в повороті зазвичай нехтують, так як автомобілі проектуються таким чином, щоб уникати ковзання, проте це не стосується випадку гоночних автомобілів. В [6] описано, що в швидкісних поворотах бокове ковзання шини може спричинити додатковий опір кочення, який легко може сягати десятків кіловат.

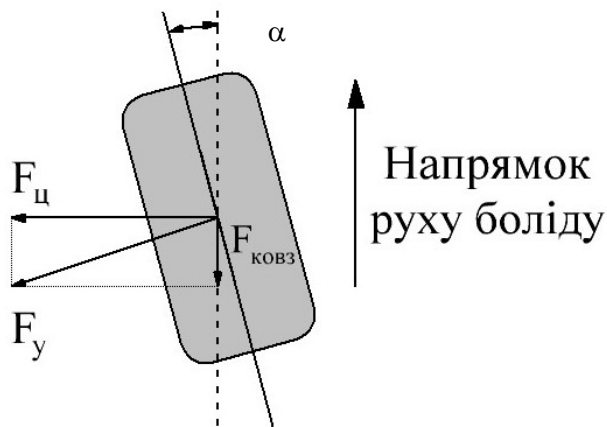


Рисунок 2.1 – Сили, що діють на шину при боковому ковзанні

Причина цього опору показана на рис. 2.1. Для отримання бічної сили F_y шини повинні мати кут її повороту наближений до напрямку лінійного руху. Згідно з цим, кут бічного ковзання α , результуюча бічна сила F_y не перпендикулярні до напрямку руху, тому виникає додаткова складова $F_{\text{КОВЗ}}$, яка діє зустрічно до напрямку повздовжньої швидкості боліду.

На практиці, кожне з коліс по-різному направлене відносно миттєвого центру повороту, окрім того миттєві бічні сили кожного колеса також відрізняються. Проте, заради спрощення обчислень, ми припускаємо, що всі шини боліду діють однаково при визначенні бічної сили в повороті. Отже, розрахунку сили ковзання $F_{\text{КОВЗ}}$ використаємо наступну формулу

$$F_{\text{КОВЗ}} = \sin(\alpha) \cdot F_y, \tag{2.9}$$

де α – кут ковзання шини;

F_y – доцентрова сила.

Враховуючи, що всі 4 шини дають максимальну бічну силу в поворотах, відповідний кут ковзання α може бути знайдений з результатів емпіричних вимірів використаних шин Hoosier. На рисунку 2.2 показано боковий коефіцієнт тертя у функції кута бокового ковзання [5, с. 14]. Найбільше отримане значення при $\alpha = \pm 6^\circ$.

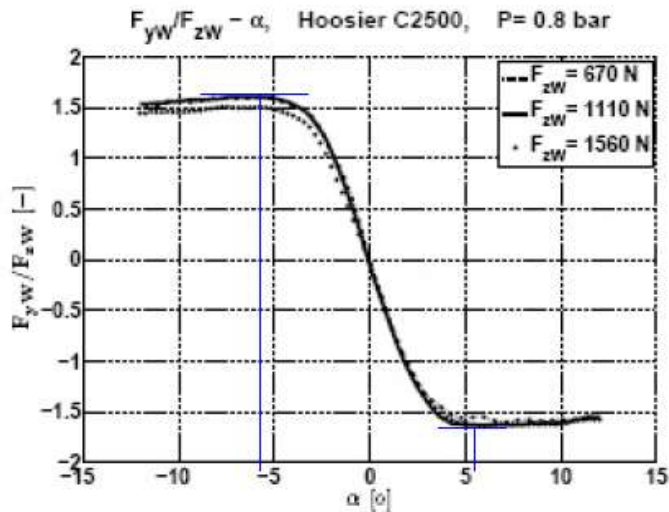


Рисунок 2.2 – Коефіцієнт бокового тертя у функції кута бокового ковзання.

Для розрахунку сили аеродинамічного опору використаємо наступну формулу:

$$F_{\text{оп}} = \frac{\rho_{\text{пов}} \cdot A_f \cdot C_d \cdot v^2}{2}, \quad (2.10)$$

де $\rho_{\text{пов}}$ – густина повітря;

A_f – фронтальна площа боліду;

C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору.

Коефіцієнт аеродинамічного опору зазвичай оцінюється порівнянням схожих транспортних засобів із відомим коефіцієнтом. Найкращий спосіб, звісно, стендові дослідження боліду в аеродинамічній трубці. За отриманими даними коефіцієнт опору й може бути вимірним. Ще один спосіб – вирахувати поліном другого порядку за вимірними параметрами опору руху боліда залежно від швидкості вітру. Останній метод був застосований австралійською командою Monash Motorsport Team для болідів без антикрила [5, с. 13]:

$$F_{\text{оп}}(v) = (0,39 \cdot v^2) + (0,18 \cdot v) + 0,05 \quad (2.11)$$

Результат обчислень показано на рис. 2.3.

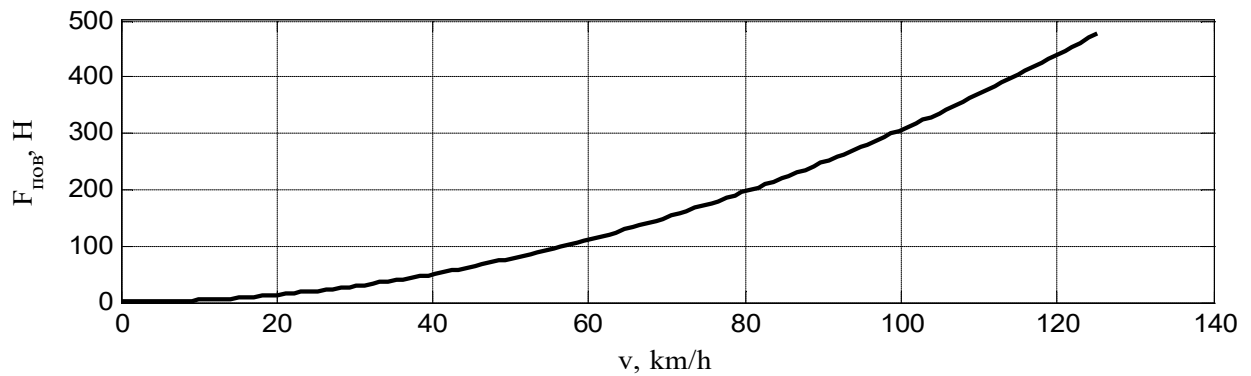


Рисунок 2.3 – Аеродинамічний опір у функції швидкості для болідів класу Formula Student без антикрила

Сила опору похилої площини:

$$F_{\text{під}} = m_{\text{бп}} \cdot g \cdot \sin \beta, \quad (2.12)$$

де β – кут нахилу дороги

Отже, загальний вираз має вигляд:

$$F_T = m_{\text{бп}} \cdot a + c_r \cdot m_{\text{бп}} \cdot g + F_y \cdot \sin \alpha + (0,39 \cdot v^2 + 0,18 \cdot v + 0,05) \quad (2.13)$$

Так як в отриманій формулі (2.13) присутні доданки, які залежать від швидкості, то для отримання необхідної потужності для досягнення середнього значення максимальної швидкості серед болідів класу Formula Student в 130 км/год,:

$$P = \left(m_{\text{бп}} \cdot a + c_r \cdot m_{\text{бп}} \cdot g + F_y \cdot \sin \alpha + (0,39 \cdot v^2 + 0,18 \cdot v + 0,05) \right) \cdot v \quad (2.14)$$

$$P = \left(300 \cdot 0 + 300 \cdot 9,81 \cdot 0,035 + 0 + 0,39 \cdot \left(\frac{130}{3,6} \right)^2 + 0,18 \cdot \frac{130}{3,6} + 0,05 \right) \cdot \frac{130}{3,6} = 22321 \text{ (Вт)}$$

В попередньому сезоні команда Формула Студент «КПІ» використовувала силову установку (двигун+трансмсія) з мотоцикла Honda XL700V. Максимальна потужність двигуна складає 44 кВт при 7750 об/хв, а максимальний момент 60 Н·м при 5500 об/хв. Розрахункові дані наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Розрахункові параметри боліда з двигуном Honda XL700V

Частота КВ, об/хв	8000	Передача	Шв., км/год	Мом., Н·м	Прискор., м/с ²	Прискор., g	Тяга, Н
Головна пара	3	2,500	59,606	724,134	8,938	0,911	2770,744
Первинна передача	1,7632	1,722	86,525	498,848	6,157	0,628	1908,735
Перим. Колеса, м	1,6421	1,333	111,762	386,205	4,767	0,486	1477,730
Мом. Двигуна, Н*м	60	1,111	134,114	321,837	3,972	0,405	1231,442
Повна маса авто, кг	310	0,962	154,976	278,513	3,438	0,351	1065,671

Як видно з таблиці 2.1, максимальний момент, що передавався на ведучі колеса боліду з ДВЗ становить 724 Н·м. Відповідно, для забезпечення аналогічних тягових характеристик передаточне відношення редуктора головної передачі необхідно розрахувати, щоб отримати близьке до цього значення моменту в якомога ширшому діапазоні швидкостей. Одночасно з цим, максимальна швидкість боліду несе другорядну роль. На практиці повноцінного автоспорту вибір конкретного значення редуктора головної передачі проводиться емпіричним шляхом для конкретної траси.

Для отримання базового значення моменту на колесах розрахуємо наступну пропорцію:

$$i = \frac{M_k}{\eta \cdot M_{\text{дв макс}}}, \quad (2.15)$$

де $M_k=724,134$ Н·м – найбільший момент на ведучих колесах, табл. 2,

$M_{\text{дв макс}}=150$ Н·м – максимальний момент електричного двигуна обраного в розділі 3,

$\eta=0,97$ – ККД ланцюгової передачі.

$$i = \frac{724,134}{0,97 \cdot 150} = 4,98 \approx 5$$

При даному значенні редуктора головної передачі максимальна швидкість боліда при роботі двигуна в першій зоні складе:

$$v = \frac{\pi \cdot 0,261 \cdot 6000}{30 \cdot 5} = 32,8 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right) = 118 \left(\frac{\text{км}}{\text{год}} \right)$$

Висновки до розділу 2

В даному розділі було описано основні сили, що діють на гоночний болід під час руху, їхні рівняння, придатні для використання під час симуляції руху боліда в середовищі Simulink.

В даному розділі також було розраховано необхідну потужність для руху з максимальною швидкістю і розраховано передавальне число редуктора головної передачі, необхідне для забезпечення тягового зусилля в 724 Н·м, яке розвивав болід з бензиновим ДВЗ.

3. Вибір електродвигуна та силового електрообладнання

Так як регламент допускає споживати з батареї миттєву потужність не більше 80 кВт, то основним критерієм для вибору двигуна буде саме максимальні момент та потужність.

Серед множини усіх можливих електричних двигунів доцільно буде зупинитись на двигунах змінного струму та безколекторних двигунах постійного струму. Використання приводу на основі колекторних двигунів недоцільно із-за наступних недоліків:

- 1) Нижчий ККД із-за колекторного вузла;
- 2) Високий рівень електромагнітних завад під час комутації обмоток якоря щітко-колекторним вузлом;
- 3) Великий момент інерції ротора із-за якірної обмотки із магнітопроводом;
- 4) Складність охолодження двигуна, особливо, на низьких швидкостях;
- 5) Присутнє суттєве обмеження за максимальною кутовою швидкістю.

Асинхронні двигуни зі короткозамкненим ротором (АД з КЗР) мають наступні переваги:

- 1) Простота конструкції (відносно колекторних ДПС);
- 2) Висока надійність;
- 3) Найнижча вартість серед поширених двигунів змінного струму;
- 4) Міжсервісний інтервал 10000 годин роботи;
- 5) Можливість роботи зі швидкостями понад номінальну при векторному керуванні;

До недоліків можна віднести

- 1) Складність охолодження ротора;
- 2) Необхідність примусового охолодження ротора при роботі на малих швидкостях;
- 3) Значний момент інерції ротора із-за наявності магнітопровода;
- 4) Складність систем та алгоритмів керування.

Синхронні двигуни із збудженням від постійних магнітів (СДПМ) мають наступні переваги:

- 1) Простота конструкції;
- 2) Висока надійність;
- 3) Двигуни цього типу не потребують збудження;
- 4) Найвищий ККД із-за відсутності електромагнітного збудження;
- 5) Простота системи охолодження – необхідно охолоджувати лише статор;
- 6) Міжсервісний інтервал 10000 годин роботи;
- 7) Мінімальний момент інерції ротора;
- 8) Найкращі показники питомого моменту та потужності.

До недоліків відносяться:

- 1) Висока вартість двигуна із-за наявності неодимових магнітів
- 2) Чутливість до перевищення температур – неодимові магніти розмагнічуються при температурах понад 70°C

У зв'язку з тим, що для нашого застосування потрібні найвища енергоефективність та продуктивність, а вартість обладнання – вторинний фактор, то доцільно зупинитись на останньому типі двигунів – синхронних із збудженням від постійних магнітів, та подібних їм.

Nova 30 – СДПМ виробництва німецької компанії Plettenberg Elektromotoren GmbH & Co. KG здатні забезпечувати момент до 80Н·м, потужність до 30 кВт, мають масу 6,5 кг, максимальна частота обертання ротора до 5000 об/хв, напруга живлення до 140 В, максимальний ККД 95% [8].



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд двигуна Nova 30

Bosch SMG 138/80 – тяговий мотор для гібридних авто. Цей мотор розвиває 25 кВт тривалої потужності та до 80 кВт при перевантаженні, максимальний момент 230 Н·м, максимальна частота обертання ротора до 12000 об/хв, робоча напруга до 420 В, маса 32 кг.



Рисунок 3.2 – Вигляд двигуна Bosch SMG 138/80 у розрізі

YASA P400 R – серія СДПМ від англійської компанії YASA Limited. Ці двигуни здатні видати до 370 Н·м максимального моменту, 200 Н·м тривалого, максимальну потужність до 160 кВт, а тривалу – до 100 кВт. Робоча частота обертання ротора до 8000 об/хв, максимальний ККД 96%, а маса від 24 кг [9].

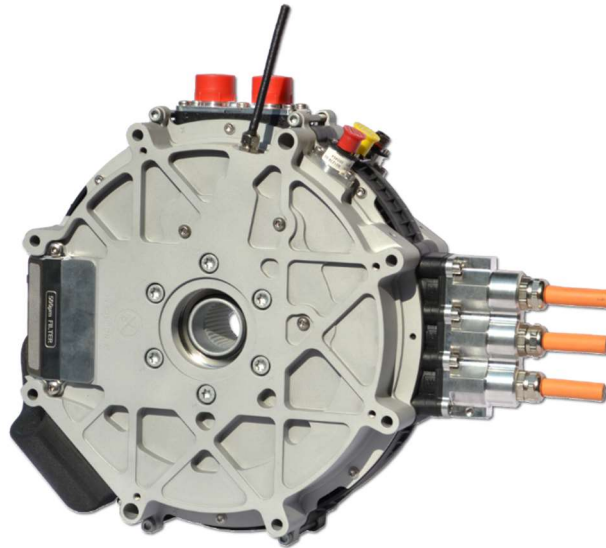


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд двигуна YASA P400 R

EMRAX 228 – популярний електромотор серед команд Formula Student, що виготовляється однойменною словенською компанією. Цей мотор розвиває максимальну потужність до 100 кВт, тривалу потужність 28-55 кВт, залежно від системи охолодження, максимальний момент до 230 Н·м, тривалий момент 120 Н·м, робочу частоту обертання до 5500 об/хв, робочу напругу до 670 В, залежно від комплектації та максимальний ККД 97%. Маса мотора 12 кг [10].

EMRAX 208 – аналогічний за конструкцією до EMRAX 228, проте дещо менший за габаритами та менш потужний – максимальна потужність 80 кВт, тривала 32-40 кВт, максимальний момент 150 Н·м, тривалий момент 80 Н·м, робоча частота обертання до 6000 об/хв, маса мотора 9,3 кг.



Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд двигуна EMRAX 208

Таблиця 3.1 – Порівняння моторів

	Мотор	$P_{\text{макс}}/P_{\text{н}}$, кВт	$M_{\text{макс}}/M_{\text{н}}$, Н·м	ККД	$I_{\text{макс}}/I$, А	$U_{\text{ж}}$, В	$n_{\text{макс}}$, об/хв	m, кг
1	Nova 30	30	80	0,95	-	140	7000	6,5
2	Bosch SMG 138/80	80/25	230/80	-	-	420	12000	32
3	YASA P400 R	160/100	370/200	0,96	-	700	8000	28,2
4	EMRAX 228	100/42	230/120	0,97	340/160	470	5500	12,4
5	EMRAX 208	80/40	150/80	0,97	200/100	470	7000	9,3

Згідно із табл. 3, відкидаємо мотори Bosch SMG 138/80 та YASA P400 R із-за занадто високої власної маси. Такі мотори краще підходять для використання на дорожніх автомобілях із-за вищого моменту, а також нижчих вимог до маси агрегатів.

Мотор Nova 30 має найменшу серед наведених масу, проте суттєво програє в моменті, потужності та ККД моторам EMRAX.

Серед моторів EMRAX віддамо перевагу моделі 208, так як він легший на 3 кг, що важливо для гоночного боліда, та матиме вищий відсоток використання потужності при русі гоночною трасою. Із представлених комплектацій обираємо модель із напругою живлення 470 В та комбінованим охолодженням. Параметри цього мотора наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри двигуна EMRAX 208

Номінальна потужність, $P_{\text{н}}$, кВт	40
Максимальна потужність, $P_{\text{макс}}$, кВт	75-80
Номінальний момент, $M_{\text{н}}$, Н·м	80
Максимальний момент, $M_{\text{макс}}$, Н·м	140-150
Номінальна напруга, $U_{\text{н}}$, В	470
Номінальний струм, $I_{\text{н}}$, А	100
Максимальний струм, $I_{\text{макс}}$, А	200
Опір фази, R_1 , Ом	0,012

Продовження таблиці 3.2	
Індуктивність намагнічуючого контуру, L_m , Гн	0,000125
Індуктивність обмотки статора, L_1 , Гн	0,00013
Магнітний потік, ψ , Вб	0,033
Число пар полюсів	10
Схема з'єднання	Зірка
Момент інерції ротора, J , кг/м ²	0,0256

Для керування цим мотором оберемо інвертор від компанії DIADA моделі DTI-100H який має наступні можливості:

- Робота із синхронним та асинхронним приводом;
- Бездатчикове векторне керування;
- Можливість підключення інкрементного та абсолютного енкодерів через SSI, а також резольверів та давачів Холла;
- Забезпечення рушійного та генераторного режиму;
- Тепловий захист інвертора та двигуна;
- Рідинне охолодження;
- Аналогове або цифрове завдання;
- 4 дискретні та 2 аналогові входи, а також 4 дискретні виходи;
- Комунікаційні інтерфейси CAN та RS-232;
- Рівень захисту IP-67;
- Даний інвертор забезпечує керування швидкістю, положенням, та моментом.

Технічні характеристики наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики перетворювача DIADA DTI-100H

Номінальна потужність, P_n , кВт	100
Максимальна потужність (до 10с), $P_{\text{макс}}$, кВт	200

Продовження таблиці 3.3

Номинальний струм, I_n , А	100
Максимальний струм (до 10с), I_{\max} , А	200
Напруга живлення, $U_{\text{ж}}$, В	До 700
Номинальний ККД, %	97-98,4
Система охолодження	Рідинна
Кількість фаз	3
Розміри ДхВхШ, мм	260x110x330
Маса, кг	8,8

Розрахунок батареї

Для розрахунку ємності батареї необхідно розрахувати втрати, на які витрачається енергія під час руху. В загальному випадку енергія витрачається при передачі від батареї до двигуна, і навпаки, що складає електричні втрати, та від двигуна до коліс, що складає механічні втрати. Електричні втрати складаються із тепла, що виділяється на батареї, провідниках, інверторі та двигуні, а механічні – із тертя в підшипниках, головній передачі, опору кочення та аеродинамічного опору. Формула для визначення енергії має наступний вигляд:

$$W_{\text{акум}} = W_{\text{мех втр}} + W_{\text{ел втр}}, \quad (3.1)$$

де $W_{\text{мех втр}}$ – енергія механічних втрат; $W_{\text{ел втр}}$ – енергія електричних втрат. Об'єм втрат на тертя можемо знайти скориставшись формулою для розрахунку потужності (14) проінтегрувавши її:

$$W_{\text{мех втр}} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(m_{\text{бп}} \cdot a + c_r \cdot m_{\text{бп}} \cdot g + F_y \cdot \sin \alpha + (0,39 \cdot v^2 + 0,18 \cdot v + 0,05) \right) \cdot v dt, \quad (3.2)$$

де T – час руху боліда, $g = 9,81$ – прискорення вільного падіння, $c_r = 0,035$ – коефіцієнт опору кочення, F_y – відцентрова сила, що діє в повороті, α – кут ковзання колеса в повороті.

$$W_{\text{ел втр}} = (1 - \eta_{\Sigma}) \frac{1}{T} \int_0^T m \frac{dv}{dt} \cdot v dt, \quad (3.3)$$

де $\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{інв}} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{ред}}$ – загальний ККД ланцюга передачі енергії батарея-двигун-колеса. ККД батареї та провідників приймаємо за 1, так як рівень втрат на них на порядок нижчий за втрати на інверторі, та залежить від взаємного розміщення обладнання в боліді та інших факторів, які важко передбачити на даному етапі проектування.

Для точного розрахунку ємності батареї за формулами (17) та (18) нам необхідно мати графік руху з діаграмою швидкостей або моменту для траси, якою буде рухатися болід, масив кутів ковзання боліду в поворотах, а також масив точок ККД двигуна залежно від навантаження та швидкості. У зв'язку з тим, що вище перелічених даних ми не, то для розрахунку скористаємось даними інших команд.

Згідно із [5 ст. 49] орієнтовна ємність батареї становить 9 кВт·год, з яких 7,25 кВт·год відводиться на витрату для забезпечення руху боліда на середньостатистичній трасі. Це значить, що на трасах із більшою кількістю поворотів та/або вищою швидкістю руху боліду енергії може не вистачати на всю тривалість Endurance Event, а на трасах із меншою кількістю поворотів та/або нижчою швидкістю руху такий об'єм може бути надлишковим.

Батарею складемо на основі елементів 18650, так як це поширений тип акумуляторів, які широко використовуються в портативній техніці та в сучасних електромобілях. Також в даному форм-факторі широкий вибір елементів за електричним об'ємом, а також за максимальним струмом розряду, що важливо для забезпечення короткочасного перевантаження щоб батарея витримувала максимальний струм розряду до 200 А.

Порівняльні дані елементів наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняльна таблиця елементів 18650

Назва елемента	Ємність Ih_b , А·г	Номинальна напруга U_{bn}	Ном. струм розрядження $I_{ном}$, А	Макс. струм розрядження $I_{макс}$, А	Маса m_b , г
NCR18650GA	3,3	3,6	10	10	49,5
INR18650-25R	2,5	3,64	20	40	43,8
US18650VTC4	2,1	3,7	10	30	45

Як видно з таблиці, серед доступних елементів найвищу ємність має NCR18650GA, проте він не задовольняє за максимальним струмом, так як доведеться брати додаткові збірки для забезпечення максимального струму до 200А. Най вигіднішим за параметрами є елемент INR18650-25R від Samsung, який забезпечує найбільший струм перевантаження, хоча й має меншу ємність.

Для того, щоб рівень заряду в батареї не впливав на динаміку боліду, під час розрахунків необхідно зменшити напругу базового елемента до рівня $U_b=3,2В$, так як згідно із даними в [12] при цьому рівні напруги на елементі він віддасть 84% заряду.

Кількість послідовно з'єднаних елементів знайдемо за наступною формулою:

$$a = \frac{U_{dc}}{U_b} = \frac{470}{3,2} = 146,785 \approx 147 \text{ шт}, \quad (3.4)$$

де U_{dc} – напруга ланки постійного струму

$$Ih = \frac{W}{U_{dc}} = \frac{9000}{470} = 19,15 \text{ (А} \cdot \text{г)}, \quad (3.5)$$

де $W = 9000$ Вт·год – кількість електричної енергії, яку має зберігати батарея.

Кількість паралельних віток знайдемо за наступною формулою:

$$b = \frac{Ih}{Ih_b} = \frac{19,15}{2,5} = 7,66 \approx 8 \text{ шт}, \quad (3.6)$$

Перевіримо, чи витримає батарея перевантаження за струмом:

$$I_{b \text{ макс}} = I_{макс} \cdot b = 40 \cdot 8 = 320 \text{ А} \quad (3.7)$$

Як бачимо, батарея має запас по струму, який перевищує потреби, тому кількість паралельних віток можна зменшити до 6, зменшивши масу батареї:

$$I_{b \text{ макс}} = 40 \cdot 6 = 240 \text{ A}$$

Смність при цьому буде:

$$W = a \cdot U_{bH} \cdot b \cdot I h_b = 147 \cdot 3,64 \cdot 6 \cdot 2,5 = 8026,2 \text{ Вт}$$

Маса батареї:

$$m = a \cdot b \cdot m_b = 147 \cdot 6 \cdot 0,0438 = 38,63 \text{ (кг)} \quad (3.8)$$

При монтажі батареї доцільно буде використати спеціальні тримачі для елементів 18650, креслення яких наведено на рис. 13. Ці тримачі забезпечать міцне утримання кожного елемента на своєму місці, крім того, навколо елемента буде зазор в 2, який дозволить відводити тепло від елементів за допомогою примусової вентиляції, вентилятор якої монтуватиметься в кожух акумуляторної батареї разом із повітряним фільтром для очистки повітря від пилу та захисту від прямого попадання води.

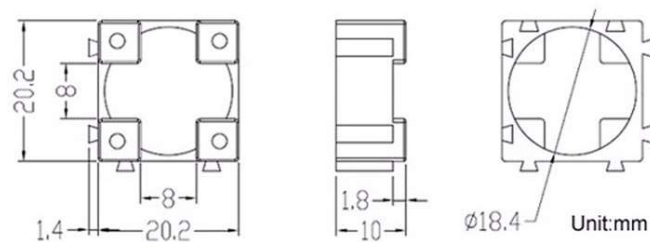


Рисунок 3.5 – Ескіз тримачів для акумуляторів 18650

Змонтувати батарею потрібно послідовними вітками, кожна вітка збирається у набір 15x10, де у вільні від елементів слоти поміщується дугогасний елемент, який підключається паралельно до єдиного найменшого за поперечним перетином провідника. Такий захист дозволяє, у разі КЗ всередині вітки, розірвати вітку, та вберегти батарею від самозаймання.

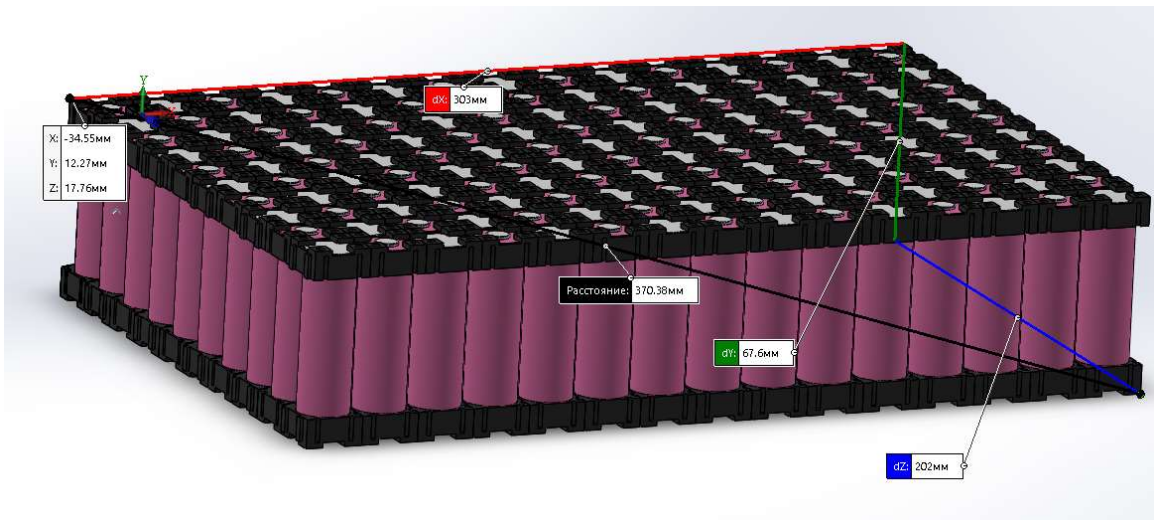


Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд вітки акумуляторної батареї

Висновки до розділу 3

В даному розділі було обгрунтовано вибір типу двигуна та обрано модель EMRAX 208 серед поширених рішень для електричних автомобілів.

Після вибору двигуна було обрано перетворювач DIADA DTI-100H, який розроблений для встановлення на електричні автомобілі та має рідинне охолодження, що критично для компактного розташування всього обладнання в межах рами боліда.

Вкінці розділу було оцінено необхідний об'єм акумуляторної батареї, спираючись на досвід іноземних команд, вибрано елементи INR18650-25R для збирання акумуляторної батареї та розраховано необхідну кількість елементів для забезпечення необхідного пробігу від одного циклу зарядки, а також струмових перевантажень при динамічному водінні боліду.

4. Математична модель електромеханічного об'єкта

Згідно з теорією двофазної узагальненої електричної машини еквівалентна схема синхронного двигуна із збудженням від постійних магнітів має вигляд, що продемонстрований на рис. 4.1.

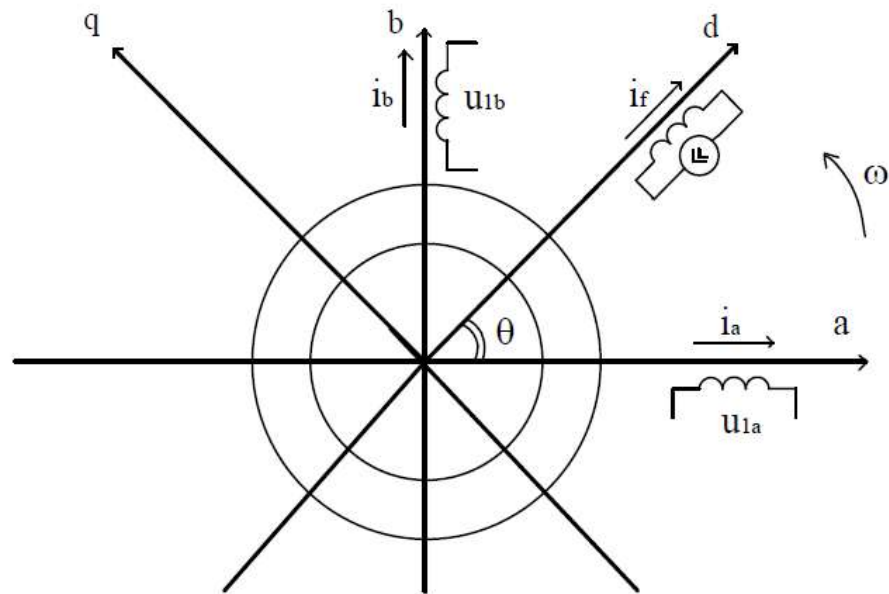


Рисунок 4.1 – Двофазна схема синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів

Стандартні позначення на рис. 14:

- (a-b), (d-q) – системи координат статора та ротора відповідно;
- (u_{1a}, u_{1b}), (i_{1a}, i_{1b}) – компоненти векторів напруги та струму статора
- $i_f = \text{const}$ – струм збудження фіктивного джерела струму, що схематизує дію постійних магнітів;
- θ, ω – кутове положення та кутова швидкість ротора відносно статора, $\omega = \frac{d\theta}{dt}$.

Вектори струму, потокозчеплення та напруги статора синхронного двигуна задаються наступними векторами:

$$\begin{aligned}
 i &= (i_{1a}, i_{1b}, i_f)^T \\
 \psi &= (\psi_{1a}, \psi_{1b}, \psi_f)^T \\
 u_1 &= (u_{1a}, u_{1b})^T
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

За умови відсутності явнополюсності матриця індуктивностей електричної машини має вигляд:

$$L(\varepsilon) = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & L_m \cos \theta \\ 0 & L_1 & L_m \sin \theta \\ L_m \cos \theta & L_m \sin \theta & L_f \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

де L_1 , L_f – індуктивності статорної та фіктивної обмотки збудження, L_m – індуктивність контуру намагнічування.

Електромагнітна енергія та момент узагальненої машини мають вигляд:

$$W(\theta) = \left(\frac{1}{2} i^T L(\theta) \right) i \quad (4.3)$$

$$M = \frac{dW(\theta)}{d\theta}, \quad (4.4)$$

Підставивши (4.1) – (4.3) в (4.4) отримаємо наступний вираз для моменту СД:

$$\begin{aligned} M &= \left(\frac{1}{2} i^T \frac{dL(\theta)}{d\theta} i \right) = \frac{1}{2} i^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_m \sin \theta \\ 0 & 0 & L_m \cos \theta \\ -L_m \sin \theta & L_m \cos \theta & 0 \end{bmatrix} i = \\ &= \frac{1}{2} (i_{1a}, i_{1b}, i_f) \begin{bmatrix} 0 & 0 & -L_m \sin \theta \\ 0 & 0 & L_m \cos \theta \\ -L_m \sin \theta & L_m \cos \theta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_f \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{2} (i_{1a}, i_{1b}, i_f) \begin{pmatrix} -L_m i_f \sin \theta \\ L_m i_f \cos \theta \\ -L_m i_{1a} \sin \theta + L_m i_{1b} \cos \theta \end{pmatrix} = \\ &= L_m i_f (-i_{1a} \sin \theta + i_{1b} \cos \theta). \end{aligned} \quad (4.5)$$

Вирази для потокозчеплень мають вигляд:

$$\psi = L(\theta) i, \quad (4.6)$$

з врахуванням (4.2) набуває вигляду:

$$\begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_f \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & L_m \cos \theta \\ 0 & L_1 & L_m \sin \theta \\ L_m \cos \theta & L_m \sin \theta & L_f \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ i_f \end{pmatrix}, \quad (4.7)$$

де $i_1 = (i_{1a}, i_{1b})^T$, $\psi = (\psi_{1a}, \psi_{1b})^T$ – вектори струму та потокозчеплення статора.

Узагальнене рівняння напруги статора

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi}{dt} \quad (4.8)$$

Вектор потокозчеплення статора:

$$\psi_1 = \begin{pmatrix} \psi_{1a} \\ \psi_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix} + L_m i_f \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}, \quad (4.9)$$

де $R_1 = \text{diag}(R_1, R_1)$ – матриця активних опорів статора. Підставивши (4.9) в (4.8) отримаємо:

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_1 \end{bmatrix} \dot{\begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix}} + L_m i_f \begin{pmatrix} -\omega \sin \theta \\ \omega \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (4.10)$$

Для випадку, коли загальний момент інерції механічної системи J постійний, то динамічна електромеханічного об'єкта може бути отримана з (4.5), (4.10) в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} [k_m (-i_{1a} \sin \theta + i_{1b} \cos \theta) - M_c] \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$i_{1a} = L_1^{-1} (u_{1a} - R_1 i_{1a} - L_m i_f \omega \sin \theta)$$

$$i_{1b} = L_1^{-1} (u_{1b} - R_1 i_{1b} - L_m i_f \omega \cos \theta)$$

де $k_m = L_m i_f = \text{const}$ – коефіцієнт моменту, а M_c – момент навантаження.

В системі (4.11) отримано математичну модель неявнополюсного синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів записану системі координат статора (a-b). Виконавши перетворення з (a-b) до (d-q), орієнтовану за вектором i_f

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix} &= e^{-j p_n \theta} \begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{pmatrix} &= e^{-j p_n \theta} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.12)$$

рівняння (4.11) набувають наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p_n L_m i_f i_{1q} - M_c \right) \\ i_d &= -\frac{R_1}{L_1} i_{1d} + p_n \omega i_{1q} + \frac{1}{L_1} u_{1d} \\ i_q &= -\frac{R_1}{L_1} i_{1q} - p_n \omega i_{1d} - \frac{L_m}{L_1} i_f p_n \omega + \frac{1}{L_1} u_{1q} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Розташування систем координат статора та ротора у просторі згідно з перетвореннями (4.12) зображено на рис. 15.

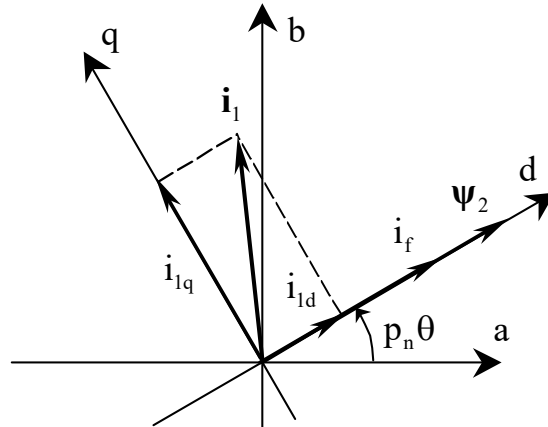


Рисунок 4.2 – Двофазна схема СД після перетворення
Модуль вектора потокозчеплення ротора з (4.7) приймає вигляд:

$$\psi_f = L_1 i_{1d} + L_m i_f \quad (4.14)$$

Модель СД в координатах ротора (d-q) має наступні властивості:

1. рівняння СД не залежать від кутового положення, але залишаються нелінійними;
2. рівняння моменту лінійне відносно ортогональної до напрямку i_f компоненти струму статора i_{1q} і не є залежним від компоненти i_{1d} та формально співпадає з рівнянням моменту двигуна постійного струму;
3. потокозчеплення статора ψ_{1d} лінійне відносно прямої компоненти струму статора i_{1d} .

Структурна схема СД представлена на рис. 16, [15].

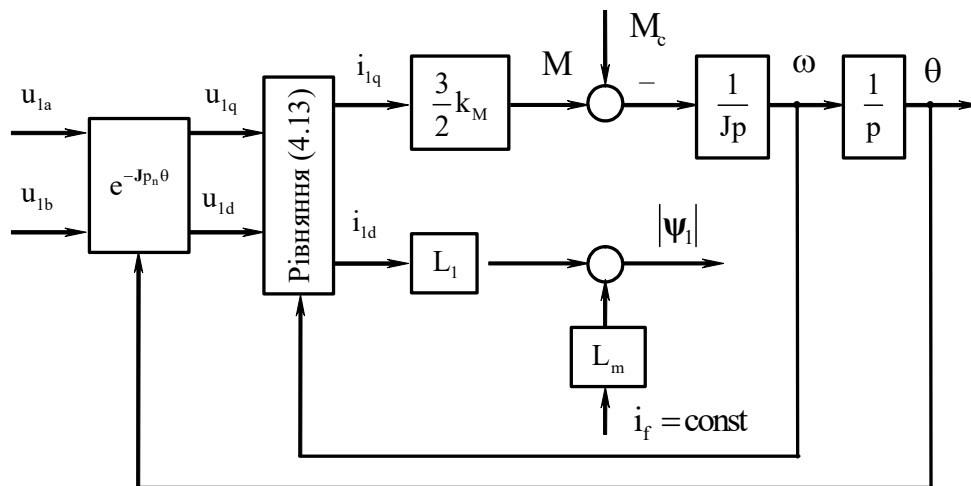


Рисунок 4.3 – Структурна схема СД

Для моделювання двигуна в Simulink були задані наступні значення коефіцієнтів та параметрів згідно із Datasheet Emrax 208 [10]:

$$L_m = 0,000125 \text{ Гн}$$

$$k_m = 0,83$$

$$k_u = 1,15$$

$$p_n = 10$$

$$R_1 = 0,014 \text{ Ом}$$

$$L_1 = 0,00013 \text{ Гн}$$

$$J = 0,0256 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$$

Висновки до розділу 4

В даному розділі було описано математичну модель синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів. На основі рівнянь цієї моделі зібрано модель двигуна в Simulink, задані конструктивні коефіцієнти та параметри досліджуваного двигуна для подальшого моделювання.

5. Проектування системи керування

Зробимо для моделі СДПМ (4.13) наступні припущення:

А.1. Струми статора, кутова швидкість та кутове положення ротора є доступними для вимірювання.

А.2. Параметри СДПМ відомі та незмінні у часі.

При виконанні припущень А.1-А.2 синтезуємо алгоритм керування, який гарантує досягнення наступних цілей керування:

В.1. Асимптотичне відпрацювання траєкторії моменту таки чином, щоб:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{M} \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} (M - M^*) = 0, \quad (5.1)$$

де \tilde{M} – похибка відпрацювання моменту.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} (\psi - \psi^*) = 0, \quad (5.2)$$

де ψ^* – похибка відпрацювання потокозчеплення.

5.1. Синтез регуляторів струму

Запишемо струми із системи (4.13) у вигляді похибок відпрацювання:

$$\begin{aligned} \tilde{i}_d &= i_d - i_d^* \\ \tilde{i}_q &= i_q - i_q^* \end{aligned} \quad (5.3)$$

де i_d^*, i_q^* – задані значення струмів по осях d та q.

Підставивши рівняння (5.1) та (5.2) в моменту із системи (4.13) та рівняння потокозчеплення (4.14), отримаємо:

$$M^* + \tilde{M} = k_m (i_{1q}^* + \tilde{i}_{1q}), \quad (5.4)$$

$$\psi^* + \tilde{\psi} = L_1 (i_{1d}^* + \tilde{i}_{1d}) + L_m i_f, \quad (5.5)$$

Із рівнянь (5.4) та (5.5) встановимо залежності між змінними:

$$M^* = k_m i_{1q}^*, \quad (5.6)$$

$$\psi^* = L_1 i_{1d}^* + L_m i_f. \quad (5.7)$$

Аналогічно для похибок відпрацювання:

$$\tilde{M} = k_m \tilde{i}_{1q}, \quad (5.8)$$

$$\tilde{\psi} = L_1 \tilde{i}_{1d} \quad (5.9)$$

Рівняння (5.6)-(5.9) демонструють, що відпрацювання заданих траєкторій моменту та потоку досягається при компенсації похибок струмів.

Виходячи із системи (4.13), динаміка похибок відпрацювання струмів з урахуванням (5.3) матиме вигляд:

$$\dot{i}_d = -\frac{R_1}{L_1} i_d^* - \frac{R_1}{L_1} \tilde{i}_d + p_n \omega i_q + \frac{u_d}{L_1} - i_d^*, \quad (5.10)$$

$$\dot{i}_q = -\frac{R_1}{L_1} i_q^* - \frac{R_1}{L_1} \tilde{i}_q + p_n \omega i_d + \frac{u_q}{L_1} - i_q^* - \frac{L_m}{L_1} i_f p_n \omega. \quad (5.11)$$

Для рівняння (5.4) синтезуємо ПІ-регулятор струму по осі d:

$$u_d = L_1 \left(-k_{id1} \tilde{i}_d - x_d + i_d^* - p_n \omega i_q + \frac{R_1}{L_1} i_d^* \right), \quad (5.12)$$

$$\dot{x}_d = k_{iid} \tilde{i}_d,$$

де $(k_{id1}, k_{iid}) > 0$ – пропорційна та інтегральна складові регулятора струму по осі d.

Після підстановки рівняння (5.6) в (5.4) отримуємо наступні рівняння динаміки похибок відпрацювання струму по осі d:

$$\dot{i}_d = -\left(\frac{R_1}{L_1} + k_{id1} \right) \tilde{i}_d - x_d, \quad (5.13)$$

$$\dot{x}_d = k_{iid} \tilde{i}_d.$$

Так як магнітний потік у СДПМ формується постійними магнітами на роторі, то в цьому разі відпадає необхідність створювати потік струмом статора, тому (5.6) приймаємо $i_d^* = 0$ та $i_d^* = 0$. При цьому підвищується енергоефективність керування двигуном, так як $i_1 = i_q$.

Для рівняння (5.5) синтезуємо ПІ-регулятор по осі q:

$$u_q = L_1 \left(-k_{iq1} \tilde{i}_q - x_q + i_q^* - p_n \omega i_d + \frac{R_1}{L_1} i_q^* + \frac{k_u}{L_1} \omega \right), \quad (5.14)$$

$$\dot{x}_q = k_{iiq} \tilde{i}_q,$$

де $(k_{iq1}, k_{iiq}) > 0$ – пропорційна та інтегральна складові регулятора струму по осі q.

Підставивши рівняння (5.8) в (5.5) отримаємо наступні рівняння динаміки похибок відпрацювання струму по осі q:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{i}}_q &= -\left(\frac{R_1}{L_1} + k_{iq1}\right)\tilde{i}_q - x_q, \\ \dot{x}_q &= k_{iiq}\tilde{i}_q. \end{aligned} \quad (5.15)$$

5.2. Синтез регулятора моменту

З рівняння моменту в системі (4.13) визначимо регулятор моменту у наступному вигляді

$$\begin{aligned} i_q^* &= \frac{2 M^*}{3 p_n \psi} \\ i_q^* &= \frac{2 \dot{M}^*}{3 p_n \psi'} \end{aligned} \quad (5.16)$$

де M^* – заданий момент із обмеженою першою похідною.

При розрахунку траєкторії заданого моменту необхідно враховувати, що при роботі в першій зоні регулювання ($\omega < \omega_H$) момент обмежується максимальним значенням, водночас, в другій зоні ($\omega > \omega_H$) присутнє обмеження по потужності.

Штучні механічні характеристики при двозонному керуванні представлені на рис. 17.

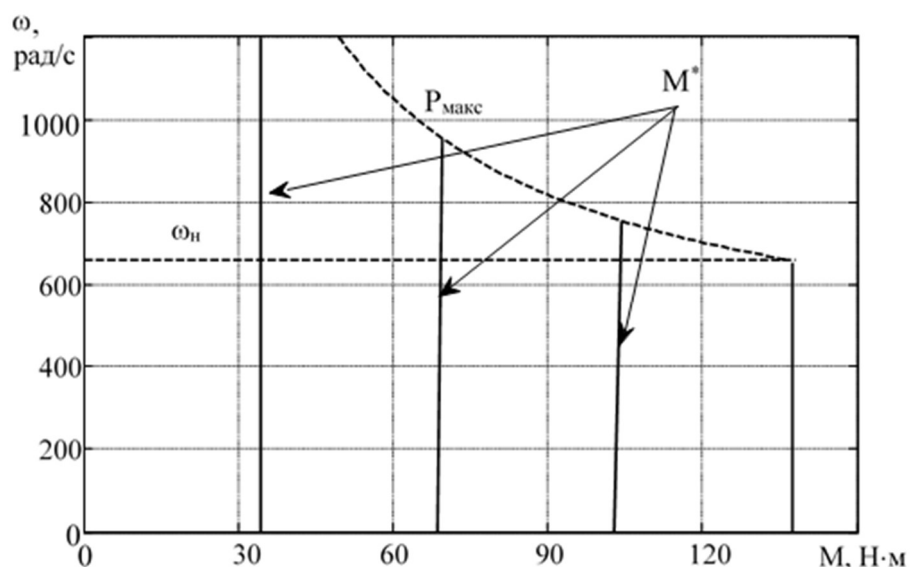


Рисунок 5.1 – Штучні механічні характеристики СД при двозонному керуванні

5.3 Перевірка стійкості системи векторного керування моментом СДПМ

Запишемо рівняння динаміки похибки регулювання струму по осі d:

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{i}}_d &= -\left(\frac{R_1}{L_1} + k_{id1}\right)\tilde{i}_d - x_d, \\ \dot{x}_d &= k_{iid}\tilde{i}_d.\end{aligned}\tag{5.17}$$

Перепишемо рівняння (5.17) в матричній формі:

$$\begin{pmatrix} \dot{\tilde{i}}_d \\ \dot{x}_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\left(\frac{R}{L} + k_{id}\right) & 1 \\ -k_{iid} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{i}_d \\ x_d \end{pmatrix},\tag{5.18}$$

Підставивши чисельні значення параметрів у (5.18), отримаємо наступну матрицю:

$$A = \begin{pmatrix} -2096 & 1 \\ -2196608 & 0 \end{pmatrix},\tag{5.19}$$

Знайшовши власні значення отримуємо:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= (-1,048 + 1,048i) \cdot 10^3, \\ \lambda_2 &= (-1,048 - 1,048i) \cdot 10^3.\end{aligned}$$

Оскільки дійсні частини власних значень менші 0, то система стійка

Так як форма рівнянь динаміки для похибки по струму \tilde{i}_q (5.15) має аналогічний вигляд, як і \tilde{i}_d (5.17), а регулятори мають такі ж значення коефіцієнтів, то можна сказати, що матриця A також справедлива і для \tilde{i}_q , тому система регулювання i_q також стійка.

Структурна схема алгоритму векторного керування моментом СДПМ представлена на рис. 5.2

Висновки до розділу 5

В даному розділі було виконано синтез алгоритму векторного керування моментом СДПМ, який забезпечує асимптотичне його відпрацювання. За отриманими рівняннями спроектовано структурну схему алгоритму керування. Також, було проведено перевірку стійкості спроектованої системи за критерієм Гурвіца.

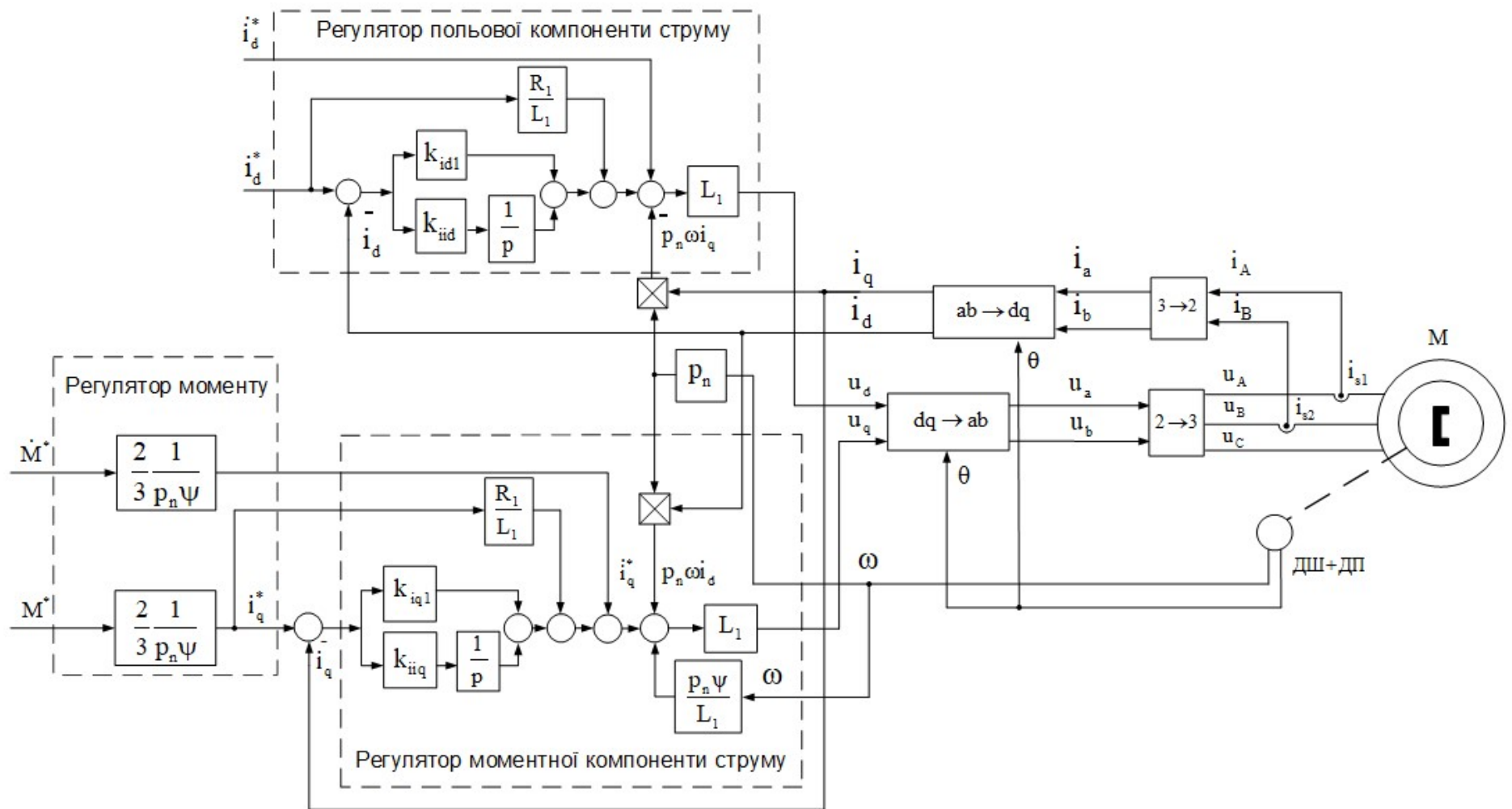


Рисунок 5.2 – Структурна схема алгоритму векторного керування моментом СДПМ

6. Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи

6.1 Дослідження роботи системи векторного керування

Під час дослідження системи векторного керування моментом СДПМ використано параметри двигуна EMRAX 208, що наведені вкінці розділу 4 та механічної системи боліда.

Порядок проведення дослідження:

1. В момент часу $t = 0,5$ секунди завдання моменту зростає до 1/10 максимального моменту двигуна. Тривалість наростання моменту $t = 0,05$ секунди.
2. Після наростання на вхід системи подається тривалий момент протягом 1 секунди.
3. По завершенню періоду сталого моменту відбувається зменшення завдання з часом та інтенсивністю рівними зростанню.
4. Ротор двигуна здійснює обертання за інерцією протягом 2 секунд.
5. Двигун гальмується із заданим моментом.

При виконанні досліду використано наступні значення параметрів системи керування:

$$k_{id1} = k_{iq1} = 2000,$$
$$k_{iid} = k_{iiq} = \frac{k_{iq1}^2}{2} = 2000000$$

Результати проведеного досліду зображено на рис. 6.1 та 6.2.

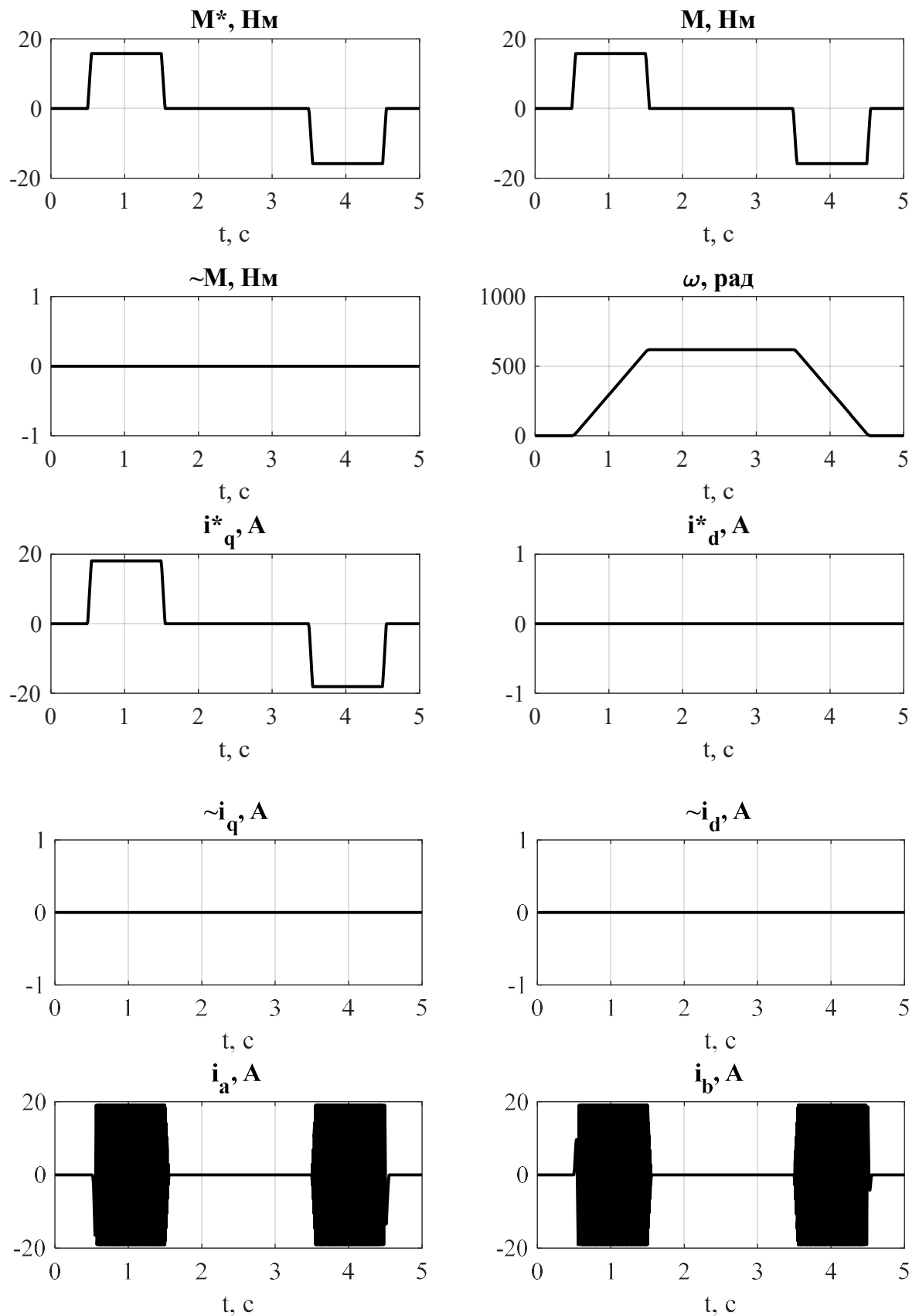


Рисунок 6.1 – Графіки перехідних процесів у СДПМ при відпрацюванні заданого моменту

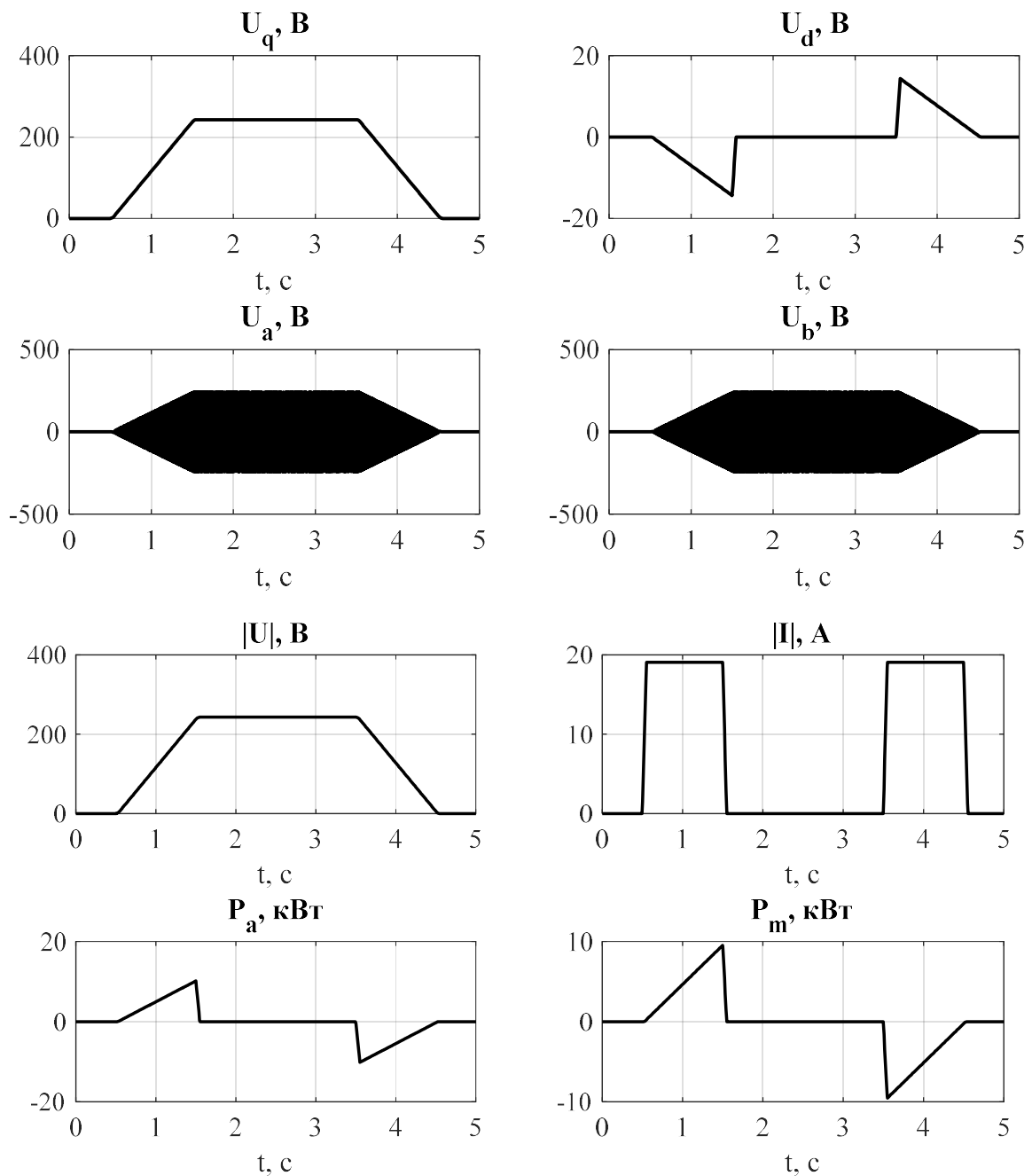


Рисунок 6.2 – Графіки перехідних процесів у СДПМ при відпрацюванні заданого моменту

Із отриманих на рис. 6.1 та 6.2 результатів моделювання системи векторного керування моментом СДПМ можна зробити висновок, що спроектована система асимптотично відпрацьовує траєкторію заданого моменту M^* з практично відсутньою похибкою. Струми i_{1d} та i_{1q} також відпрацьовуються без похибок, а також струм i_{1d} залишається рівним нулю забезпечуючи сталість потокозчеплення. Двигун розвиває кутову швидкість 617 рад/с або 5900 об/хв.

6.2 Дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи при відпрацюванні експериментального руху боліда

Дослідження динамічних характеристик проведемо для Acceleration Event. Результати моделювання наведено на рис. 6.3, 6.4 та 6.5

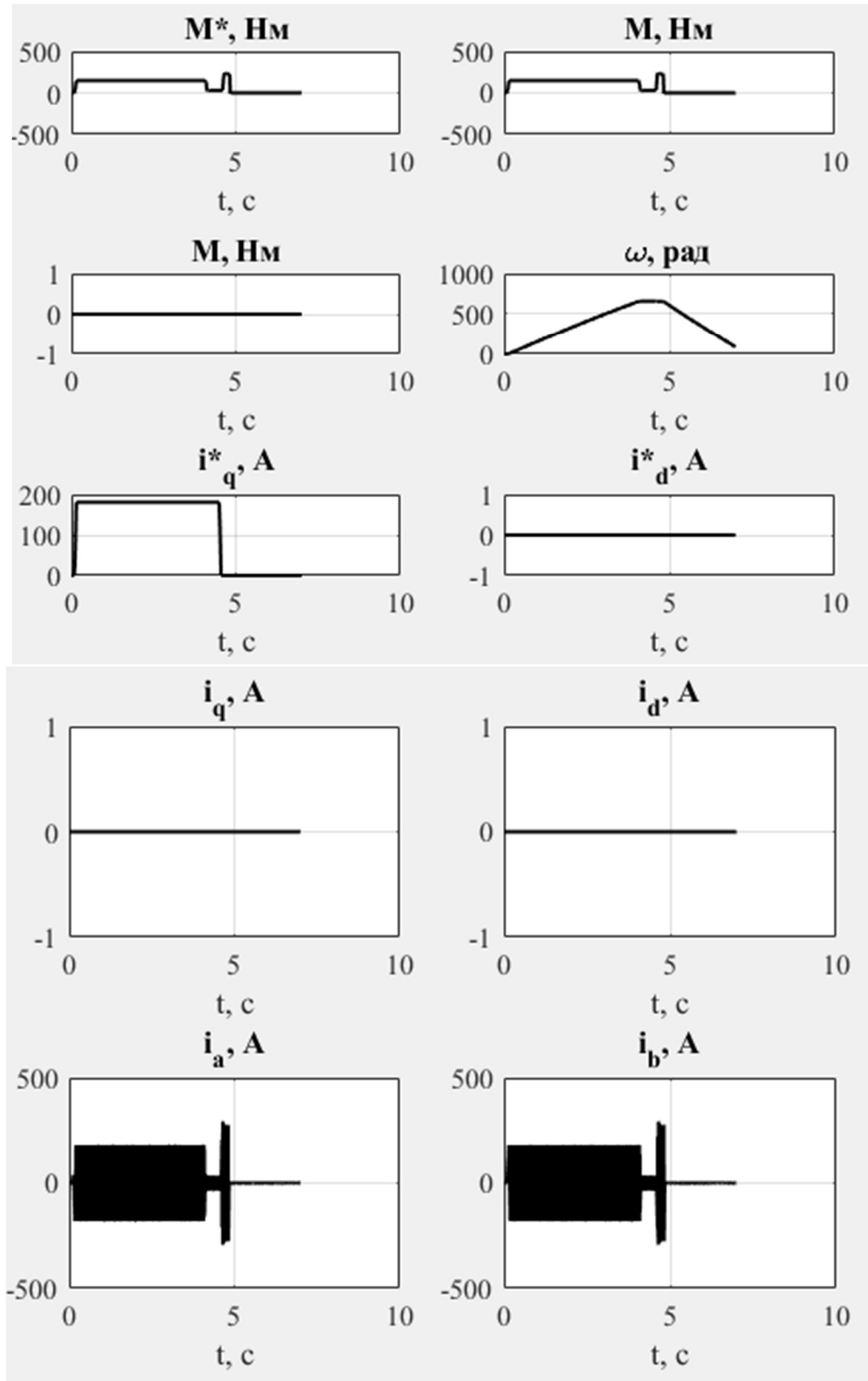


Рисунок 6.3 – Графіки перехідних процесів СДПМ при Acceleration Event

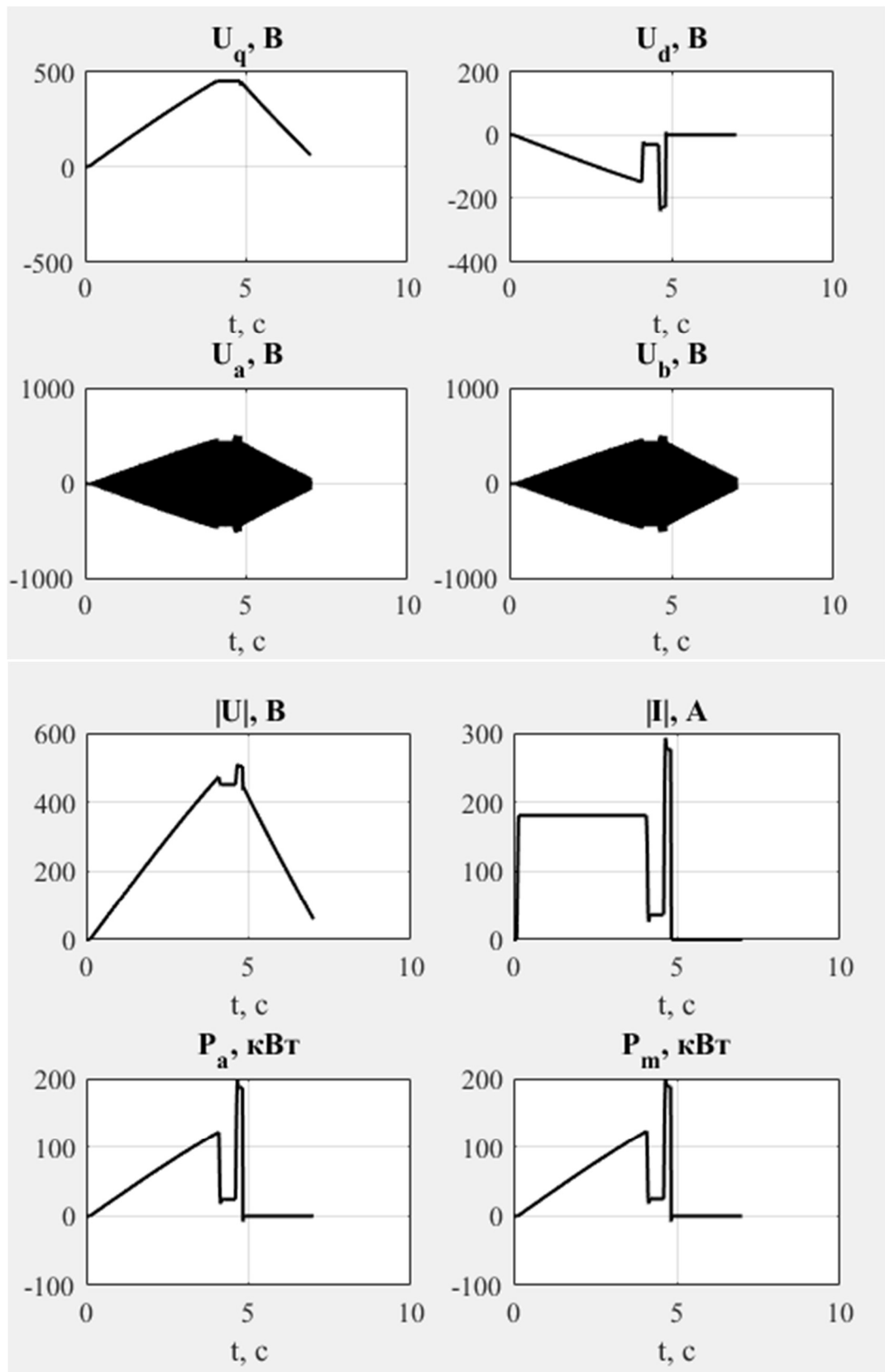


Рисунок 6.4 – Графіки перехідних процесів СДПМ при Acceleration Event

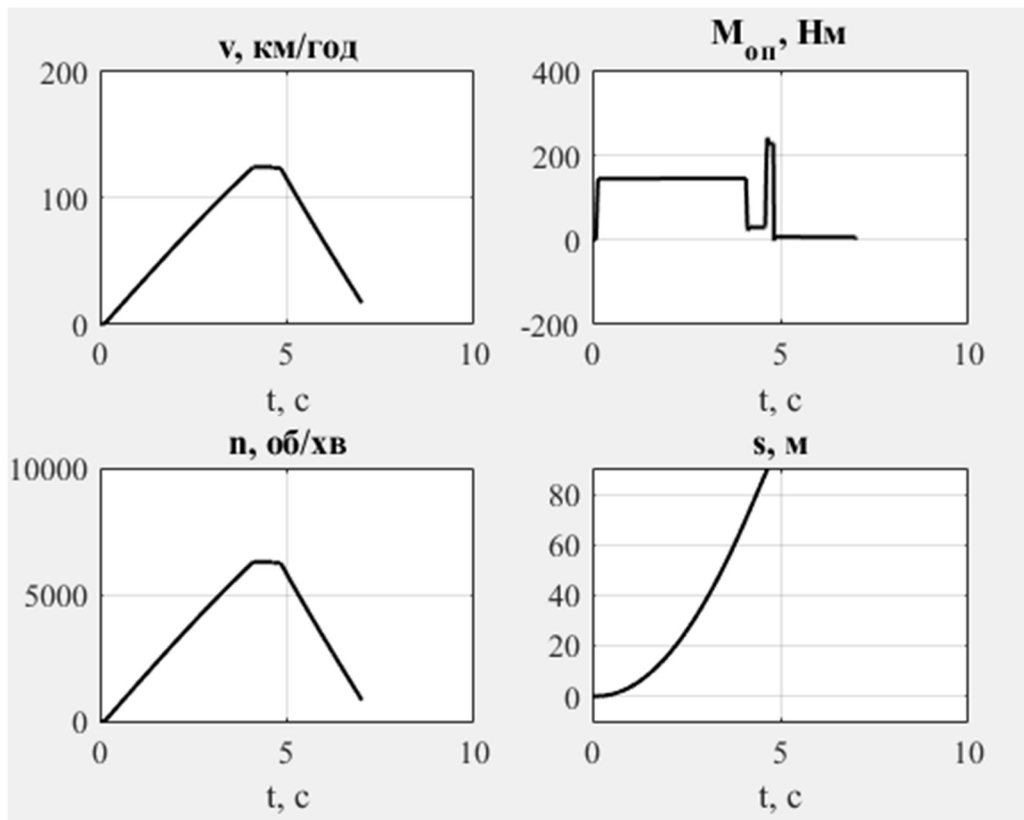


Рисунок 6.5 – Графіки механічних координат при Acceleration Event

Із отриманих на рис. 6.3 та 6.4 результатів моделювання системи векторного керування моментом СДПМ можна зробити висновок, що система асимптотично відпрацьовує траєкторію заданого моменту M^* з практично відсутньою похибкою. Струми i_{1d} та i_{1q} також відпрацьовуються без похибок, а також струм i_{1d} залишається рівним нулю забезпечуючи сталість потокозчеплення. Двигун розвиває кутову швидкість 628 рад/с або 6000 об/хв. На графіках рис. 6.5 видно, як змінюються механічні координати – швидкість боліда, момент опору та пройдена ним відстань. Час, за який болід прискорюється до 100 км/год складає 3 секунди, а час проходження 75 метрів складає 4,22 секунди, що є чудовим показником для середнього боліда Formula Student.

7. Опис схеми керування

Система керування електромеханічною системою боліда складається із пристроїв безпеки передбачених регламентом та автономного тягового інвертора:

- 1) Brake System Plausibility Device (BSPD) – тригер гальмівної системи, який вимикає контактор високовольтної акумуляторної батареї, якщо тиск в системі гальм більший 3 МПа, а також присутня потужність живлення тягового приводу понад 5 кВт;
- 2) Insulation Monitoring Device (IMD) – пристрій контролю стану ізоляції – вимикає контактор високовольтної акумуляторної батареї, якщо значення опору ізоляції менше, ніж 500 Ом/В із розрахунку на максимальну напругу акумуляторної батареї;
- 3) Accumulator Management System (AMS) – пристрій, що слідкує за станом акумуляторної батареї, який своїм контактом вимикає контактор високовольтної акумуляторної батареї, якщо присутнє перевищення максимально допустимого струму батареї чи температури критичних елементів;
- 4) Kill Switch – аварійні вимикачі, що розташовані обабіч кокпіту та в ньому, які вимикають контактор високовольтної акумуляторної батареї при позаштатних ситуаціях і приводяться в дію людиною;
- 5) Inertia Switch – вимикач, що розмикає коло живлення контактора високовольтної акумуляторної батареї у випадку дії на болід перевантажені до 8g тривалістю менше 50 мс, і захищає болід у разі аварії;
- 6) Brake Over-Travel Switch (BOTS) – аварійний вимикач, що розмикає коло живлення контактора високовольтної акумуляторної батареї у разі пошкодження гальмівної системи боліда.

Автономний інвертор отримує завдання від 2-х потенціометрів, які встановлені на педалі газу (дросель) та гальма і відповідають за інтенсивність прискорення та рекуперації відповідно. Схема зображена на рис. 7.1

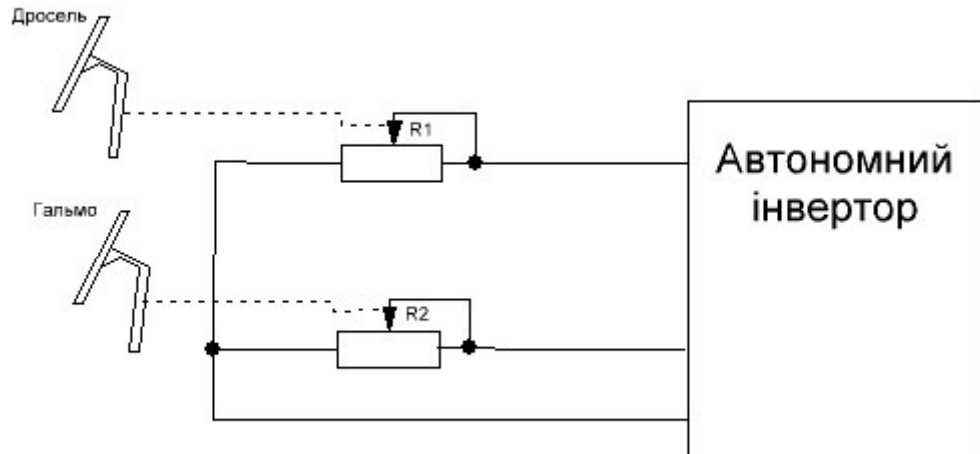


Рисунок 7.1 – Схема керування тяговим електроприводом

Значення струму, яке встановлюється потенціометром R_1 пропорційне значенню струму живлення тягового двигуна, а значення струму в потенціометрі R_2 – пропорційне значенню струму рекуперації. Зручність саме такого виконання задавача полягає в тому, що достатньо легко реалізується можливість підключення системи контролю стійкості (ESP) (рис. 7.2), яка дозволяє регулювати завдання залежно від умов зчеплення коліс, аналізуючи положення керма, бокові прискорення та різницю швидкостей ведучих та неведучих коліс для запобігання ковзанню коліс, і, відповідно, заносу.

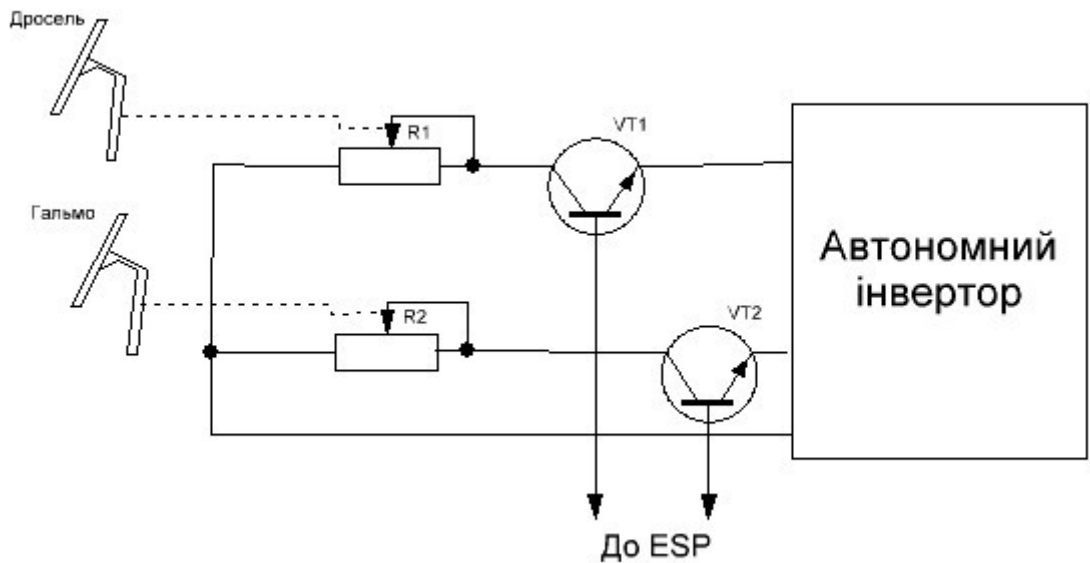


Рис. 7.2 – Схема керування електроприводом із обмежувачем системи контролю стійкості

Висновки

В даній роботі було розроблено та досліджено електромеханічну систему гоночного боліда класу Formula SAE.

На основі зробленого аналізу електроприводів різних типів було обґрунтовано доцільність використання синхронного приводу, завдяки його основним перевагам – високим питомому моменту та потужності.

Для дослідження динаміки боліда було розроблено математичну модель, яка враховує сили опору кочення, гравітації, аеродинаміки та бокових навантажень в поворотах.

Для керування приводом було розроблено алгоритм векторного керування моментом який забезпечує його асимптотичне відпрацювання.

Із результатів досліджень було встановлено наступне:

1. Алгоритми керування демонструють високу динаміку та якість регулювання координат і забезпечують високі динамічні характеристики боліда.
2. Середня споживана потужність двигуна на досліджуваній ділянці траси нижча за номінальну, а це означає, що доцільно підібрати для цієї ділянки передавальне відношення головної передачі, щоб

забезпечити максимальну динаміку боліда і наблизити потужність двигуна ближче до номінальної, що дозволить максимально використати зону максимального ККД двигуна, та скоротити час проходження ділянки траси.

Розроблені в даній роботі алгоритми керування придатні до використання на реальному боліді та можуть бути використані для одномоторного електроприводу гоночного автомобіля, зокрема для участі в змаганнях Formula SAE/Formula Student Electric.

Список літератури

1. Регламент Formula Student 2019 [Електронний ресурс] –Режим доступу до ресурсу:
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf
2. Відео-демонстрація рекорду прискорення [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://youtu.be/I-NCH8ct24U>
3. Патент Method of Operating a Dual Motor Drive and Control System for an Electric Vehicle [Електронний ресурс] –Режим доступу до ресурсу: <http://www.patentsencyclopedia.com/app/20130241445>
4. Інформація про особливості Dynamic Events [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.formula-ata.it/dynamic-events/>
5. Loek Marquenie. Design of an energy efficient high performance drive train // Eindhoven University of Technology. 2010. 115 pp.
6. C. Rouelle. Vehicle Dynamics, Race Car Engineering and Data Acquisition Seminar Reader. *Published by OPTIMUMG, Denver, USA. 2009.*
7. «Formula SAE Electric Competition: Electrical Motor Design» Enrico Carraro, Michele Degano, Mattia Morandin, Nicola Bianchi, Senior Member, *IEEE*, Padova, Italy, 2013 – 8 с.
8. Nova 30 Datasheet [Електронний ресурс] –Режим доступу до ресурсу: <https://plettenberg-motoren.net/en/products/motor-solutions/motors>
9. YASA P400 Datasheet [Електронний ресурс] –Режим доступу до ресурсу: https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2018/01/YASA_P400_Product_Sheet.pdf
10. EMRAX Datasheet [Електронний ресурс] –Режим доступу до ресурсу: https://emrax.com/wp-content/uploads/2017/10/user_manual_for_emrax_motors.pdf
11. NCR18650GA Datasheet [Електронний ресурс] –Режим доступу до ресурсу:

https://bestbattery.com.ua/image/data/Batteries/Datasheet/datasheet_18650_sanyo_GA.pdf

12. INR18650-25R Datasheet [Електронний ресурс] –Режим доступу до ресурсу:

<https://bestbattery.com.ua/image/data/Batteries/Datasheet/INR18650-25R-datasheet.pdf>

13. US18650VTC4 Datasheet [Електронний ресурс] –Режим доступу до ресурсу:

<https://bestbattery.com.ua/image/data/Batteries/Datasheet/us18650vtc4.pdf>

14. Leonhard W. Control of Electrical Drives / Leonhard Werner, 2001. – 455 с. – (Springer).

15. Пересада С. М. Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів напрямку підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, С. С. Димко. – м. Київ, 2016. – 43 с.