

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода
автономного транспортного засобу»

Виконав: студент 2-го курсу, гр. ЕПА-23м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

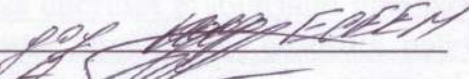
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Віталій ШЕСТОПАЛ
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри КЕМСК

Вадим БОМБИК
(прізвище та ініціали)

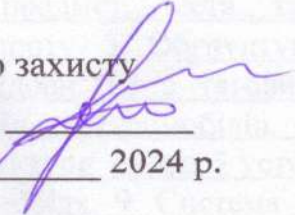
« 19 » листопада 2024 р.

Опонент: к.т.н., доц. 

(прізвище та ініціали)

« 07 » грудня 2024 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри 

« 19 » 11 2024 р.

Вінниця ВНТУ – 2024 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет _____ Електроенергетики та електромеханіки

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

Рівень вищої освіти _____ II-й (магістерський)

Галузь знань _____ 14 – Електрична інженерія

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

“21” серпня 2024 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Шестопад Віталій Петрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода автономного транспортного засобу

керівник роботи Бомбик Вадим Сергійович, ст. викл. каф. КЕМСК

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “14” 09 2024 року №310

2. Строк подання студентом роботи 30 листопада 2024

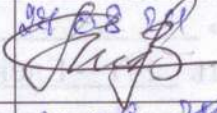
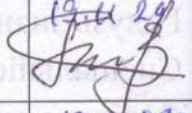
3. Вихідні дані до роботи: маса електромобіля, кг – 1800; площа поперечного перерізу електромобіля S_a , м² – 2,2; коефіцієнт аеродинамічного опору C_x , у.о. – 0,3; радіус колеса електромобіля r_k , м. – 0,323; ККД механічної трансмісії η_{mt} , у.о. – 0,96; передаточне число головної передачі i_{en} , у.о. – 4,3; передаточне число коробки передач i_{kp} , у.о. – 1,645

4. Зміст текстової частини: Вступ; 1 Обґрунтування вибору компоновки системи тягового електропривода; 2 Розрахунок параметрів тягової системи та розробка функціональної системи транспортного засобу; 3 Розробка системи стабілізації швидкості транспортного засобу на базі мотор-колів; 4 Моделювання динамічних режимів роботи транспортного засобу в ППП Matlab Simulink; 5. Економічна частина; 6 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження; 2. Актуальність сучасного електротранспорту. 3. Обґрунтування вибору компоновки системи ТЕП. 4. Вимоги та критерії побудови ТЗ з тяговим електроприводом. 5. Існуючі рішення імпульсних перетворювачів електромобілів. 6. Обґрунтування структури ппн теп електромобіля. 7. Розробка структури силової установки електромобіля. 8. Деталізація параметрів ОППН ТЕП електромобіля. 9. Система керування ключами перетворювача. 10. Розробка схеми трьохканального ОППН ТЕП. 11. Математична модель тягового СДПМ. 12. Моделювання двонаправленого ппн теп електромобіля (2 плаката). Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	ст. викл. каф. КЕМСК Бомбик В.С.	 24.08.24	 19.11.24
Економічна частина	Шулле Ю.А. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	 27.08.24	 19.11.24

7. Дата видачі завдання 27.08.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

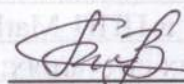
№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	27.08.2024	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	26.10.2024	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	02.11.2024	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	03.11.2024	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	16.11.2024	
6	Попередній захист МКР	19.11.2024	
7	Нормоконтроль МКР	19.11.2024	
8	Рецензування МКР	07.12.2024	
9	Захист МКР		

Студент


(підпис)

Шесточка В.П.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Бомбик В.С.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

УДК: 62-83:622

Шестопал В.П. Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода автономного транспортного засобу. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2024. 121 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 31 назв; рис.: 43; табл. 11.

В магістерській кваліфікаційній роботі були запропоновані рішення щодо підвищення енергетичної ефективності функціонування тягового електропривода автономного транспортного засобу. В основній частині роботи запропоновано рекомендації щодо вибору варіанта компонування тягової системи транспортного засобу для підвищення його енергоефективності. Запропоновано методику визначення та розрахунку параметрів основних компонентів ОППН тягового привода електромобіля та надано рекомендації щодо проектування системи управління багатоканальних перетворювачів постійної напруги. Розроблена математична модель тягового електрообладнання електромобіля на базі синхронного електродвигуна з постійними магнітами (СДПМ) та ОППН, інтегрованого в силове коло з метою підвищення напруги тягового джерела струму. Запропонована модель двонаправленого перетворювача постійної напруги в складі силової установки електромобіля в середовищі ППП Matlab Simulink.

Графічна частина складається з 16 плакатів із результатами роботи.

В розділі охорони праці визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

Ключові слова: електромобіль, електропривод, тяговий двигун, система керування, режими роботи, моделювання, математична модель, алгоритм.

ABSTRACT

Shestopal V.P. Increasing the energy efficiency of the traction electric drive of an autonomous vehicle. Master's thesis in the specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, educational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2024. – 121 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 31 titles; fig.: 43; tabl. 11.

In the master's qualification work, solutions were proposed to increase the energy efficiency of the traction electric drive of an autonomous vehicle. In the main part of the work, recommendations were proposed for choosing a layout option for the vehicle's traction system to increase its energy efficiency. A method for determining and calculating the parameters of the main components of the traction drive of an electric vehicle was proposed and recommendations were given for designing a control system for multi-channel DC converters. A mathematical model of the traction electrical equipment of an electric vehicle was developed based on a synchronous permanent magnet electric motor (PMEM) and a DC converter integrated into a power circuit in order to increase the voltage of the traction current source. A model of a bidirectional DC converter as part of the power plant of an electric vehicle was proposed in the Matlab Simulink software environment.

The graphic part consists of 16 posters with the results of the work.

The labor protection section defines the main provisions for the safe operation of the studied electrical complex under the influence of harmful environmental factors.

Keywords: electric vehicle, electric drive, traction motor, control system, operating modes, modeling, mathematical model, algorithm.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	9
1.1 Актуальність питання підвищення енергетичної ефективності.....	9
1.2 Аналіз варіантів компоновок тягової системи автономного транспортного засобу.....	17
1.3 Вимоги та критерії побудови транспортного засобу з тяговим електроприводом.....	23
1.4 Висновок	26
2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ.....	27
2.1 Визначення параметрів та вимог до прямого перетворювача напруги тягового електропривода.....	27
2.2 Методика розрахунку потужності тягового електропривода електромобіля.....	29
2.3 Висновок.....	33
3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ	32
3.1 Математична модель синхронного електродвигуна з постійними магнітами	33
3.2 Математична модель системи керування із СДПМ	35
3.3 Векторна широтно-імпульсна модуляція.....	38
3.4 Висновок.....	40
4 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ.....	41

4.1 Аналіз динамічних характеристик тягового двигуна при підвищенні напруги джерела.....	41
4.2 Застосування двонаправленого перетворювача напруги в системі електропривода автономного транспортного засобу	43
4.3 Обґрунтування та вибір структури перетворювача постійної напруги	45
4.4 Визначення та деталізація параметрів ОППН в складі системи електропривода транспортного засобу.....	51
4.5 Вибір силових напівпровідникових ключів.....	55
4.6 Система керування ключами перетворювача.....	58
4.7 Висновок.....	62
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОНАПРАВЛЕНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ТЯГОВОГО ПРИВОДА АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ.....	63
5.1 Висновок.....	71
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	72
7 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	80
ВИСНОВКИ.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	91
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	96
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	97

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Перехід до електричних транспортних засобів (ТЗ) – одна з основних тенденцій сучасності. Активність у цьому напрямі пов'язана із прагненням зробити внесок у боротьбу з проблемами забруднення природи, обмеженості викопних ресурсів, доставки товарів з логістичних центрів до споживачів у великих населених пунктах із завантаженим автомобільним рухом, оптимізації логістичних процесів на підприємствах [1].

Увага до вирішення зазначених проблем відображена у стратегічних документах комерційних та державних автопідприємств. Volkswagen вкладає мільярди євро для створення екологічно чистих автомобілів із електричними або гібридними енергоустановками. Запланована частка електромобілів у загальних продажах - 60% до 2030 [2]. Nissan має на меті продавати щорічно один мільйон гібридних і повністю електричних автомобілів в рамках програми розвитку "MOVE-to-2022" [3]. А компанія Tesla, світовий лідер індустрії електромобілів, випустила на ринок 1.31 мільйона автомобілів у 2022 році, що становить майже 300% зростання щодо продажів 2020 року [4, 5].

Зростання промислового виробництва та збільшення його обсягу неминуче тягне у себе використання автоматизованих систем і роботизованих, зокрема транспортних, комплексів. При експлуатації транспортних засобів (ТЗ) у закритих приміщеннях краща відмова від двигунів внутрішнього згоряння з метою зниження шкідливого впливу вихлопних газів на здоров'я працівників. У зв'язку з цим все більше ТЗ для використання на підприємствах випускається з електричними двигунами.

Одним із етапів у розвитку систем автоматизації є застосування автономних транспортних засобів з електричним приводом. Відповідно до класифікації SAE International (Society of Automotive Engineers International) виділяють наступні шість основних рівнів автономності для просунутих систем допомоги при водінні (ADAS – Advanced Driver Assistance System):

від 0 (ручне управління з попередженнями про небезпеку) до 5 (повністю безпілотне керування без участі) людини). Загальноприйнятий рівень автономності автомобільного транспорту – третій чи четвертий, тоді як виробничий транспорт прагнуть зробити повністю автономним.

Для визначення оптимального керування автономним транспортним засобом використовуються такі критерії: мінімальна витрата енергії та мінімальна довжина шляху від початкової точки до кінцевої на безпечному віддаленні від об'єктів навколишнього середовища. Працюючи у середовищі, що з людьми, найважливішим чинником є безпека. Тому спочатку обчислюється безпечна траєкторія, а потім відбувається відпрацювання бажаного руху з мінімальним споживанням енергії.

З поширенням електричних ТЗ зростає актуальність проблеми підвищення енергоефективності електроприводів. Важливу роль відіграє вибір системи живлення. Безконтактне підведення енергії від лінії живлення до електричного ТЗ є одним з найбільш перспективних способів забезпечення його енергетичної автономності. Зокрема, великий інтерес викликає спосіб передачі з використанням електромагнітної індукції.

Об'єкт дослідження є система тягового електроприводу автономного транспортного засобу з акумуляторним джерелом живлення.

Предметом дослідження є математичні моделі та структури, алгоритми керування тяговим електроприводом, які дозволяють підвищити ефективність електропривода автономного транспортного засобу з акумуляторним джерелом живлення.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності підвищення енергетичної ефективності системи тягового електроприводу автономного транспортного засобу з акумуляторним джерелом живлення за рахунок раціонального вибору компонування тягової системи та використання сучасних алгоритмів керування.

В процесі реалізації мети роботи необхідно виконати такі **завдання**:

- Проаналізувати варіанти компонування тягової системи автономного

транспортного засобу та існуючі методи та засоби підвищення його енергоефективності.

- Запропонувати методику визначення та розрахунку параметрів основних компонентів ОППН тягового привода електромобіля та надати рекомендації щодо проектування системи управління багатоканальних перетворювачів постійної напруги.

3. Розробити математичну модель тягового електрообладнання електромобіля на базі синхронного електродвигуна з постійними магнітами (СДПМ) та ОППН, інтегрованого в силове коло з метою підвищення напруги тягового джерела струму.

- Дослідити підвищення ефективності електропривода і поліпшення масогабаритних показників електричного транспортного засобу із застосуванням перетворювача постійної напруги.

- Запропонувати модель двонаправленого перетворювача постійної напруги в складі силової установки електромобіля в середовищі ППП Matlab Simulink.

- виконати техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропривода та обґрунтувати правильність виконання досліджень та економічну доцільність впровадження технічних рішень;

- визначити основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

Методи дослідження засновані на використанні методів теорії автоматичного керування, методи електромеханічного перетворення енергії, математичного моделювання та інших системних методів; методи графічного середовища імітаційного моделювання ППП MatLab Simulink для побудови енергетичних систем, а також програми інженерного розрахунку для складання таблиць, діаграм і обчислення функцій ППП MathCad та Microsoft Excel.

Наукова новизна одержаних результатів:

- визначено раціональну структуру та схему зворотного перетворювача постійної напруги (ЗППН) для електроприводів електромобілів, розроблено методику визначення та розрахунку параметрів основних компонентів ЗППН для системи тягового електропривода електромобіля.

Практичне значення одержаних у роботі результатів полягає в наступному:

- результати отриманих досліджень можуть бути використані в задачах проектування та оптимізації режимів роботи тягових електроприводів транспортних засобів;

- результати комп'ютерного моделювання розробленої імітаційної моделі електромобіля із застосуванням ОППН дозволяють здійснювати детальний аналіз характеристик електромобіля з метою подальшої технічної реалізації;

- розрахункові результати досліджень можуть бути використанні під час вивчення фахових дисциплін освітньої кваліфікаційної програми «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод».

Особистий внесок здобувача. Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи отримано автором самостійно.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції.

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій:

- Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода автономного транспортного засобу / В.П. Шестопап, В.С. Бомбик, О.А. Паянок – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)», [Електронний ресурс]. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/schedConf/presentations>,

– Вінниця : ВНТУ, 2021. – 3 с.

1 АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

1.1 Актуальність питання підвищення енергетичної ефективності

Продаж електричного транспорту зростає з кожним роком. У 2022 році на світовому ринку було продано понад 10 млн електромобілів, включаючи як чисто електричні, так і гібридні ТЗ з можливістю підзарядки від електричної мережі [1-2]. Цей показник на 55% перевищує кількість проданих одиниць техніки у 2021 році. Згідно з прогнозами у 2023 році продажі збільшаться ще на 35% і становитимуть 14 млн штук. Найбільшими ринками електромобілів є Китай, Європа та США. На їхню частку припадає 95% всіх проданих авто у 2022 році. Найбільшим споживачем електротранспорту є Китай, де на даний момент в експлуатації знаходиться 13,8 млн. одиниць техніки (рисунок 1.1). У Росії 2022 року було продано 2998 електричних транспортних засобів, що у 33% більше, ніж у 2021 [3]. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства, кількість експлуатованих електричних МС у світі до 2030 року досягне 145 млн. штук [4].

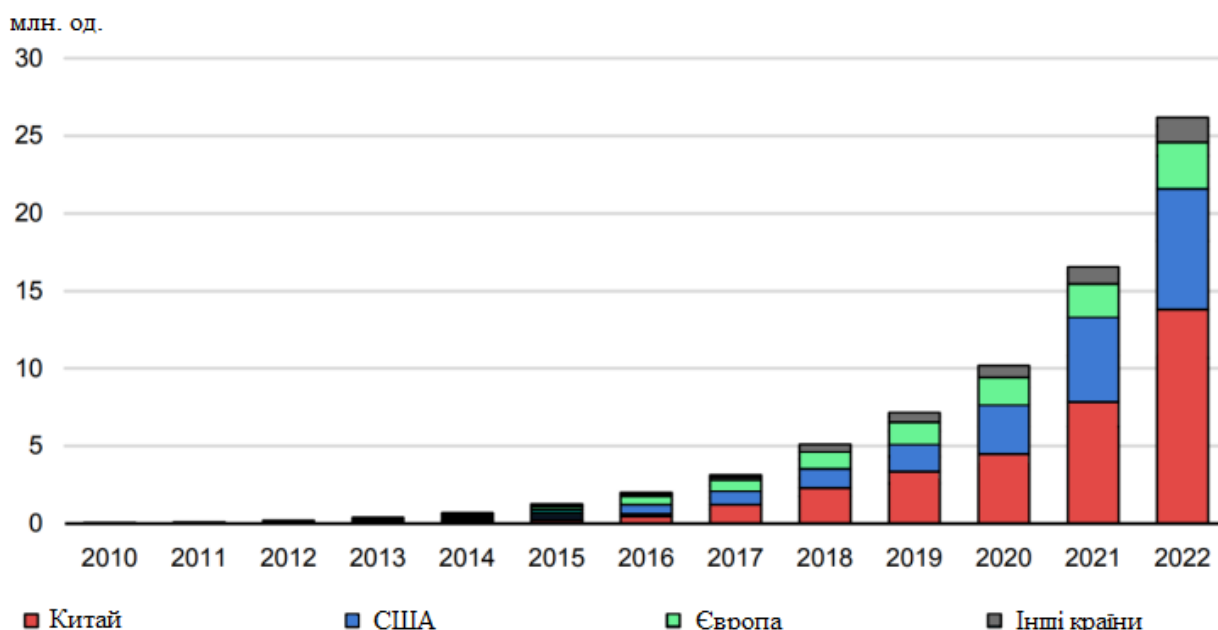


Рисунок 1.1 – Кількість експлуатованих електромобілів у світі [2]

Стрімкі темпи зростання продажів електромобілів на російському та світовому ринках свідчать про те, що на даний продукт є попит серед споживачів. За цим слідує величезний інтерес з боку вчених та інженерів щодо вдосконалення характеристик машин, що випускаються.

Робота, проведена експертною групою Інституту транспортних досліджень США [5], показала, що для користувачів однією з найважливіших вимог до електричного транспортного засобу є наявність великого запасу ходу. Підвищення дальності пробігу значно спрощує планування поїздок працювати, додому чи за покупками.

Інше дослідження, проведене в Європі, встановило, що 30% європейських споживачів, які замислюються над купівлею електромобіля, хотіли б, щоб його зарядка відбувалася не більше одного разу на добу і тривала не більше шести годин.

Таким чином, однією з основних вимог до характеристик електротранспорту є великий запас ходу.

Крім інших методів, збільшення дальності пробігу можна досягти за допомогою підвищення енергетичної ефективності транспорту.

Одним із способів підвищення енергоефективності є застосування рекуперативного гальмування. Суть процесу полягає в тому, що частина кінетичної енергії, якою володіє машина, що рухається, при гальмуванні перетворюється на електричну і запасається в акумуляторній батареї (АБ). Це досягається за рахунок того, що тяговий електродвигун, працюючи в генераторному режимі, створює гальмівний момент, тим самим виробляючи електричну енергію. За рахунок рекуперативного гальмування вдається від 8% до 25% від загальної витраченої енергії [6]. У роботі [7] пропонується вдосконалена система управління рекуперацією енергії гальмування, що ґрунтується на алгоритмі нечіткої логіки. Ця система визначає оптимальний процес рекуперативного гальмування залежно від температури акумуляторної батареї, величини поточного заряду батареї, швидкості автомобіля та зусилля натискання на гальмо педаль. За рахунок застосування

даного алгоритму управління рекуперацією вдалося досягти збільшення енергоефективності на 22%, що в умовах реального експерименту виявилось у збільшенні пройденої відстані електромобілем з 163 до 205 км на одному заряді.

Вибір типу АБ є непростим зважаючи на те, що необхідно задовольнити вимоги, пов'язані з дальністю автономного ходу, прискоренням, швидкою зарядкою, терміном служби, маси. Акумуляторні батареї повинні поєднувати високу потужність, а також високу питому енергоємність. Для забезпечення цих вимог пропонується використання гібридної АБ, що складається із батарей двох типів [8]. Літій-нікель-марганець-кобальт-оксидний акумулятор має високу питому ємність, а літій-титанатний акумулятор забезпечує високу щільність струму. Результати дослідження показали високу ефективність гібридного блоку акумуляторів, авторам роботи також вдалося досягти збільшення терміну служби батареї та швидкості її заряджання.

Іншим вузлом електромобіля, за рахунок вдосконалення якого можна досягти збільшення енергоефективності, є електричний тяговий двигун. Існує безліч різних типів електродвигунів, що відрізняються конструкцією та типом магнітного поля.

В роботі [9] проводиться дослідження, яке спрямоване на виявлення найбільш оптимальних параметрів: числа пазів, полюсів, індуктивності, осьової довжини та числа витків статора для обмотки для синхронних двигунів з постійними магнітами. Результати дослідження показали, що збільшення кількості полюсів електричного двигуна, що досліджується, дозволяє знизити енергоспоживання на 13,3%. Діяльність [10] проводиться дослідження комбінацій розташування постійних магнітів лежить на поверхні ротора. Внесення змін до звичної конструкції ротора, що полягає в додаванні бар'єрів магнітного потоку (рисунок 1.2 г), що перешкоджають гармонійному магнітному полю, призвело до збільшення крутного моменту і

зниження втрат на вихрові струми, що дозволило збільшити енергоефективність машини на 5%.

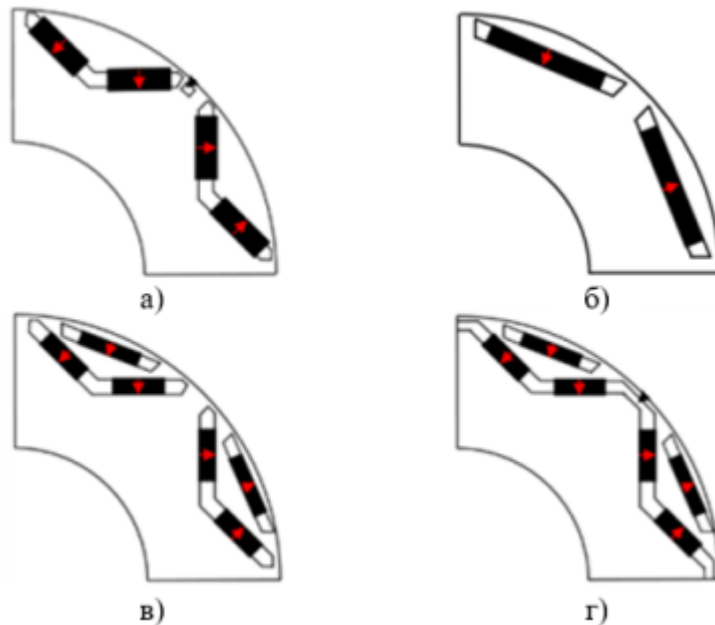


Рисунок 1.2 – Варіанти розташування постійних магнітів ротора
(а – V-подібне розташування; б – тангенціальне розташування;
в – дельтоподібне розташування; г – дельтоподібне розташування з бар'єрами
магнітного потоку)

У сучасних електричних ТЗ на борту встановлено безліч систем, що підвищують комфорт та безпеку водія та пасажирів. До таких систем відносять системи активної та пасивної безпеки, систему опалення, вентиляції та кондиціювання повітря, освітлення, індикація, мультимедійна система та ін. На даний момент в електромобілях дані системи ніяк не пов'язані між собою, кожна з них має власну систему управління, а живлення отримує від бортового джерела живлення. У роботі [14] пропонується використовувати контролер, що ґрунтується на нечіткій логіці, для централізованого управління всіма бортовими системами. Даний контролер реалізований як єдиний інтерфейсний пристрій мультимедійним екраном, з яким взаємодіє водій. Сигнали та запити аналізуються контролером на основі стану акумуляторної батареї та важливості запиту. У порівнянні з

децентралізованим керуванням бортовими системами запропоноване централізоване керування дозволяє заощадити до 15% споживаної енергії.

Алгоритми керування автономними транспортними засобами з використанням нечіткої логіки та нейронних мереж.

Більшість об'єктів управління в сучасній промисловості та техніці є складними нелінійними системами, до динамічних характеристик яких пред'являються високі вимоги. Застосовуючи стандартні методи теорії автоматичного управління, який завжди вдається задовольнити ці вимоги, оскільки математичні моделі даних об'єктів управління який завжди є досить точними, і навіть мають ряд припущень, які внутрішні параметри можуть змінюватися під час роботи.

Останніми роками дедалі більше застосування знаходить нове напрям у регулюванні координат електроприводу — нейромережевые регулятори, що базуються на понятті штучної нейронної мережі (ШНМ) [17]. Математичні моделі ШНМ засновані за принципом, схожим із роботою мереж нервових клітин живих організмів. Цей підхід дозволяє успішно вирішувати завдання прогнозування, розпізнавання образів, управління та інших. [18]. Перевагою нейронних мереж перед традиційними алгоритмами управління є їхнє навчання. ШНМ не програмуються звичним способом, а навчаються на основі аналізу вхідних та вихідних даних. При успішному навчанні ШНМ може передбачити правильний результат, незважаючи на відсутність деяких даних у навчальній вибірці, а також при неповних або частково спотворених даних.

Виділяється різні типи навчання нейронних мереж [14]: 1. Навчання з учителем. 2. Навчання без учителя. 3. Комбіноване навчання, що поєднує в собі принципи навчань з учителем та без. 4. Навчання із підкріпленням. У роботі використовуються методи навчання з учителем і з підкріпленням.

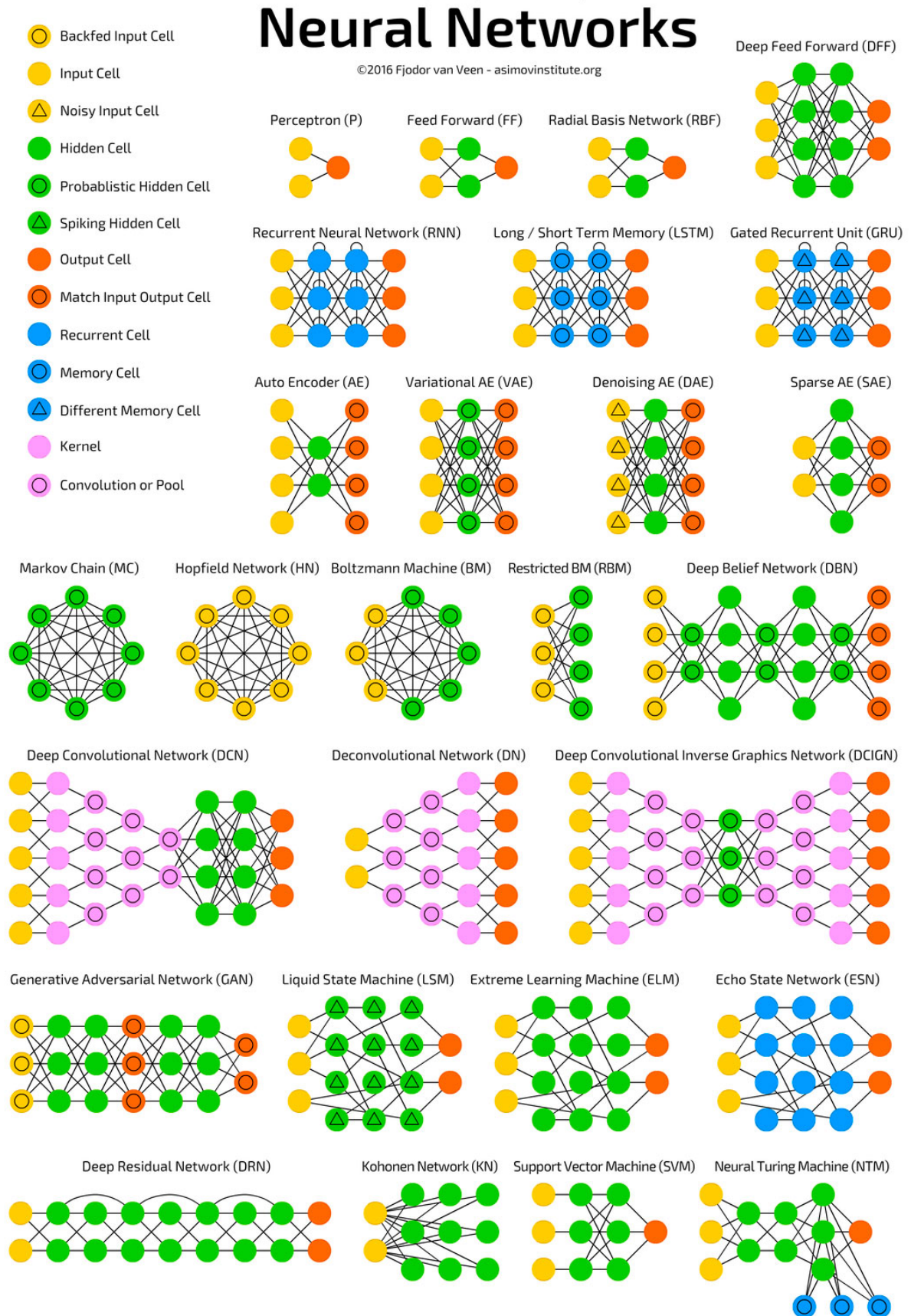


Рисунок 1.3 – Архітектури та типи неймереж

Суть методу навчання з учителем полягає у тренуванні ШНМ на основі двох наборів даних: вхідному та цільовому. Кожному рядку вхідних даних відповідає певне цільове значення, визначене під час попередньої розмітки. Для навчання нейронної мережі необхідно надати безліч прикладів розмічених наборів даних. У процесі навчання алгоритм намагається знайти найбільш підходящий набір ваг для кожного вузла мережі, щоб мінімізувати помилку між прогнозами та реальними значеннями міток.

Процес навчання нейронної мережі з учителем включає такі кроки:

1. Підготовка навчальних даних. Кожному вхідному набору даних має відповідати певне значення на виході. Наприклад, якщо необхідно за величинами струму і напруги визначити споживану потужність електричної машини, в тренувальному наборі необхідно провести підготовку даних струм, напруга - потужність.

2. Вибір архітектури нейромережі: потрібно вибрати архітектуру нейронної мережі залежно від завдання. Наприклад, для завдань класифікації можна використовувати багатошаровий перцептрон, а для задач регресії – рекурентну нейронну мережу.

3. Навчання нейромережі: після підготовки даних та вибору архітектури, починається процес навчання нейронної мережі. Для цього використовуються алгоритми зворотного розповсюдження помилки, що дозволяють оптимізувати ваги вузлів мережі.

4. Оцінка продуктивності: після завершення навчання нейронна мережа повинна бути оцінена на тестових даних (дані, які не були проаналізовані алгоритмом у процесі навчання). Це дозволяє оцінити її продуктивність і визначити, наскільки добре вона справляється із завданням, яке ми намагаємося вирішити.

5. Оновлення параметрів: якщо продуктивність нейронної мережі на тестових даних низька, то параметри нейромережі (ваги вузлів) можуть бути оновлені для покращення її роботи. Рекомендується зупинити процес тренування вчасно, щоб уникнути ефекту перенавчання - ситуації, коли ваги

нейронної мережі підбираються таким чином, що математична модель хіба що заучує відповіді з тренувального набору і втрачає здатність до генералізації, даючи некоректні прогнози на нових наборах даних. Загалом навчання нейронної мережі з учителем — це процес, який потребує великого обсягу даних та обчислювальних ресурсів, але при правильному підході може призвести до створення ефективних алгоритмів машинного навчання.

На рисунку 1.4 та 1.5 приведені приклади налаштування системи керування автономного транспортного засобу методом ітераційного моделювання у два етапи: грубе налаштування за допомогою редагування правил; тонка настройка за допомогою зміни параметрів функцій приналежності. Критерієм налаштування є мінімізація витрати енергії під час руху транспортного засобу.

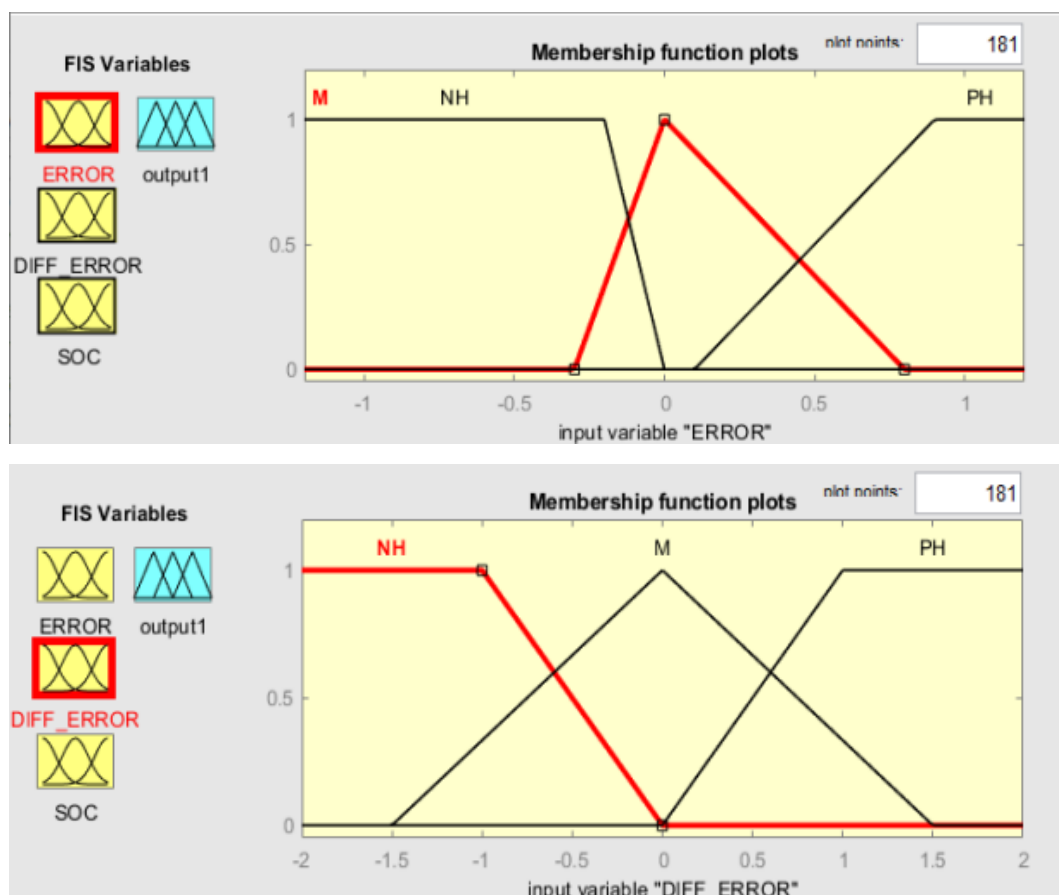


Рисунок 1.4 – Функція належності помилки та її похідної

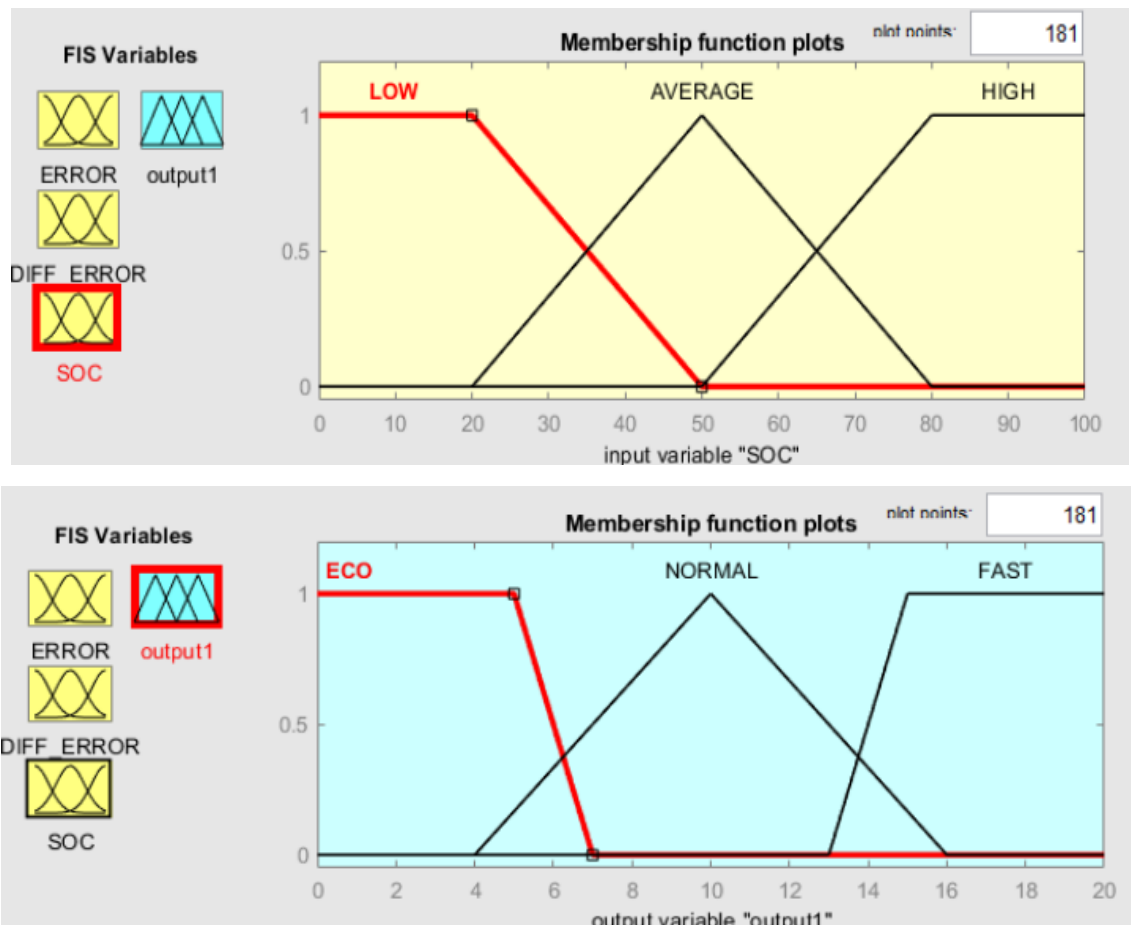


Рисунок 1.5 – Функція належності залишкового заряду АКБ та виходу нечіткого регулятора

1.2 Аналіз варіантів компоновок тягової системи автономного транспортного засобу

В останні роки електричні автономні транспортні засоби стали однією з найшвидше розвиваючихся технологій. Їх використання може стати ефективним рішенням для збереження енергії та зменшення шкоди навколишньому середовищу, що спричиняється двигунами внутрішнього згоряння. Сьогодні розробка електричних автомобілів досягла нового рівня, однак висока вартість і обмежений запас автономного ходу залишаються основними труднощами. Збільшення дальності ходу електричних транспортних засобів досягається різними методами. Одним з найбільш поширених є додавання додаткових акумуляторних батарей до силової системи транспортного засобу. Однак це призводить до зростання вартості та

збільшення габаритів. Іншим варіантом є використання сучасних систем управління силовою схемою, відомий як апаратний метод, але цей підхід має свої недоліки, зокрема складність реалізації та інтеграції додаткових компонентів у електричну частину транспорту.

Інженери та науковці постійно вдосконалюють технології виготовлення електричних машин, акумуляторних батарей і напівпровідникових елементів, з метою створення енергоефективних варіантів компонування тягових систем для електричних безрейкових транспортних засобів. Масове виробництво електромобілів провідними автомобільними компаніями дозволило знизити їхню ринкову вартість, що зробило електричні транспортні засоби доступнішими для споживачів і стало чудовою альтернативою автомобілям з двигунами внутрішнього згоряння. Основною перевагою електромобілів є їх здатність до нульових викидів, що робить їх екологічно чистими. У порівнянні зі звичайними авто, електричні машини відзначаються високою енергоефективністю. Тому багато автомобільних компаній активно працюють над виробництвом гібридних та електричних транспортних засобів.

Окрім міських транспортних систем та автомобілів загального користування, електротранспорт також активно використовується в якості транспортних засобів для виробничих приміщень. Електрокари та навантажувачі набирають все більшої популярності у всьому світі, особливо в закритих складських приміщеннях, де використання традиційного транспорту з двигунами внутрішнього згоряння є неможливим.

Більшість автономних електричних транспортних засобів проектується з використанням кількох основних компонентів: електричного двигуна, системи зберігання енергії та перетворювальної техніки. Вони забезпечують необхідну динаміку та високу автономність транспорту. Залежно від розташування електричного двигуна, розрізняють два основних варіанти компонування: централізований привід та розподілений привід, що включає кілька електродвигунів. Електротранспорт з централізованим приводом, приклад якого наведено на рисунку 1.6, за конструкцією нагадує класичні

транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння. Така система реалізується шляхом незначних змін у компонованні традиційного транспорту, зокрема заміною двигуна внутрішнього згоряння на електричний двигун і бензобака на систему зберігання електроенергії.

На рисунку 1.6: 1 – система накопичення енергії; 2 – електричний двигун; 3 – зчеплення; 4 – редуктор; 5 – диференціал.

Трансмсія електромобіля з централізованим приводом має 2-3 передачі, де зчеплення виконує функцію відключення потужності та зменшення удару під час перемикавання передач. Така система зберігає в своєму складі значну кількість механічних компонентів, таких як редуктор, диференціал та карданний вал, що збільшує загальну масу транспортного засобу. Це, в свою чергу, призводить до неефективного використання електричної енергії.

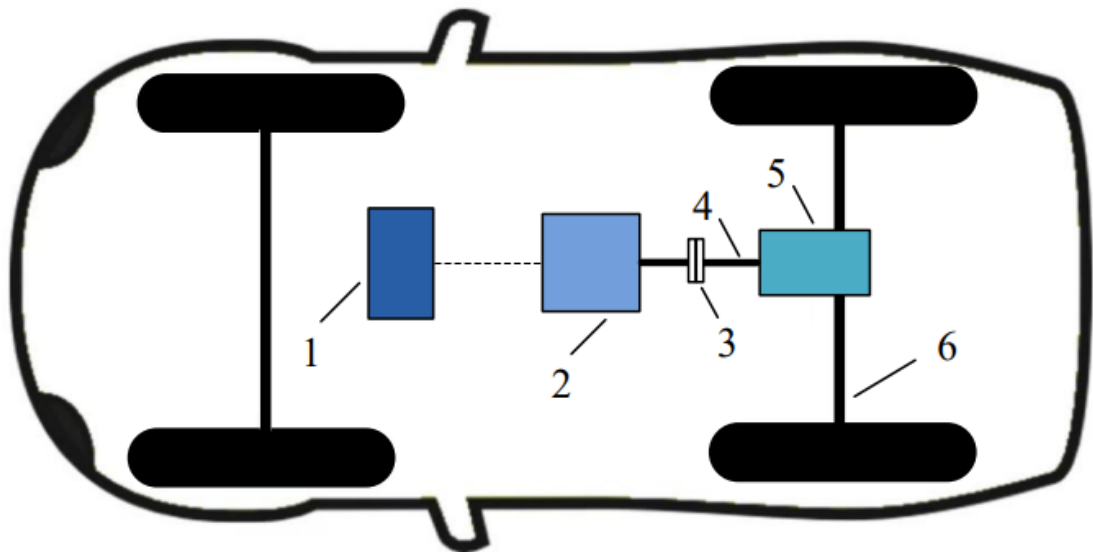


Рисунок 1.6 – Розташування тягової системи в автономному електричному транспортному засобі з централізованим приводом

Представлену вище систему з централізованим приводом можна покращити, усунувши зчеплення та замінивши його редуктором з фіксованим передавальним числом, який з'єднаний безпосередньо з електродвигуном.

Використання такого рішення, як показано на рисунку 1.7, дозволяє знизити масу транспортного засобу.

На рисунку 1.7 зображено таку компоновку тягової системи електромобіля:

- 1 – система накопичення енергії;
- 2 – електричний двигун;
- 3 – редуктор з фіксованим передавальним числом;
- 4 – диференціал.

Ця схема дозволяє оптимізувати конструкцію транспортного засобу, зменшивши його масу та підвищивши ефективність використання електричної енергії.

Хоча така конструкція покращує характеристики автономного транспортного засобу, вона все ще містить багато механічних вузлів, що зберігає основний недолік системи з централізованим приводом — збільшення маси та складності компоновки. Це може призводити до нераціональної витрати енергії та зниження загальної ефективності системи.

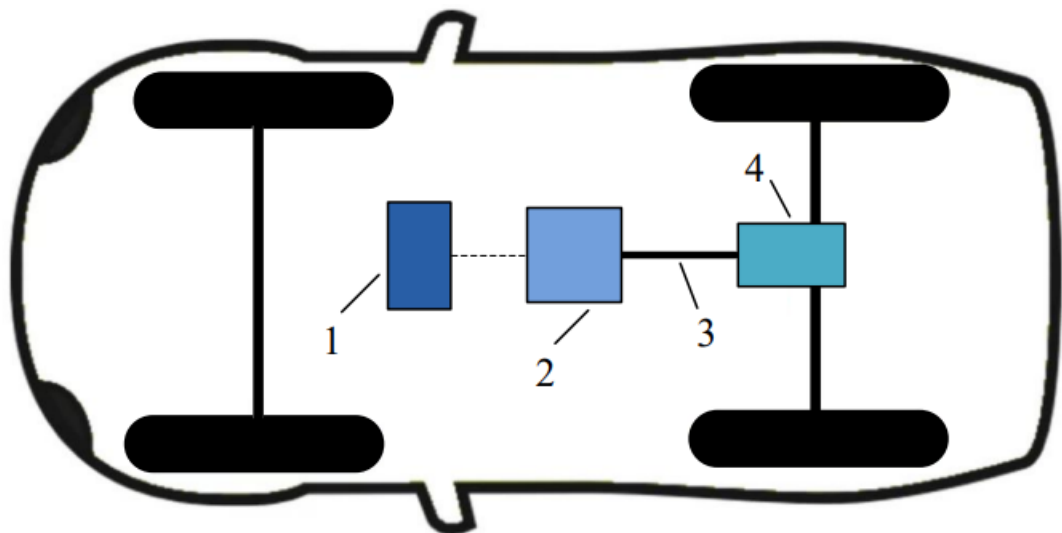


Рисунок 1.7 – Розташування тягової системи в автономному електричному транспортному засобі з централізованим приводом без зчеплення

Пряме підключення електродвигуна до осьового диференціала, як показано на рисунку 1.8, дозволяє обійтися без редуктора, що сприяє зменшенню загальної маси конструкції транспортного засобу.

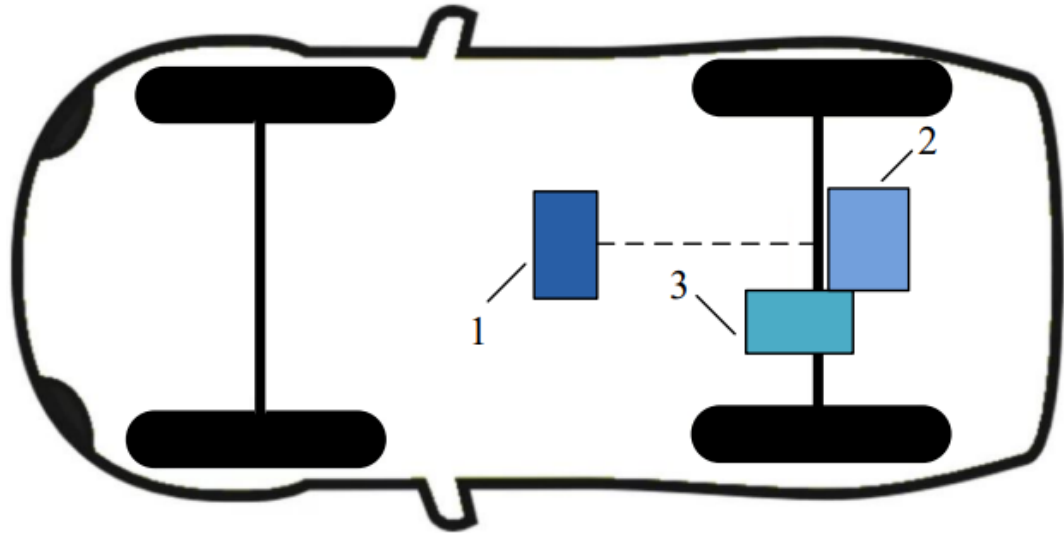


Рисунок 1.8 – Розташування тягової системи в автономному електричному транспортному засобі, підключеному до осьового диференціалу

На рисунку 1.8: 1 – система накопичення енергії; 2 – електричний двигун; 3 – диференціал.

Таке компонування також відкриває можливість створення системи з розподіленим приводом шляхом підключення другого електродвигуна до іншої осі. Однак для реалізації такої тягової системи потрібен вибір тихохідного тягового електродвигуна, що спричиняє проблему забезпечення достатнього запасу потужності для швидкого старту.

Як вже згадувалося, створення тягової системи транспортного засобу з розподіленим приводом передбачає використання кількох електродвигунів. Потужність передається безпосередньо до відповідного колеса завдяки розташуванню двигунів поблизу колеса або ободу, що значно зменшує енергетичні втрати на передачу. Одним із прикладів такої системи є мотор-колеса, в яких електродвигун інтегрований прямо у колесо (рисунок 1.7).

На рисунку 1.9: 1 – система накопичення енергії; 2 – мотор-колеса.

Мотор-колеса, крім електродвигуна, обладнуються гальмівною системою та елементами підвіски. Використання мотор-колiс у тяговій системі дозволяє повністю виключити такі механічні компоненти, як зчеплення, редуктор, диференціал і піввісі, що зменшує кількість тертьових деталей і підвищує надійність конструкції. Серед інших переваг мотор-колiс варто відзначити економію простору, що дозволяє розміщувати додаткове обладнання, збільшувати кількість акумуляторних батарей у системі накопичення енергії або зберігати більше місця для пасажирів. Незалежне керування моментом і швидкістю обертання кожного колеса забезпечує можливість їхнього обертання з різною частотою і навіть у різних напрямках, що значно покращує динамічні характеристики транспортного засобу.

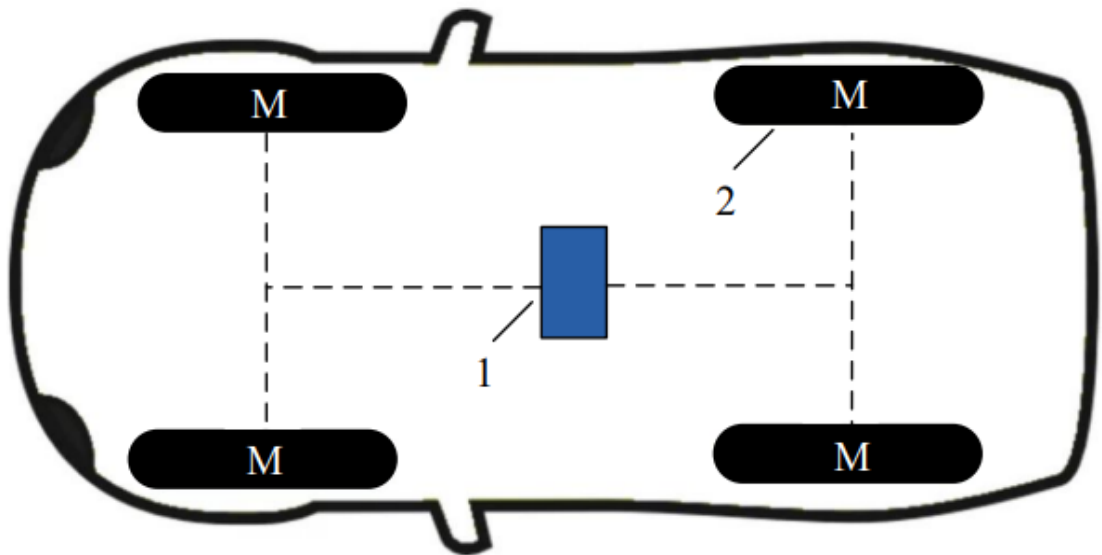


Рисунок 1.9 – Розташування тягової системи в автономному електричному транспортному засобі з мотор-колесами

Сьогодні автомобілі з мотор-колесами розробляються багатьма виробниками, зокрема для експлуатації в умовах бездоріжжя. Однак одним із недоліків такої системи є велика безпружинна маса, яка спричиняє підвищений знос підвіски та передає більше вібрацій на кузов.

Для усунення передавальних механізмів у конструкції мотор-колес використовується пряме з'єднання валу електродвигуна безпосередньо з

колесом. У цьому випадку номінальні характеристики руху транспортного засобу можуть бути забезпечені електродвигунами з постійними магнітами та осьовим магнітним потоком. Проте виготовлення таких електродвигунів є дорожчим у порівнянні зі стандартними двигунами з радіальним магнітним потоком [9].

Використання багатоступінчастої механічної трансмісії дає змогу досягти необхідних динамічних характеристик системи в межах номінальних параметрів електродвигуна. Проте слід зауважити, що розробка, експлуатація та технічне обслуговування таких механізмів є трудомісткими та потребують значних ресурсів через велику кількість механічних вузлів.

Конструкція мотор-колеса передбачає застосування одноступінчастого передавального механізму без можливості зміни передавального числа. Це рішення вважається найбільш ефективним, оскільки його кінцева вартість і витрати на обслуговування значно нижчі порівняно з багатоступінчастими системами. Спрощення механічної частини конструкції обумовлює необхідність значного розширення діапазону регулювання електродвигуна для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик. Таке розширення можливе завдяки послабленню магнітного поля.

1.3 Вимоги та критерії побудови транспортного засобу з тяговим електроприводом

Параметри транспортного засобу мають відповідати таким критеріям:

- Забезпечення необхідного прискорення.
- Можливість долати спуски та підйоми із заданим нахилом і швидкістю.
- Досягнення максимальної швидкості за умов постійної потужності.
- Максимальний запас ходу на одному заряді акумуляторної батареї.

Вихідні характеристики, необхідні тягового двигуна, приведені на рисунку 1.10.

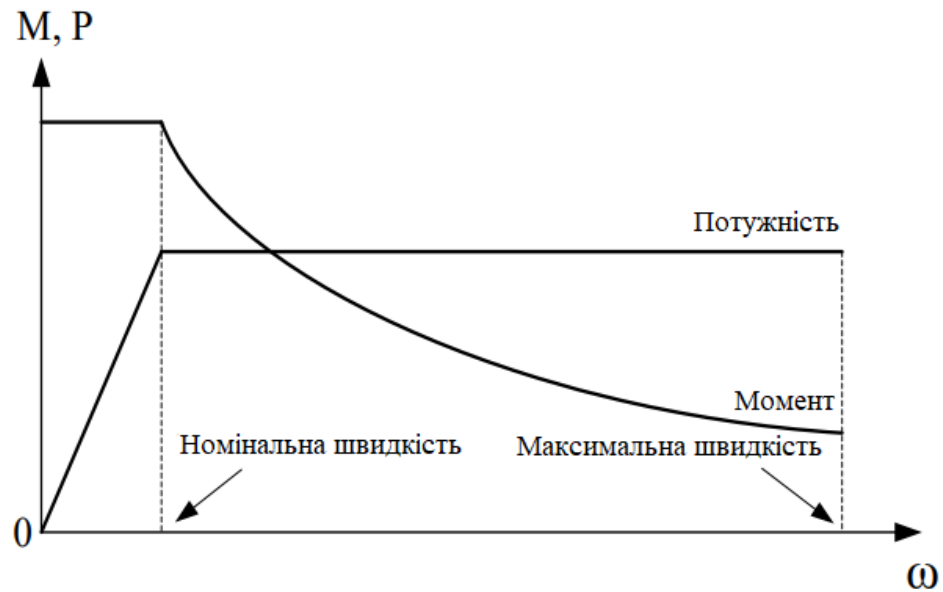


Рисунок 1.10 – Вихідні характеристики тягового двигуна

Аналізуючи характеристики крутного моменту та швидкості, можна зробити висновок, що тяговий двигун повинен забезпечувати високий крутний момент під час пуску та прискорення, а також генерувати значну потужність для стабільної роботи на наступних етапах руху.

На рисунку 1.11 показана характеристика крутного моменту та швидкості тягового двигуна.

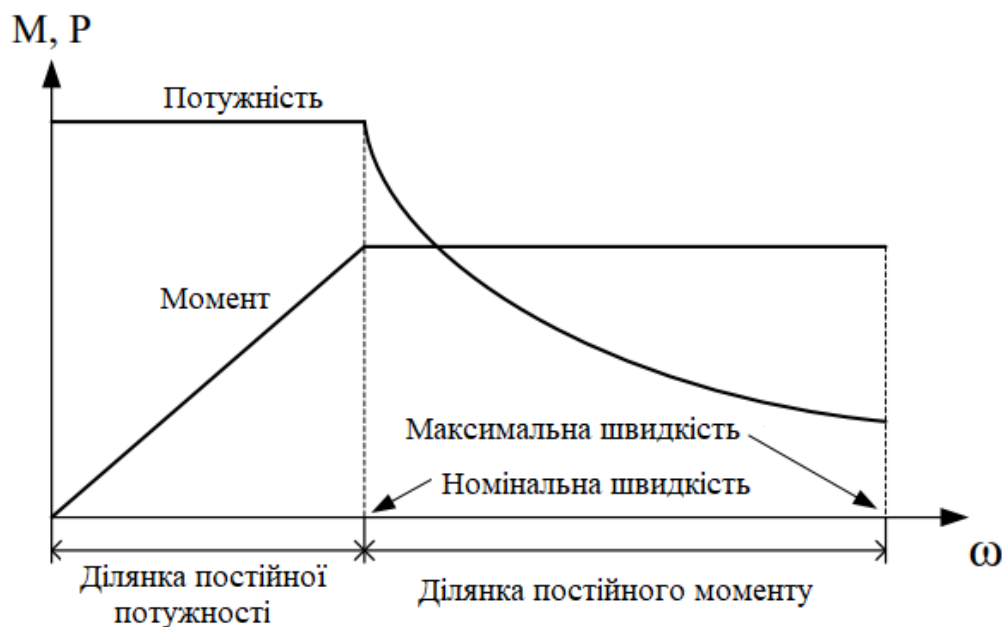


Рисунок 1.11 – Характеристика крутного моменту та швидкості ТД

За нормальних умов експлуатації тяговий двигун підтримує постійний крутний момент у діапазоні від нуля до номінальної частоти обертання. На номінальній частоті двигун досягає своєї максимальної номінальної потужності. Після досягнення номінальної швидкості крутний момент починає зменшуватися пропорційно до зростання швидкості. Робочий режим двигуна в інтервалі від номінальної до максимальної швидкості називається зоною сталості потужності. Розмір цієї зони визначається типом двигуна та застосованими методами керування.

Отже, можна зробити висновок, що у складі мотор-колів доцільно використовувати електродвигуни, які відповідають таким вимогам:

- Забезпечення високого крутного моменту на низьких швидкостях.
- Наявність широкого діапазону регулювання швидкості.
- Високий коефіцієнт питомої потужності.

Для досягнення високих динамічних характеристик основним параметром є маса двигуна, оскільки її зменшення веде до зниження загальної безпружинної маси безрейкового транспортного засобу. Тому співвідношення коефіцієнта корисної дії двигуна до його маси є ключовим критерієм при його виборі.

Електричні двигуни, які відповідають усім вищезазначеним вимогам:

1. асинхронний електродвигун;
2. синхронний двигун із постійними магнітами;
3. безщітковий двигун постійного струму;
4. вентильний реактивний електродвигун.

1.4 Висновок

Розглянуто найпоширеніші варіанти компоновок тягової системи електричних транспортних засобів, і обрано перевагу на користь технології мотор-коліс. Використання мотор-коліс у складі тягової системи повністю усуває необхідність у таких механічних вузлах, як зчеплення, редуктор, диференціал і напіввісі, що дозволяє зменшити кількість деталей та підвищити надійність системи. Однією з інших переваг є економія простору для розміщення додаткового обладнання, збільшення кількості акумуляторних батарей у системі накопичення енергії або забезпечення більшого простору для пасажирів. Незалежне керування моментом і частотою обертання кожного колеса дозволяє мотор-колесам обертатися з різною швидкістю і в різних напрямках, що значно покращує динаміку транспортного засобу.

2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

2.1 Визначення параметрів та вимог до прямого перетворювача напруги тягового електропривода

До компонентів електромобілів, як і до будь-яких інших транспортних засобів, пред'являються вимоги високої надійності безпеки. Тому до прямих перетворювачів напруги (ППН), які використовуються в схемі силового електрообладнання електромобіля також пред'являються аналогічні вимоги при проектуванні та розрахунку. До таких вимог можна віднести такі:

- номінальна вхідна напруга перетворювача повинна відповідати напрузі блоку акумуляторної батареї;
- межі зміни вихідної напруги перетворювача повинні відповідати напрузі на вході трифазного інвертора;
- вихідна напруга перетворювача має бути стабілізованою незалежно від рівня заряду АБ;
- наявність сигнальних попереджень при підвищенні вхідних та вихідних напруг вище максимальної;
- наявність захисту та сигнальних попереджень при коротких замиканнях та перевантаженні;
- наявність системи охолодження (повітряне або рідинне);
- механічні та кліматичні чинники, при яких обернений перетворювач напруги (ОППН) повинен забезпечити безперебійну та надійну роботу;
- по функціональності ППН повинен бути двонаправленим для забезпечення зворотної передачі потужності рекуперації в гальмівних режимах електромобіля [29].

Крім перерахованих вимог система керування багатоканального перетворювача повинна мати можливість відключення будь-якого з паралельно працюючих каналів при коротких замиканнях без відключення інших працюючих перетворювачів. Дана специфічна вимога до ППН

транспортного призначення пред'являється з метою забезпечення безперебійного електропостачання тягового електропривода електромобіля для того, щоб не створювати аварійні ситуації та в цілому з точки зору безпечної та надійної експлуатації.

2.2 Методика розрахунку потужності тягового електропривода електромобіля

З метою вибору інших ключових компонентів електротехнічного комплексу електромобіля, а також сформулювати уявлення щодо характеристик потужності перетворювача, необхідно попередньо виконати тяговий розрахунок. В якості інших ключових вузлів електромобіля розглядаються: силовий трифазний інвертор, трифазний тяговий електродвигун та пакет акумуляторної батареї. Маючи загальні розраховані параметри цих компонентів, які є джерелами живлення та навантаженням для ППН, надалі будуть розраховані параметри перетворювача, в тому числі індуктивної котушки, ключових елементів і т.д.

Для розрахункових досліджень в якості базового електромобіля використовуємо параметри легкового електромобіля з наближеним значенням повної маси 1800 кг.

Таблиця 2.1 – Дані для проведення тягового розрахунку

Параметри	Умовні позначення	Значення параметрів
Маса електромобіля, кг	m_a	1800
Площа поперечного перерізу електромобіля, м ²	S_a	2,2
Коефіцієнт аеродинамічного опору, у.о.	C_x	0,3
Радіус колеса електромобіля, м.	r_k	0,323
ККД механічної трансмісії, у.о.	η_{mm}	0,96
Передаточне число головної передачі, у.о.	i_{zn}	4,3
Передаточне число коробки передач, у.о.	i_{kn}	1,645
Кут нахилу дорожнього полотна, град.	α	0

Тяговий розрахунок складається з рівнянь для розрахунку сил, що перешкоджають руху електромобіля, та сили тяги, що долає ці сили опору. На рисунку 2.1 показані сили, які діють на автомобіль [29].

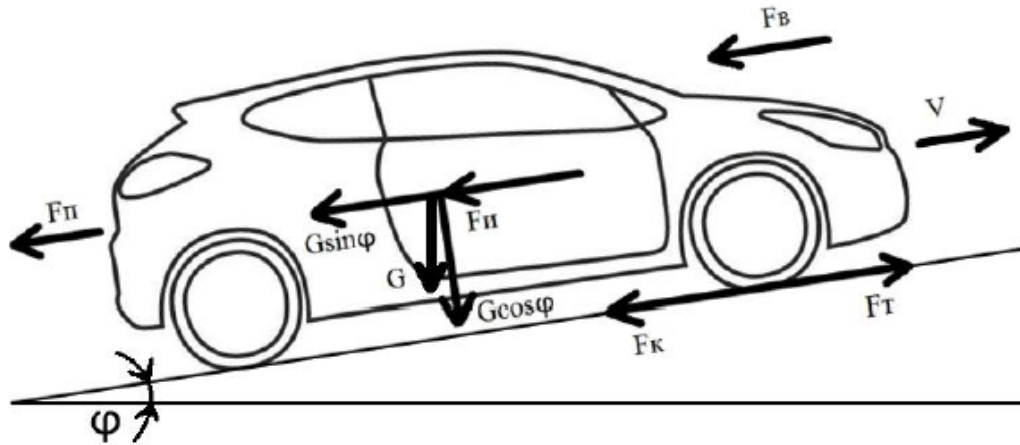


Рисунок 2.1 – Дія сил на електромобіль в русі

Тяговий баланс електромобіля описується наступним рівнянням:

$$F_T = F_{\kappa} + F_{\Pi} + F_{\text{пд}} + F_I, \quad (2.1)$$

де F_T – сила тяги на ведучих колесах, Н;

F_{κ} – сила опору коченню, Н;

F_{Π} – сила опору підйому, Н;

$F_{\text{пд}}$ – сила опору повітря (аеродинамічний опір), Н;

F_I – сила опору інерції, Н.

Сила опору коченню визначається відповідно до рівняння:

$$F_{\kappa} = G \cdot f \cdot \cos \alpha, \quad (2.2)$$

де G – вага електромобіля, кг;

m_a – маса електромобіля, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

f – коефіцієнт опору коченню (для асфальтобетонних дорожніх покриттів $f = 0.012$);

α – кут підйому, $^{\circ}$.

Сила опору підйому визначається відповідно до рівняння:

$$F_{\Pi} = G \cdot f \cdot \sin \alpha, \quad (2.3)$$

Сила опору повітря (аеродинамічного опору) визначається відповідно до рівняння:

$$F_{\text{пов}} = \frac{c_x \rho_B}{2} \cdot V_a^2 \cdot S_a, \quad (2.4)$$

де c_x – коефіцієнт обтічності автомобіля (аеродинамічного опору);

$\rho_B \approx 1,225 \text{ кг/м}^3$ – щільність повітря;

V_a – швидкість автомобіля, м/с;

S_a – площа лобової поверхні, м^2 .

У випадку, якщо параметр S_a невідомий, то для легкових автомобілів $S_a = 0.78 \text{ В}_Г \text{ Н}_Г$, для вантажних автомобілів $S_a = (0,85 \dots 0,9) \text{ В}_Г \text{ Н}_Г$.

Сила опору інерції (опору розгону) визначається відповідно до рівняння:

$$F_i = G \cdot a / g, \quad (2.5)$$

де a – прискорення автомобіля, м/с^2 .

Момент опору, що діє на колесо автомобіля:

$$M_k = F_T \cdot r_k, \quad (2.6)$$

де r_k – радіус колеса автомобіля, м.

Необхідний момент на валу електродвигуна визначається відповідно до рівняння:

$$M_{\text{тр}} = M_k / (i_{\text{кп}} \cdot i_{\text{гп}} \cdot \eta_{\text{мт}}). \quad (2.7)$$

Для розрахунку частоти обертання двигуна можна скористатися рівнянням:

$$n = (V_a \cdot i_{кп} \cdot i_{гп}) \cdot 60 / (2\pi \cdot r_k). \quad (2.8)$$

Необхідна потужність електродвигуна визначається добутком необхідного моменту та частоти обертання:

$$P_{тяг.} = \frac{M_{тр} \cdot n}{9,55}. \quad (2.9)$$

Електродвигун вибирається з умови забезпечення необхідної потужності:

$$P_{дв.} \geq P_{тяг.} \quad (2.10)$$

Отримані в результаті тягового розрахунку електроприводу електромобіля дані, які використовуватимуться для вибору електродвигуна, приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахункові величини електроприводу електромобіля

Параметри	Умовні позначення	Значення параметрів
Сила тяги на ведучих колесах, Н	F_T	4207
Момент опору, що діє на колесо автомобіля, Нм	M_K	1362
Момент опору, що діє на колесо автомобіля, Нм	$M_{ТР}$	193
Частота обертання двигуна, об/хв	n	6000
Необхідна потужність електродвигуна, кВт	$P_{тяг.}$	122

Варто відзначити, що розрахунки були проведені в розрахунку на швидкість автомобіля – 100 км/год., а час розгону для цієї швидкості складає 13 с. Відповідно при даних умовах, прискорення автомобіля складатиме 2.1 м/с².

Методика розрахунку тягового електропривода для вибору електродвигуна необхідної потужності, згідно умови (2.10), є попередньою і для остаточного вибору необхідно перевірити двигун за умовою забезпечення максимального моменту та проводити подальші уточнення при експериментальних дослідженнях.

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ АУТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

3.1 Математична модель синхронного електродвигуна з постійними магнітами

З урахуванням конструктивних особливостей СДПМ, вони мають ряд переваг порівняно з асинхронними двигунами (АД) та синхронними двигунами з обмоткою збудження загальнопромислового виконання. Серед основних переваг СДПМ — оптимальні масогабаритні характеристики порівняно з АД, висока точність і плавність регулювання (особливо при застосуванні векторного методу управління), а також високий коефіцієнт корисної дії. Однак, до недоліків слід віднести більшу вартість двигуна та складність обчислювальних процесів у системі управління.

СДПМ поєднують переваги двигунів постійного струму (ДПС) та асинхронних двигунів (АД), такі як плавність регулювання та надійність конструкції, при цьому позбавлені їхніх недоліків. Зокрема, у цих двигунах відсутній щітково-контактний вузол у роторі, а також частота обертання ротора залишається сталою при зміні навантаження. Такі двигуни мають перевагу в регульованих приводах, де важливими вимогами є високі тягово-енергетичні характеристики та оптимальні масогабаритні показники, наприклад, у приводах електричних і гібридних транспортних засобів.

Використання цифрових систем керування швидкістю СДПМ [12-14] дозволяє значно спростити регулювання швидкості обертання та підвищити швидкодію електродвигуна. Така система управління є ідеальною для умов, коли швидкість часто змінюється, оскільки електропривод електричних транспортних засобів здебільшого працює в перехідних режимах, що включають часті прискорення та гальмування.

Для кращого розуміння фізичних процесів, які відбуваються під час перехідних режимів, а також для формулювання рівнянь, що описують

роботу СДПМ і необхідні для побудови математичної моделі, зробимо кілька припущень, що спрощують це завдання:

- відсутнє насичення магнітного кола;
- повна симетрія обмоток статора;
- індуктивність розсіювання обмоток не залежить від положення ротора;
- відсутній ефект витіснення струму;
- відсутні втрати в сталі [22, 21].

Запишемо систему рівнянь, які описують СДПМ в нерухомій системі координат (d, q), використовуючи рівняння перетворення Парка. У цьому випадку, рівняння, що описують СДПМ в синхронній системі координат (d, q), матимуть вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \psi_{sq} \cdot \omega_e; \\ U_q = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \psi_{sd} \cdot \omega_e; \\ \psi_{sd} = L_{sd} \cdot I_{sd} + \psi_f; \\ \psi_{sq} = L_{sq} \cdot I_{sq}; \\ M_e = \frac{3}{2} Z_p \cdot (\psi_{sd} \cdot I_{sq} - \psi_{sq} \cdot I_{sd}); \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = (M_e - M_c - \beta \cdot \frac{\omega_e}{Z_p}), \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де U_d, U_q, I_{sd}, I_{sq} – складові векторів напруги і струмів в осях d і q;

β – коефіцієнт в'язкого тертя.

ψ_d, ψ_q – потокозчеплення статора по осях d і q.

ψ_f – потокозчеплення, створюване постійними магнітами ротора.

L_d, L_q – індуктивності обмоток статора по осях (d, q).

На рисунку 3.1 приведена структурна схема неявнополюсного СДПМ в осях (d, q). В даному випадку індуктивність обмотки статора є однаковою, як по поздовжній, так і по поперечній осі $L_s = L_d = L_q$.

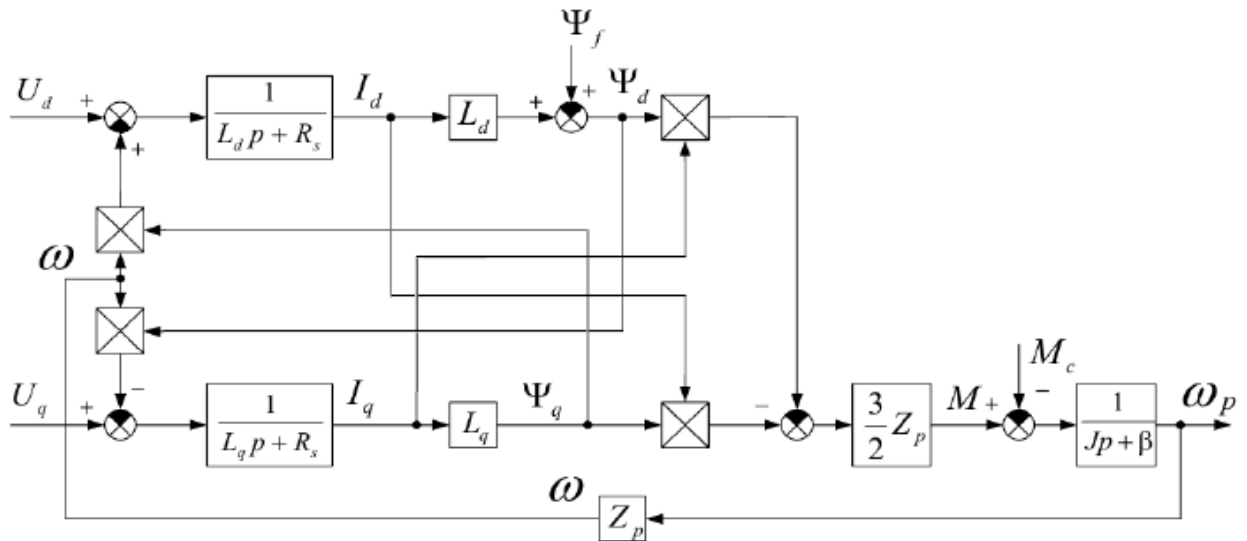


Рисунок 3.1 – Структурна схема СДПМ у вісях (d, q)

Варто зазначити, що структурна схема та математичний опис СДПМ значно простіші, ніж у АД або СДОЗ, завдяки меншій кількості перехресних зв'язків та сталості магнітного потоку, що створюється ротором. Іншим фактором, який спрощує математичну модель СДПМ, є відсутність обмотки на роторі, що робить його подібним до двигуна постійного струму з незалежним збудженням.

Структурна схема, наведена на рисунку, дозволяє створити імітаційну модель СДПМ в середовищі ППП Matlab Simulink. Це дає змогу моделювати та досліджувати динамічні процеси синхронного двигуна, що входить до складу електротехнічного комплексу електромобіля.

3.2 Математична модель системи керування із СДПМ

Векторне керування є методом управління електродвигунами змінного струму (як асинхронними, так і синхронними з постійними магнітами), який не лише формує гармонійні струми та напруги в фазах, а й забезпечує контроль за магнітним потоком електродвигуна. Цей метод управління дозволяє незалежно та майже без інерційно регулювати швидкість обертання ротора та крутний момент на валу двигуна.

Основний принцип векторного керування полягає в регулюванні не тільки величини напруги та її частоти (як у випадку скалярного управління), але й фази [16].

При векторному управлінні електроприводами практично усуваються всі недоліки скалярного методу управління. Перевагами векторного керування в порівнянні зі скалярним є:

1. Незалежне регулювання швидкості та крутного моменту – векторне керування дозволяє здійснювати точне та незалежне регулювання швидкості обертання ротора та крутного моменту на валу, що неможливо в скалярному методі.

2. Вища динамічна характеристика – векторне керування забезпечує більш точну і швидку реакцію системи на зміни навантаження, що дозволяє досягти кращих динамічних характеристик.

3. Підвищена ефективність – завдяки кращому управлінню магнітним потоком векторне керування дозволяє знижувати втрати енергії і забезпечує більш ефективну роботу двигуна.

4. Збереження стабільності роботи при зміні навантаження – векторне керування забезпечує стабільність роботи системи навіть при значних коливаннях навантаження, чого не можна досягти за допомогою скалярного методу.

5. Менша залежність від параметрів двигуна – векторне управління менш чутливе до зміни параметрів двигуна, таких як температура чи знос, що дозволяє забезпечити стабільну роботу в умовах варіативності.

До основних недоліків векторного способу управління швидкістю двигуна можна віднести велику обчислювальну складність в порівнянні з іншими способами [18].

Особливістю системи векторного регулювання є те, що синхронний двигун з постійними магнітами, на відміну від загальнопромислових асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором або синхронних двигунів з обмоткою збудження, живиться переважно від напівпровідникових

перетворювачів (трифазних інверторів). Через це такі двигуни часто називають «вентильними», оскільки перетворювачі використовують вентилі для керування подачею струму до двигуна.

Функціональна схема системи векторного регулювання СДПМ приведена на рисунку 3.2.

Існує кілька типів сенсорів положення ротора, основними з яких є датчики на основі елемента Хола. Вони зазвичай встановлюються на двигуни (в трифазних двигунах їх зазвичай три) і генерують імпульси під час обертання ротора. Цей метод дозволяє отримувати інформацію про положення ротора, але з меншою точністю порівняно з іншими методами.

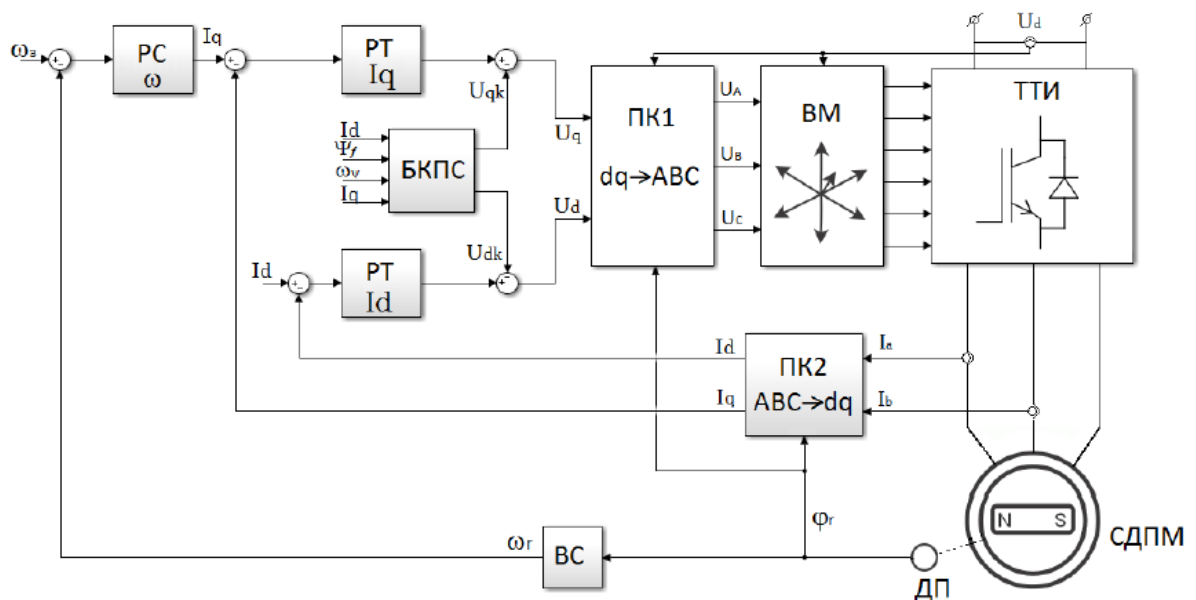


Рисунок 3.2 – Функціональна схема системи векторного керування СДПМ

Іншим типом сенсора положення ротора є абсолютний датчик положення з цифровим інтерфейсом, який дозволяє отримати високоточну інформацію про стан ротора і не має недоліків, характерних для датчиків на основі елементів Холла. Однак цей метод є дорогим і використовується в високоточних електроприводах. Третім способом визначення положення ротора є використання сельсин-датчика (обертового трансформатора), який забезпечує досить точні дані про стан ротора.

3.3 Векторна широтно-імпульсна модуляція

У випадку векторної широтно-імпульсної модуляції (ВШІМ) вектор напруги реалізується за допомогою базових векторів у трифазній системі координат [22]. Базові вектори визначаються певним станом ключів на інверторі, що відображено на схемі заміщення інвертора (рисунок 3.3).

При регулюванні методом векторної ШІМ створюється період модуляції сигналу, під час якого виводи обмоток статора послідовно підключаються до негативного та позитивного потенціалу вхідної напруги постійного струму U_d . Це дозволяє варіювати величину та частоту напруги на обмотках статора, що забезпечує точне управління швидкістю та крутним моментом електродвигуна. Під алгоритмом формування вихідного вектора напруги мається на увазі послідовність включення утворюючих векторів, в результаті якої на виході інвертора утворюється задане значення вектора напруги.

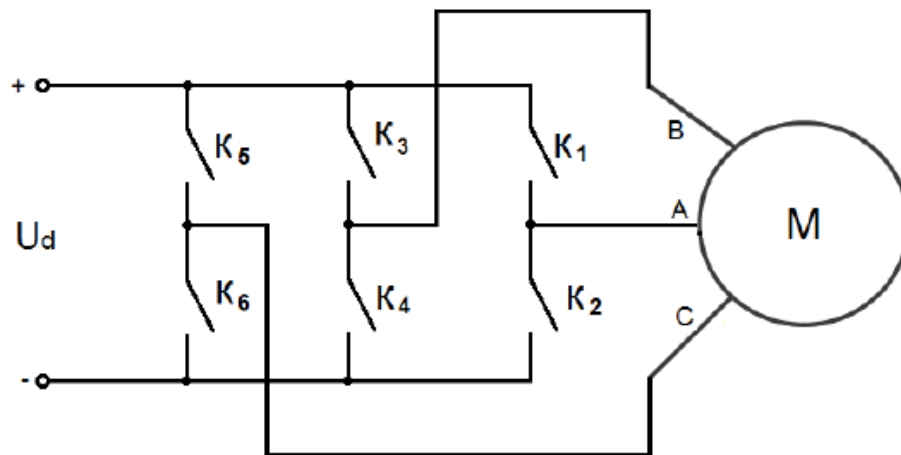


Рисунок 3.3 – Схема заміщення 3ф інвертора

Оскільки частота перемикання ключів інвертора дуже висока, при їх роботі виникають гармонійні перешкоди, які спотворюють вихідну напругу, відхиляючи її від синусоїдальної форми. Для згладжування цих спотворень функцію фільтра можуть виконувати обмотки статора двигуна, що мають індуктивний опір.

У таблиці 3.1 наведено порядок включення (стан) ключів тягового інвертора (ТІ) та їх відповідність базовим векторним станам. Загалом існує 8 можливих станів ключів інвертора, оскільки $2^3 = 8$ варіанти. Перемикання методом векторної ШІМ відбувається з великою частотою і при складному режимі роботи, тому ця схема орієнтована на мікропроцесорну реалізацію. Для цього використовуються контролери як мікропроцесорні системи управління.

Вектори вихідних напруг інвертора u_f схеми станів ключів, які відповідають усім можливим варіантам, приведені на рисунках 3.4.

Таблиця 3.1 – Стан ключів інвертора та відповідні коди

Позначення базового вектора с відповідним двійковим кодом		Стан ключів інвертора					
		Фаза А		Фаза В		Фаза С	
Позначення	Двійковий код	K1	K2	K3	K4	K5	K6
V1	100	1	0	0	1	0	1
V2	110	1	0	1	0	0	1
V3	010	0	1	1	0	0	1
V4	011	0	1	1	0	1	0
V5	001	0	1	0	1	1	0
V6	101	1	0	0	1	1	0
V7	000	1	0	1	0	1	0
V8	111	0	1	0	1	0	1

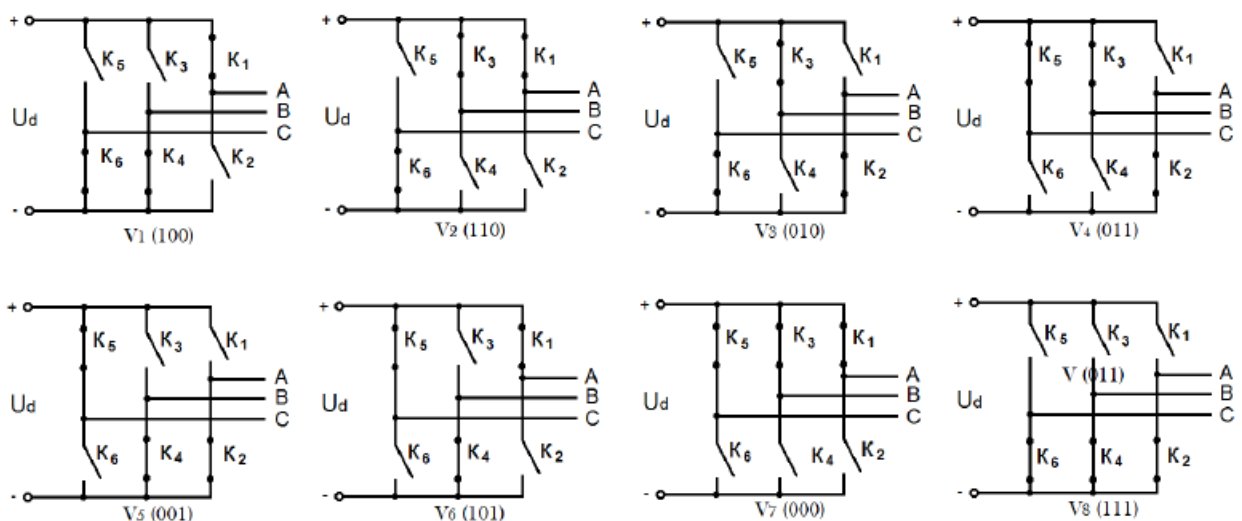


Рисунок 3.4 – Стан ключів інвертора по схемам

Таким чином, базовий вектор напруги формується за рахунок переходу від одного стану ключів в інший. З восьми можливих варіантів стану ключів шість є активним, тобто ненульовими. Вони утворюють граничні вектори (V_1 ..., V_6). А також два нульових – утворюють нульові вектори (V_7 , V_8), відповідні підключеному стану всіх фаз обмоток двигуна або до позитивного, або до негативного полюса вхідної напруги постійного струму U_d .

3.3 Висновок

В даному розділі були складені математичні моделі основних силових тягових агрегатів електромобіля, для того щоб на їх основі в подальшому була можливість систематизувати комп'ютерні моделі для проведення подальших експериментальних досліджень з метою перевірки вибраних параметрів силових вузлів. Складена математична модель трьохканального перетворювача постійної напруги. При складанні рівнянь описані стани схеми перетворювача на різних етапах його роботи.

4 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

4.1 Аналіз динамічних характеристик тягового двигуна при підвищенні напруги джерела

Основними компонентами електропривода електромобіля є тяговий електродвигун (ТЕД) і силовий перетворювач напруги (СПН). Основне завдання СПН (інвертора) полягає в перетворенні напруги джерела постійного струму в трифазну змінну напругу з можливістю регулювання частоти та величини вихідної напруги для живлення ТЕД і управління його частотою обертання. До силових перетворювачів ставляться вимоги щодо високої перевантажувальної здатності та забезпечення плавного регулювання вихідної напруги, що є критично важливим для стабільної роботи електропривода в різних умовах експлуатації.

Для електромобілів можуть бути використані різні типи хімічних джерел струму, проте найпоширенішими є літій-іонні акумулятори. Вони обрані завдяки своїм високим показникам питомої потужності та довгому терміну служби, що робить їх ідеальними для використання в якості тягових джерел струму для електричних транспортних засобів.

В якості тягових електродвигунів (ТЕД) для електричних транспортних засобів можуть використовуватися асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором або синхронні двигуни з постійними магнітами. Потужність таких двигунів варіюється від 30 до 150 кВт, а напруга живлення складає від 150 до 750 В.

Необхідно зазначити, що, незважаючи на високу ефективність силового перетворювача напруги (СПН), в силових колах протікають значні струми навантаження, що можуть призводити до додаткових втрат потужності, особливо під час перехідних процесів. Залежність тягових характеристик

електричної машини від величини вхідної напруги (U_d) СПН на прикладі синхронного двигуна Remy HVH250 (США) показана на рисунку 4.1.

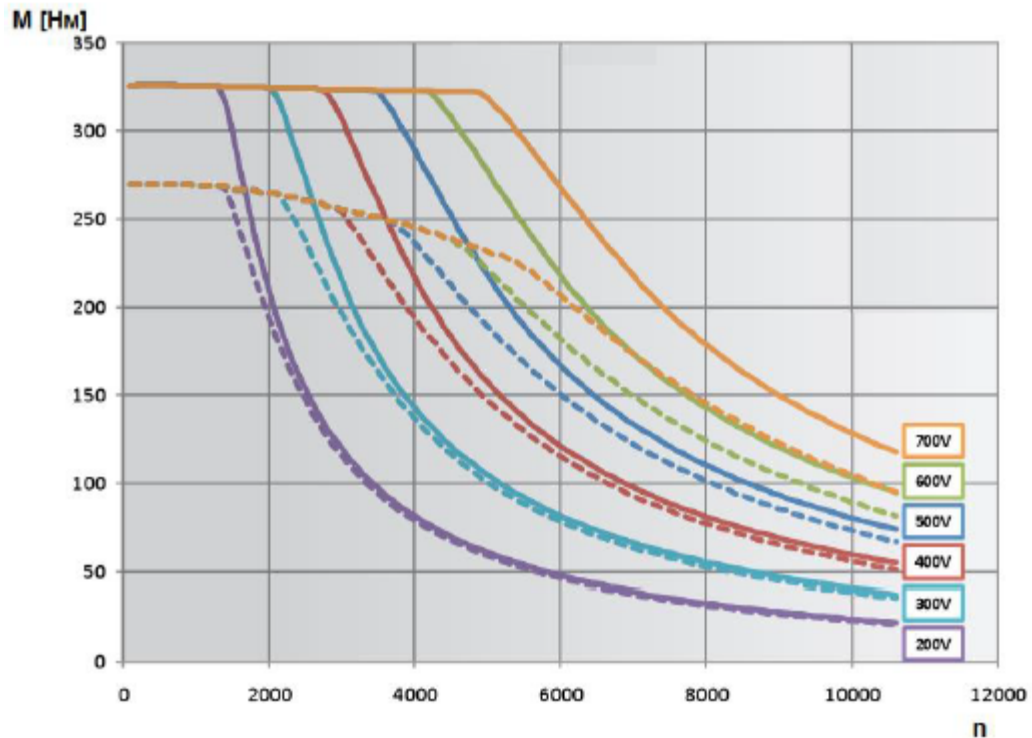


Рисунок 4.1 – Механічні характеристики тягового ЕД

На рисунку 4.1 позначені: штрихова лінія – тривалий режим, суцільна лінія – піковий режим протягом 60 сек.

Аналізуючи приведені характеристики, можна підкреслити нелінійну залежність крутного моменту двигуна від величини вхідної напруги U_d . З розглянутих характеристик видно, що крутний момент двигуна, при швидкості 4000 об/хв та напрузі на вході інвертора $U_d = 200$ В має значення 80 Нм. Поступовим збільшенням напруги живлення U_d до величини 400 В двигун розвиває крутний момент, рівний 220 Нм. Звідси можна зробити висновок, що збільшення напруги живлення двигуна в два рази забезпечує збільшення його крутного моменту в три рази [19, 24].

4.2 Застосування двонаправленого перетворювача напруги в системі електропривода автономного транспортного засобу

При розробці високовольтних акумуляторних батарей (АБ) збільшення напруги досягається шляхом підвищення кількості послідовно з'єднаних одиничних акумуляторів у пакеті батареї. Це, в свою чергу, ускладнює систему контролю стану батареї та знижує її надійність. З одного боку, збільшення робочої напруги ТЕД (тягового електродвигуна) за рахунок більшої кількості акумуляторів у АБ дозволяє покращити тягові характеристики, знижуючи струмові навантаження та збільшуючи крутний момент двигуна. З іншого боку, це збільшує складність контролю за батареями та погіршує масогабаритні показники батареї.

За результатами теоретичних досліджень було виявлено, що на даний момент напруга акумуляторних батарей в електромобілях знаходиться в діапазоні 250-400 В. Вважаючи цей діапазон оптимальним з точки зору співвідношення масогабаритних характеристик та вартості, для живлення високовольтної системи електромобіля без значного ускладнення силового електрообладнання пропонується використовувати оборотний перетворювач постійної напруги (ОППН). Його завданням є перетворення низької напруги постійного струму акумуляторної батареї в високу напругу постійного струму.

Це дозволить використовувати двигуни з високою напругою та більш широким діапазоном тягових і швидкісних характеристик. Збільшення робочої напруги дозволить знизити струмові навантаження і покращити масогабаритні показники, оскільки перетин проводів обмоток електродвигунів залежить від струму, що протікає через ці обмотки. Крім того, стабільну вихідну напругу забезпечить незалежність тягових характеристик електродвигуна та електромобіля від зниження напруги акумуляторної батареї.

Структурна блок-схема силової установки електромобіля з використанням ОППН наведена на рисунку 4.2.

Важливою властивістю даних перетворювачів є оборотність (оберненість), яка передає потужність рекуперації, що виробляється двигуном, назад на акумуляторну батарею.

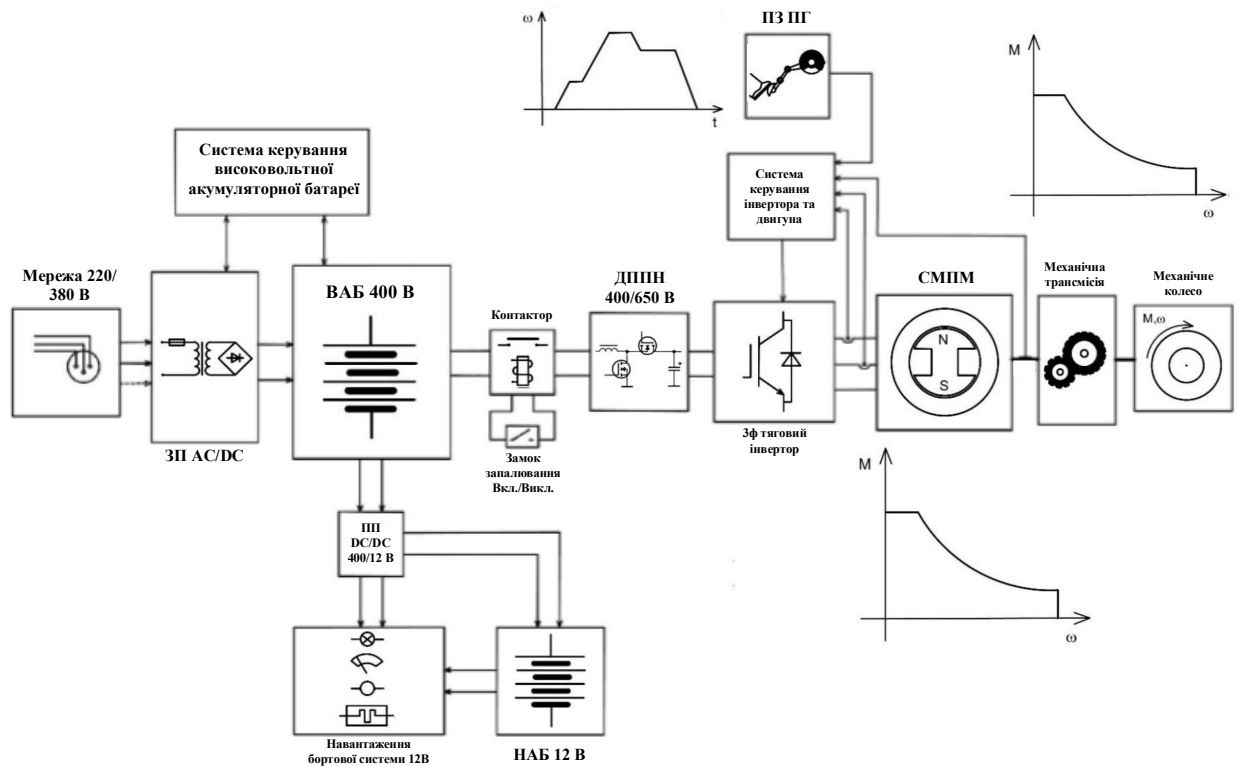


Рисунок 4.2 – Структурна блок-схема силової установки електромобіля з використанням ОППН

На рисунку 4.2 прийняті такі позначення: Мережа 220/380 В – побутова мережа або станція швидкої зарядки; ЗП АС/DC – зарядний пристрій; ВАН 400 В – високовольтна акумуляторна батарея; ПП DC/DC 400/12D – проміжний перетворювач; ДППН – двонаправлений перетворювач постійної напруги; НАБ 12В – низьковольтна бортова акумуляторна батарея; СМІМ – синхронна машина з постійними магнітами; ПЗПГ – пристрій завдання прискорення та гальмування.

4.3 Обґрунтування та вибір структури перетворювача постійної напруги

Вибір структури та схеми ОППН проводиться виходячи з вимог, що пред'являються до ОППН в складі електромобіля. На рисунку 4.3 приведена класифікація імпульсних перетворювачів.

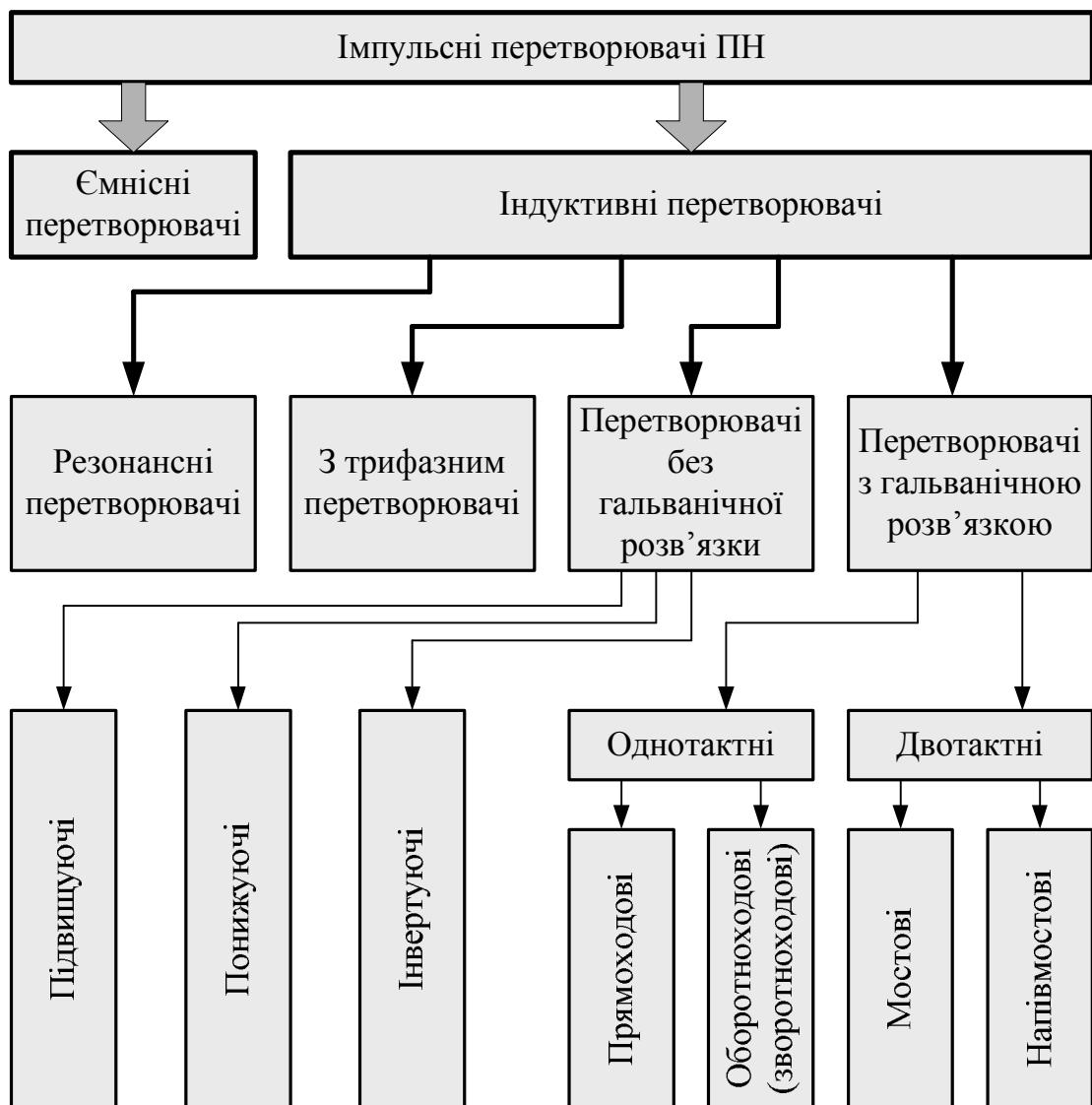


Рисунок 4.3 – Класифікація імпульсних ППН

Двонаправленість перетворювача постійної напруги (ППН) забезпечує можливість зворотної передачі потужності, що виробляється тяговим електродвигуном (ТЕД) під час процесу рекуперації, назад в акумуляторну батарею (АБ) для накопичування та подальшого використання накопленої

енергії. Це є важливою перевагою електричних транспортних засобів, оскільки рекуперація дозволяє значно підвищити енергоефективність транспортного засобу, знижуючи витрати енергії при гальмуванні або сповільненні. Функціональна схема двонаправленого перетворювача показана на рисунку 4.4.

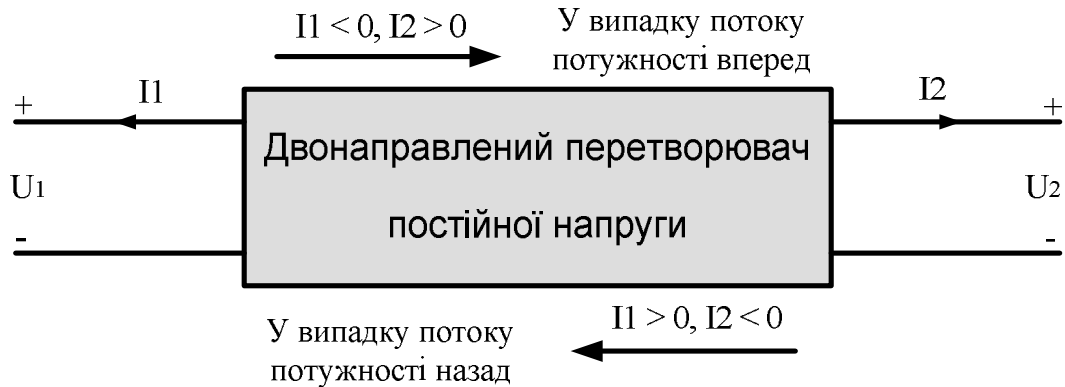


Рисунок 4.4 – Функціональна схема ОПН

Вибір типу перетворювача в залежності від потужності навантаження є важливою частиною проектування ППН, і для вирішення даного завдання можна орієнтовно скористатися діаграмою, приведеною на рисунку 4.5.

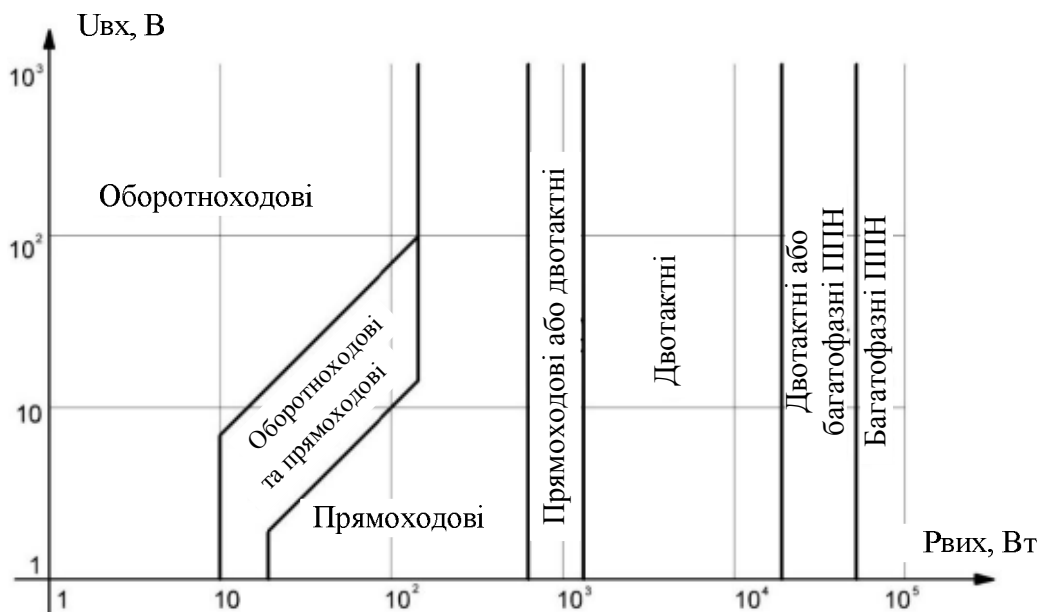


Рисунок 4.5 – Вибір перетворювача за вхідною напругою та вихідною потужністю

Система, яка включає в себе двонаправлений перетворювач, дозволяє не тільки заряджати акумулятори під час рекуперації енергії, але й забезпечує зворотній процес – надання енергії в систему для живлення тягового двигуна, коли це необхідно. Це робить перетворювач ключовим елементом для оптимізації енергоспоживання та підвищення ефективності електричних транспортних засобів.

Відповідно до зображених варіантів для ППН потужністю $P_{II} \geq 1000$ Вт відповідає схема з двотактним перетворенням. Проте для ППН із потужністю біля 50 кВт та більше використання перетворювача з трьохканальною структурою є більш доцільним тому, що даний вид перетворювача має велику перевагу в порівнянні із двотактним перетворювачем.

На рисунках 4.6-4.8 приведені приклади схем двотактного напівмостового та мостового перетворювачів, а також перетворювач із трьохканальною структурою, який може бути використаний в установках великої потужності.

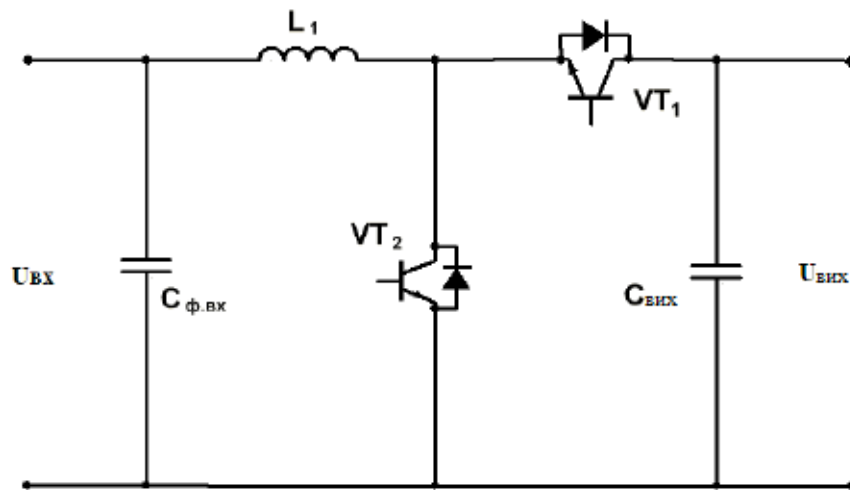


Рисунок 4.6 – Напівмостовий двонаправлений перетворювач

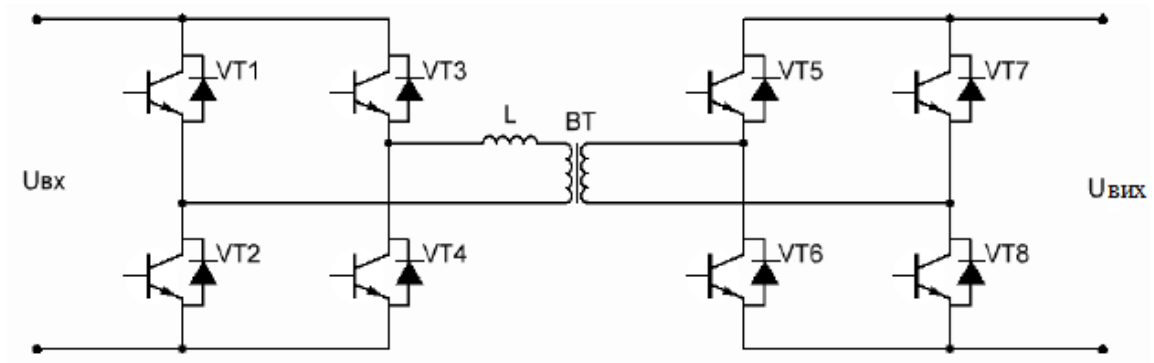


Рисунок 4.7 – Мостовий ізольований перетворювач із високочастотним трансформатором

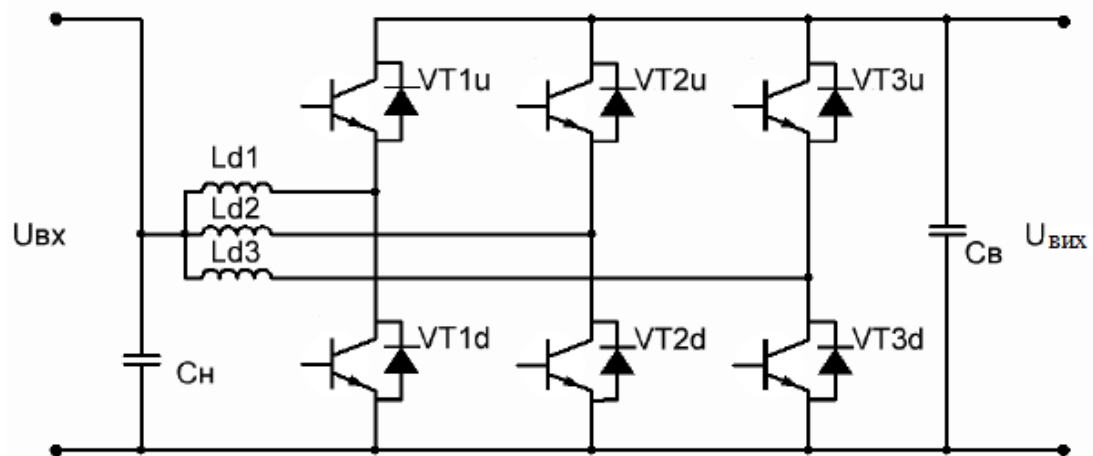


Рисунок 4.8 – Перетворювач постійної напруги з трьохканальною структурою

Іншим оптимальним варіантом для системи тягового електропостачання електромобіля є перетворювач постійної напруги з трьохканальною структурою, який має низку технічних переваг порівняно з двотактними мостовими та напівмостовими перетворювачами. Такий тип перетворювача працює за принципом чергування каналів, що дозволяє досягати більш ефективного керування потужністю та забезпечувати кращу стабільність роботи системи. Це дозволяє знижувати рівень пульсацій струму та напруги, що покращує характеристики роботи електричного приводу.

Перетворювач з трьохканальною структурою особливо підходить для використання в пристроях та приводах, де потужність навантаження може

варіюватися від десятків до сотень кіловат, що робить його ідеальним для високоефективних тягових систем електричних та гібридних транспортних засобів. Крім того, така структура забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження між каналами, зменшуючи стрес на окремі компоненти і покращуючи надійність системи.

Одним з можливих варіантів перетворювача постійної напруги багатоканальної структури може бути схема, приведена на рисунку 4.9. Даний вид перетворювача являє собою каскад з декількох перетворювачів, з'єднаних між собою паралельно, який утворює один великий перетворювач постійної напруги із загальним входом та виходом [19].

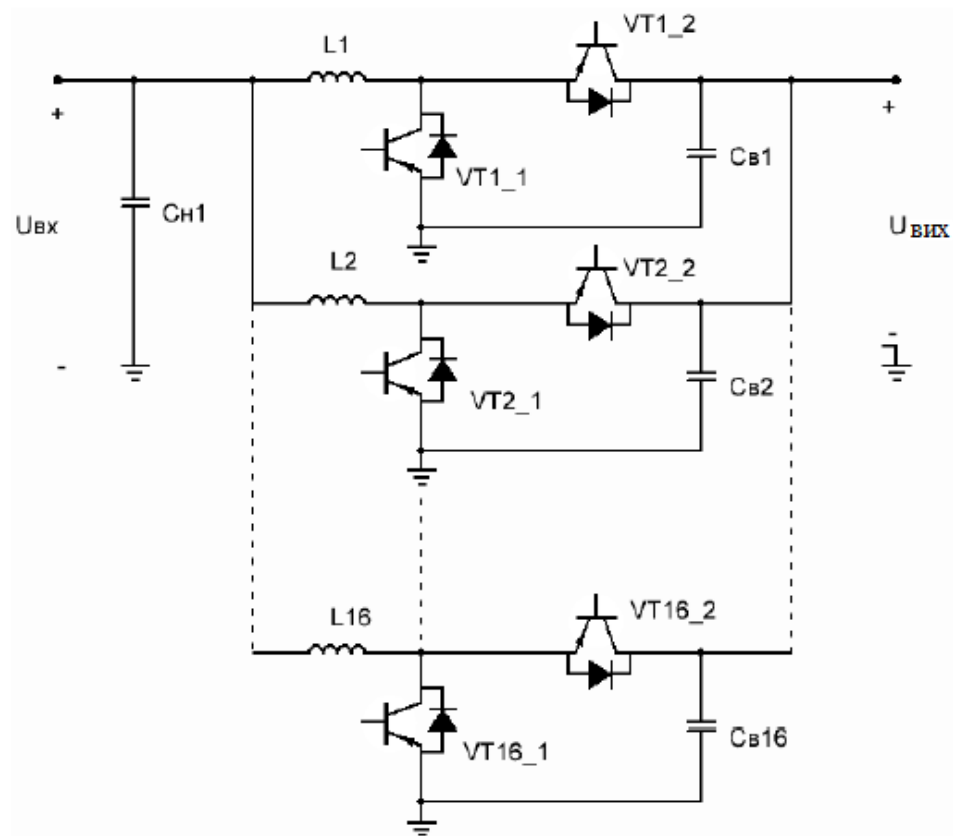


Рисунок 4.9 – Силова схема багатоканального ОППН

Слід зазначити, що вибір структури перетворювача на підставі діаграми, приведеної на рисунку 4.5, є орієнтовним. На вибір типу перетворювача можуть також впливати й інші фактори, такі як складність схеми, висока вартість і т.д.

Аналізуючи діаграму вибору перетворювача в залежності від вхідної напруги та вихідної потужності, можна зробити висновок про те, що для системи тягового електропривода електромобіля потужністю понад 50 кВт та напругою АБ $U_{AB} = 400$ В рекомендується використовувати багатоканальний перетворювач, приклад якого приведений на рисунку 4.8.

Переваги багатоканальних ППН полягають в наступному:

- Зменшення струмового навантаження на елементи перетворювача шляхом розподілу загальної потужності серед кількох паралельно працюючих перетворювачів.

- Завдяки збільшенню сумарної вихідної частоти зменшуються пульсації струму на навантаженні, що, в свою чергу, дозволяє зменшити розміри фільтруючих компонентів.

- Розподіл перетворювача на кілька окремих одиниць зменшує потужність і розміри основних компонентів, що є економічно вигідним, оскільки вартість транзисторів малої потужності значно нижча за вартість потужних транзисторів.

- При розподілі потужності між кількома перетворювачами спрощується охолодження ключових елементів, оскільки тепловиділення розподіляється між багатьма транзисторами, а не зосереджується в кількох пристроях комутації.

Недоліками багатоканальних перетворювачів є складність управління великою кількістю транзисторів і можливі струмові дисбаланси між каналами. Проте сучасні цифрові контролери здатні генерувати точні сигнали керування з високою частотою, що мінімізує ці проблеми і усуває потребу в складних зворотних схемах управління, значно спрощуючи конструкцію перетворювача.

4.4 Визначення та деталізація параметрів ОППН в складі системи електропривода транспортного засобу

Потужність ОППН в складі електротехнічного комплексу електромобіля визначається виходячи з потужності силового електропривода із врахуванням втрат енергії:

$$P_{ОППН} = \frac{P_{ТТИ}}{\eta_{ТТИ}}, \quad (4.1)$$

$$P_{ТТИ} = \frac{P_{ТЕД}}{\eta_{ТЕД}}, \quad (4.2)$$

$$P_{ТЕД} = M_{ТЕД} \cdot \omega_{ТЕД}, \quad (4.3)$$

де $P_{ОППН}$, $P_{ТТИ}$, $P_{ТЕД}$ – потужність ОППН, трифазного тягового інвертора та тягового електродвигуна;

$\eta_{ТТИ}$ – ККД трифазного інвертора;

$\eta_{ТЕД}$, $M_{ТЕД}$, $\omega_{ТЕД}$ – ККД, крутний момент та частота обертання тягового електродвигуна.

На рисунку 4.10 приведена функціональна схема системи тягового електрообладнання електромобіля з використанням ОППН. на рисунку 4.10 приведені такі позначення: де ТДС – тягове джерело струму; ОППН – оборотний перетворювач постійної напруги; ТЕД – тяговий електродвигун.

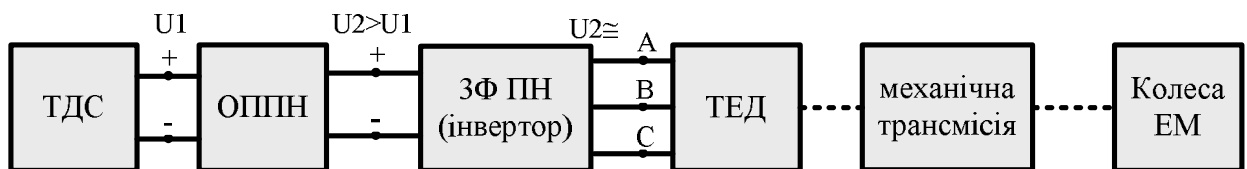


Рисунок 4.10 – Функціональна схема електромобіля із застосуванням ОППН:

— електричний зв'язок;

---- механічний зв'язок

Трифазний інвертор здійснює перетворення постійної напруги в трифазну змінну напругу з необхідними параметрами для роботи тягового

електродвигуна. У дослідженнях та обґрунтуваннях електротехнічного комплексу електромобіля для цих цілей використовувався синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ).

Вибір вихідної напруги перетворювача здійснюється на основі максимальних характеристик високовольтного тягового електродвигуна та інвертора, що використовуються в даному електромобілі. При цьому враховуються вимоги до надійної ізоляції високовольтних шин від корпусу автомобіля, щоб забезпечити електробезпеку під час експлуатації транспортного засобу.

Аналізуючи технічні характеристики електромобіля, зокрема високовольтного тягового електродвигуна, вибраного для цього транспортного засобу, вихідна напруга ОППН була визначена як $U_d = 650 \text{ В}$. Вибір цієї напруги обумовлений максимальною робочою напругою тягового електродвигуна. На рисунку 4.11 представлена спрощена функціональна схема електротехнічного комплексу, що використовує ОППН. Для спрощення подальших розрахунків основних параметрів перетворювача навантаження ОППН, який реалізується через інвертор та ТЕД, використано умовний еквівалентний опір.



Рисунок 4.11 – Спрощена функціональна схема ОППН
з еквівалентним навантаженням

Визначення основних параметрів оборотного перетворювача постійної напруги (ОППН) можна виконувати за наступною методикою:

1. Номінальний вхідний струм ОППН визначається відповідно до рівняння:

$$I_{HOM.BX} = \frac{P_{HOM.BX.}}{U_{BX.}}, \quad (4.4)$$

де $P_{HOM.BX.}$ – вхідна потужність ОППН при номінальному навантаженні;

$U_{BX.} = U_{AB.}$ – вхідна напруга ОППН.

2. Максимальний вхідний струм ОППН:

$$I_{MAX.BX} = \frac{P_{MAX.BX.}}{U_{BX.}}, \quad (4.5)$$

де $P_{MAX.BX.}$ – вхідна потужність ОППН при максимальному навантаженні.

3. Максимальний струм одного каналу ОППН:

$$I_{MAX.m} = \frac{P_{MAX.BX.}}{n \cdot U_{BX.}}. \quad (4.6)$$

4. Номінальний струм одного каналу ОППН:

$$I_{HOM.m} = \frac{P_{HOM.BX.}}{n \cdot U_{BX.}}. \quad (4.7)$$

5. Мінімальна та максимальна вхідна напруга ОППН:

$$\begin{aligned} U_{MIN.} &= 0,8 \cdot U_{AB(ном)}, \\ U_{MAX.} &= 1,15 \cdot U_{AB(ном)} \end{aligned} \quad (4.8)$$

6. Максимальна величина пульсації вихідної напруги перетворювача (3% від $U_{BHX.MAX}$):

$$\Delta U_{BHX.MAX} = 0,03 \cdot U_{BHX.MAX} \quad (4.9)$$

де $U_{BHX.MAX}$ – максимальне значення вихідної напруги ОППН.

7. Максимальний струм навантаження визначається відповідно до рівняння:

$$I_{MAX.BHX} = \frac{P_{MAX.BHX.}}{U_{BHX.}}, \quad (4.10)$$

8. Номінальний струм навантаження визначається відповідно до рівняння:

$$I_{НОМ.} = \frac{P_{НОМ.}}{U_{ВНХ.}}. \quad (4.11)$$

Запропонована методика справедлива для багатоканального ППН. У випадку інших схем перетворення слід враховувати параметри додаткових елементів, а також структуру самого перетворювача.

4.5 Вибір силових напівпровідникових ключів

Одним з основних елементів імпульсних перетворювачів є силовий ключ. В якості силового ключа в основному використовується транзистор і часто в якості елемента, що забезпечує зворотне протікання струму навантаження, зворотний діод.

ККД імпульсних перетворювачів багато в чому залежить від характеристик силових ключів, і правильному їх вибору слід приділяти особливу увагу.

На сьогоднішній день на ринку пропонується величезна різноманітність транзисторів та інших напівпровідникових елементів. Транзистори відрізняються величиною комутованих струмів та напруг, частотою перемикань і рядом інших характеристик.

Протягом десятиліть в процесі розвитку галузі транзисторів були значно поліпшені їх характеристики. Слід зазначити, що IGBT – транзистори по структурі сильно відрізняються від перших біполярних транзисторів, що випускалися в 50-60-х рр. XX століття.

До основних відмінностей сучасних транзисторів слід віднести:

- висока комутована напруга (напруга емітер-колектор);
- високий комутований струм;
- висока частота перемикання (комутації);
- високий ККД.

На рисунку 4.12 приведена класифікація транзисторів.

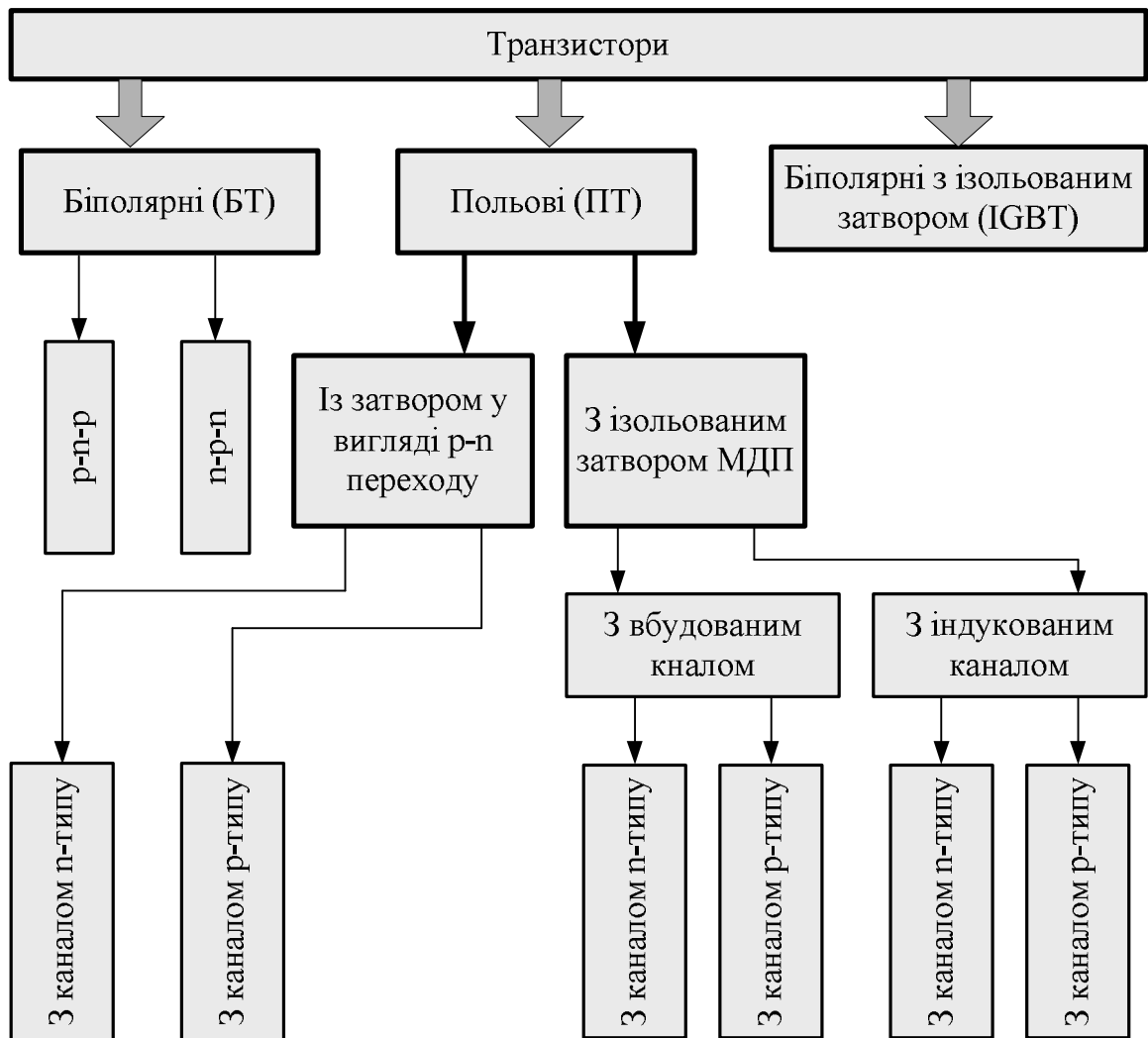


Рисунок 4.12 – Класифікація транзисторів для вибору ОППН

Слід зазначити, що до ОППН транспортного призначення пред'являються високі вимоги по габаритними показниками. Для задоволення цієї вимоги необхідно підвищувати робочі частоти перетворення і при цьому знижувати втрати потужності на силових ключах. Для вирішення цього непростого завдання необхідно правильно вибрати транзисторний ключ, що задовольняє зазначеним вище вимогам. Існуючі дослідження показують, що ефективність ППН в основному залежить від динамічних втрат, що з'являються в процесі комутації транзисторних ключів. Ці втрати можна знизити, якщо використовувати ключові напівпровідникові елементи з низьким часом перемикавання.

Аналізуючи характеристики різних типів транзисторів з урахуванням вимог до сучасних перетворювачів постійної напруги, можна зробити висновок, що для силових ключів найбільш підходящими є польові транзистори типу MOSFET та біполярні транзистори з ізольованим затвором типу IGBT. Ці транзистори володіють необхідними технічними характеристиками, такими як висока швидкість перемикання, низький опір в стані ввімкнення та висока перевантажувальна здатність, що робить їх ідеальними для використання в електричних приводах та перетворювачах напруги.

Польові транзистори мають безліч переваг в порівнянні з біполярними, основними з яких є:

- простота та низька потужність управління;
- область безпечної роботи польових транзисторів ширше в порівнянні з біполярними, тобто у них відсутній вторинний пробій;
- польові транзистори можуть працювати в набагато вищих частотах в порівнянні з біполярними, зберігаючи високий ККД.

Попри численні переваги польових транзисторів порівняно з біполярними, вони мають і певні недоліки. Основні з них включають складність виготовлення без внутрішніх «паразитних» біполярних транзисторів та значне збільшення опору відкритого транзистора при високих значеннях напруги «стік-витік». На рисунку 4.13 показано наближені області застосування транзисторів різних типів. Проаналізувавши переваги та недоліки польових транзисторів, а також рекомендовані області їх застосування в залежності від комутаційного струму та напруги, можна зробити висновок, що для ОПІН потужністю понад 130 кВт доцільно використовувати біполярні транзистори з ізольованим затвором (БТІЗ). Цей тип транзистора поєднує переваги як біполярних, так і польових транзисторів, що робить його оптимальним вибором для потужних перетворювачів.

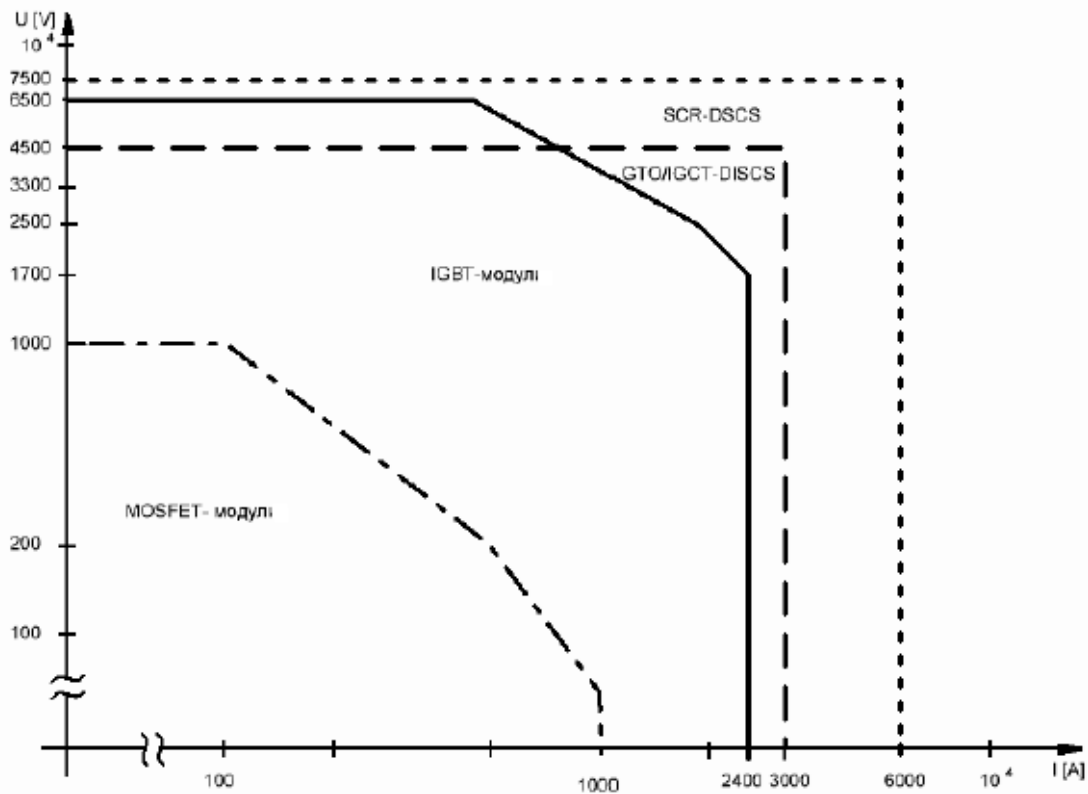


Рисунок 4.13 – Галузі застосування транзисторів

Біполярні транзистори з ізолюваним затвором IGBT мають наступні переваги в порівнянні з польовим транзистором:

- низька потужність управління;
- невеликі втрати потужності в відкритому стані;
- низьке значення залишкової напруги у включеному стані;
- управління напругою, як в польовому транзисторі.

До недоліків IGBT-транзисторів можна віднести погіршення його роботи при використанні в низьковольтних перетворювачах невеликої потужності. Існуючі IGBT-транзистори, наприклад, розробляються компанією «International Rectifier», розділені на чотири основні групи за частотою комутації:

- S (standard speed) - 1 ... 3 кГц;
- F (fast speed) - 3 ... 10 кГц;
- U (ultra speed) - 10 ... 75 кГц;
- W (warp speed) - 75 ... 150 кГц.

Поділ транзисторів на класи частот має велике практичне застосування при розробці статичних перетворювачів.

З наведених характеристик видно, що транзистори певного класу частот слід використовувати лише в тих діапазонах частот, для яких вони розраховані. Використання низькочастотних транзисторів в умовах високих частот є неприпустимим, оскільки це призводить до значного збільшення динамічних втрат потужності, а також потребує значного зниження величини допустимого тривалого струму.

Вибір типу ключових транзисторів для перетворювача постійної напруги з трьохканальною структурою напругою понад 600 В проводиться з використанням графіків областей застосування транзисторів, із врахуванням вхідних та вихідних характеристик перетворювача. Попередній вибір IGBT-транзисторів здійснюється за величиною постійного струму колектора I_C . Подальше уточнення проводиться з використанням графіків залежності величини допустимого постійного струму колектора від температури корпусу, які наводяться в довідкових даних для конкретних типів транзисторів.

4.6 Система керування ключами перетворювача

Багатоканальні перетворювачі постійної напруги мають значні переваги в порівнянні з одноканальними. Збільшення числа паралельно працюючих перетворювачів є зручним способом нарощування вихідної потужності з одночасним зниженням габаритних розмірів фільтруючих елементів та ключових транзисторів. Слід зазначити, що зі збільшенням кількості паралельно працюючих перетворювачів збільшується складність системи керування перетворювачами, тобто управління двонаправленим перетворювачем постійної напруги за допомогою ШІМ-управління є досить складним завданням, а збільшення кількості паралельно працюючих перетворювачів ще більше ускладнює систему.

На рисунку 4.14 приведена функціональна схема системи керування трьохканального оборотного перетворювача постійної напруги, де реалізована можливість перетворення енергії як в сторону підвищення напруги, тобто перетворення і передачі енергії від акумуляторної батареї до електродвигуна, так і в бік зниження напруги, тобто зворотного перетворення енергії рекуперації електричної машини.

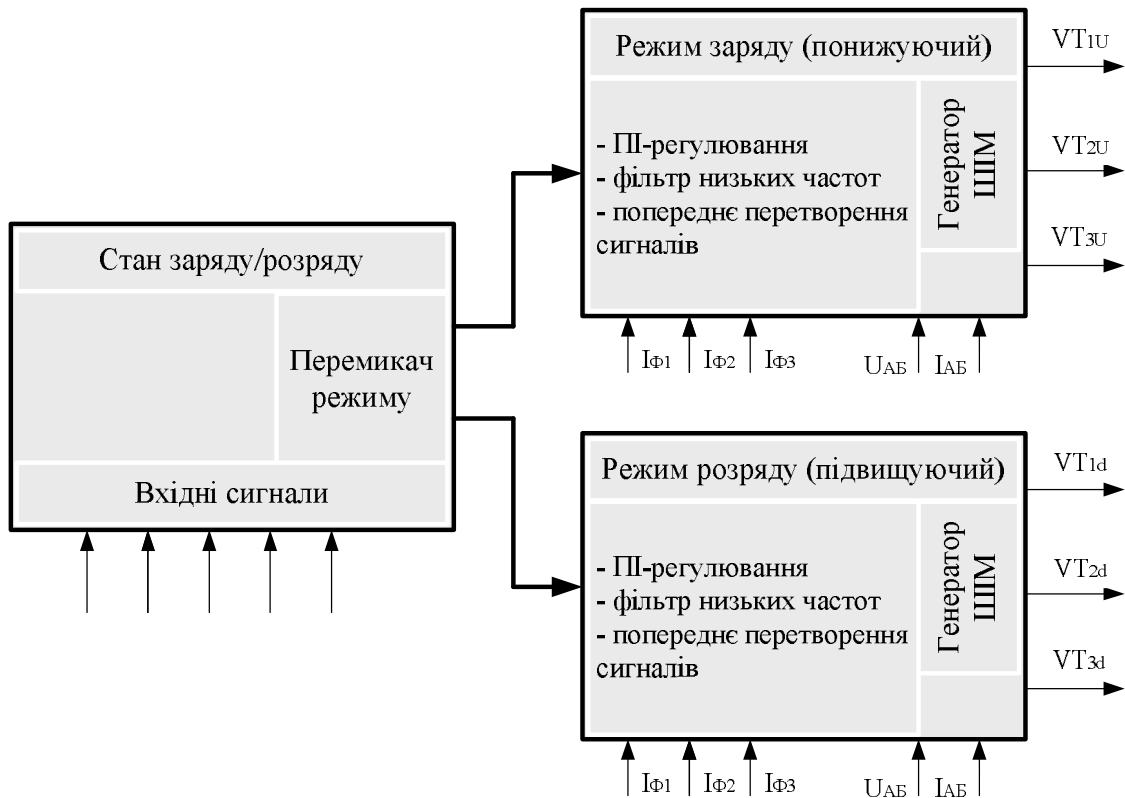


Рисунок 4.14 – Система керування двонаправленого ППН

На сьогоднішній день розробники електронних пристроїв та силової електроніки, такі як International Rectifier і ін., розробляють і випускають спеціальні мікросхеми, які називаються контролерами, які значно спрощують управління такими складними схемами [31].

Контролери – це спеціальні мікросхеми, які є ядром управління більшості сучасних електронних перетворювальних пристроїв силової електроніки, в тому числі багатоканального ППН, завдання яких полягає в управлінні силовими ключовими елементами з певною періодичністю за заданим алгоритмом.

Серед безлічі контролерів можна виділити дві основні тенденції розвитку: розробка спеціальних мікросхем контролерів та універсальні контролери. Спеціальні контролери в основному використовуються в стандартних пристроях масового виробництва.

Реалізація аналогового управління багатоканального ОППН ускладнена через проблеми синхронізації декількох каналів ШІМ-управління. З огляду на ці проблеми реалізації управління перетворювачем, в якості пристрою керування (ПК) кращим є цифровий контролер.

Переваги цифрового методу управління:

- універсальність та гнучкість системи управління;
- контроль всіх робочих процесів з наявністю можливості виявлення збоїв;
- висока економічність з точки зору реалізації системи управління;
- велика продуктивність і висока ефективність системи управління;
- висока точність та швидкодія системи управління.

На рисунку 4.15 приведена схема трьохканального ОППН з системою керування на базі програмованого контролера (ПК).

В даній схемі можна виділити три основні частини: програмований контролер, драйвери IGBT-транзисторів та силова схема трьохканального ОППН. Драйвери IGBT-транзисторів в цій схемі є проміжною ланкою між силовими перетворювачами та керуючим контролером, завдання яких полягає у формуванні необхідного рівня керуючих сигналів (підсилювач імпульсів) для силових транзисторів VT1u ... VT3u та VT1d ... VT3d. Додаткове завдання драйверів IGBT полягає в захисті силових транзисторів від перевищень допустимих значень протікаючих струмів шляхом припинення подачі керуючих сигналів на відкриття транзисторів.

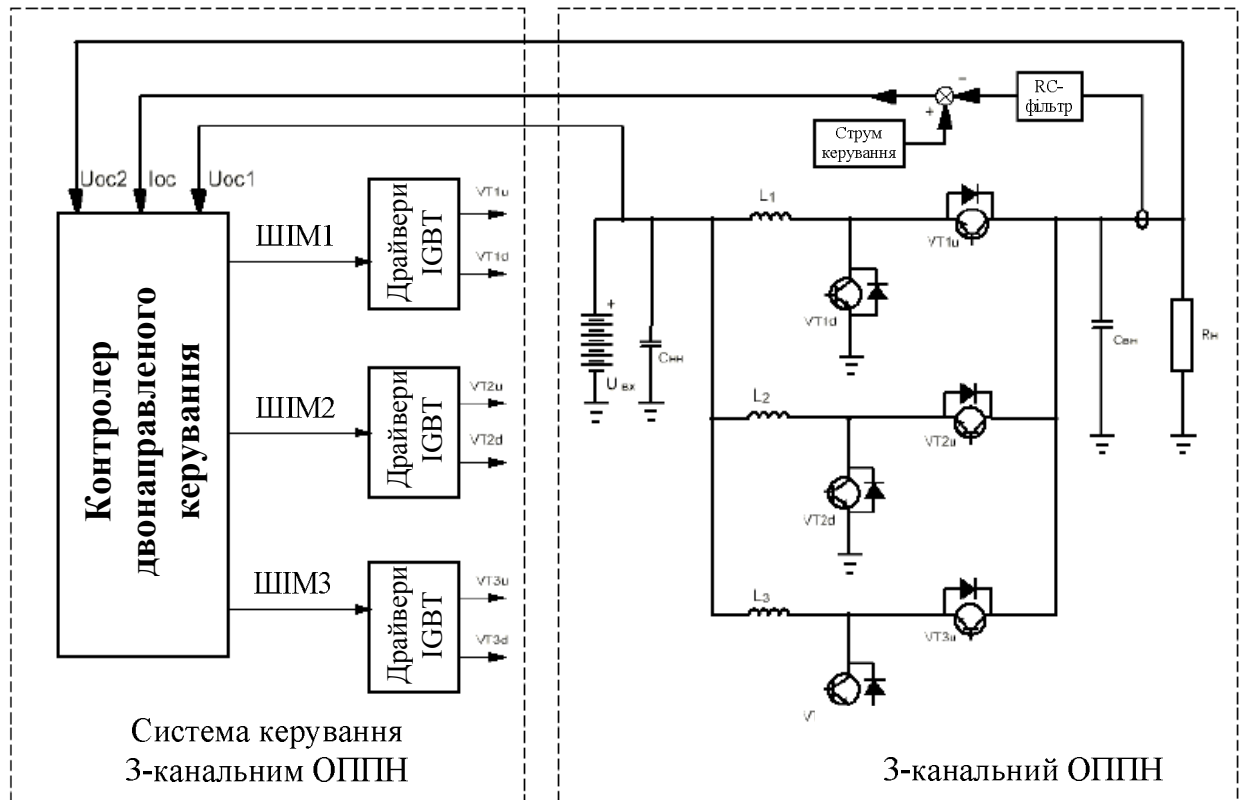


Рисунок 4.15 – Трьохканальний ОПІН з контролером
в якості системи керування

4.7 Висновок

Збільшення напруги джерела живлення за допомогою багатоканального перетворювача постійної напруги має кілька переваг. З одного боку, це сприяє покращенню тягових характеристик електроприводу та підвищує масогабаритні показники електромобіля. З іншого боку, такий підхід дозволяє досягти оптимального балансу між напругою тягового джерела струму, кількістю акумуляторів у батареї та їх надійністю. Крім того, використання багатоканального перетворювача дозволяє підвищити ефективність енергоспоживання, зменшити теплові втрати та покращити загальну довговічність електричних компонентів системи. Це, в свою чергу, позитивно впливає на зменшення витрат на обслуговування та збільшення часу роботи транспортного засобу на одному заряді.

Дослідження показали, що найефективнішим способом керування ОППН з трьохканальною структурою є цифровий метод керування. Вибір цього методу обґрунтований його універсальністю, гнучкістю, високою ефективністю та швидкодією, які можна без проблем реалізувати на програмованих контролерах. Цифрове керування дозволяє забезпечити точний контроль параметрів системи, знижує ймовірність помилок і значно спрощує налаштування та адаптацію системи до різних умов експлуатації. Це робить його оптимальним рішенням для складних і динамічних систем, таких як ОППН з трьохканальною структурою.

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОНАПРАВЛЕНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ТЯГОВОГО ПРИВОДА АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

З метою більш детального дослідження особливостей режимів роботи та обґрунтування використання ОППН в складі системи керування електромобіля в середовищі ППП Matlab Simulink запропонована імітаційна модель системи СУ електромобіля [18, 19-20].

На рисунку 5.1 приведена схема імітаційної моделі ОППН в складі електротехнічного комплексу електромобіля.

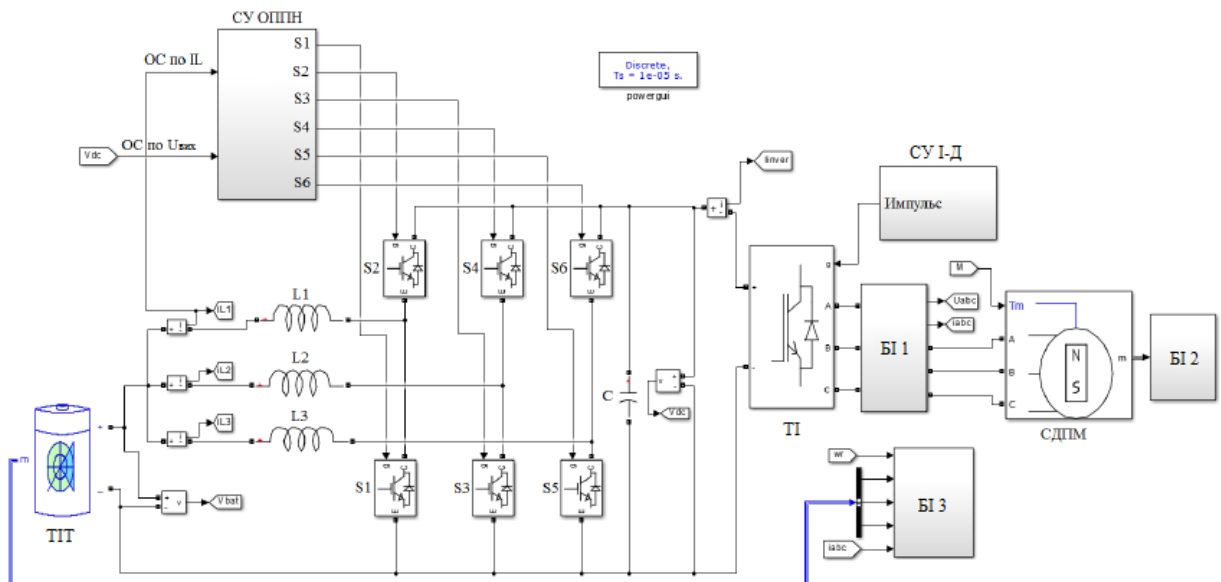


Рисунок 5.1 – Модель ОППН тягового електропривода

Для дослідження імітаційної моделі з метою максимального наближення вихідних показників до реальних були використані параметри реального транспортного засобу, а параметри ОППН були розраховані за методикою, наведеною в п'ятому розділі роботи.

Виходячи з вимог були обрані: інвертор, електродвигун та АБ з необхідними вихідними характеристиками, що задовольняють вимогам.

В бібліотеках ППП Simulink існують готові блок-моделі електротехнічних елементів, в тому числі акумуляторної батареї у вигляді

узагальненої динамічної моделі [25]. На рисунку 5.2 приведено загальний вигляд та блок налаштування параметрів АБ.

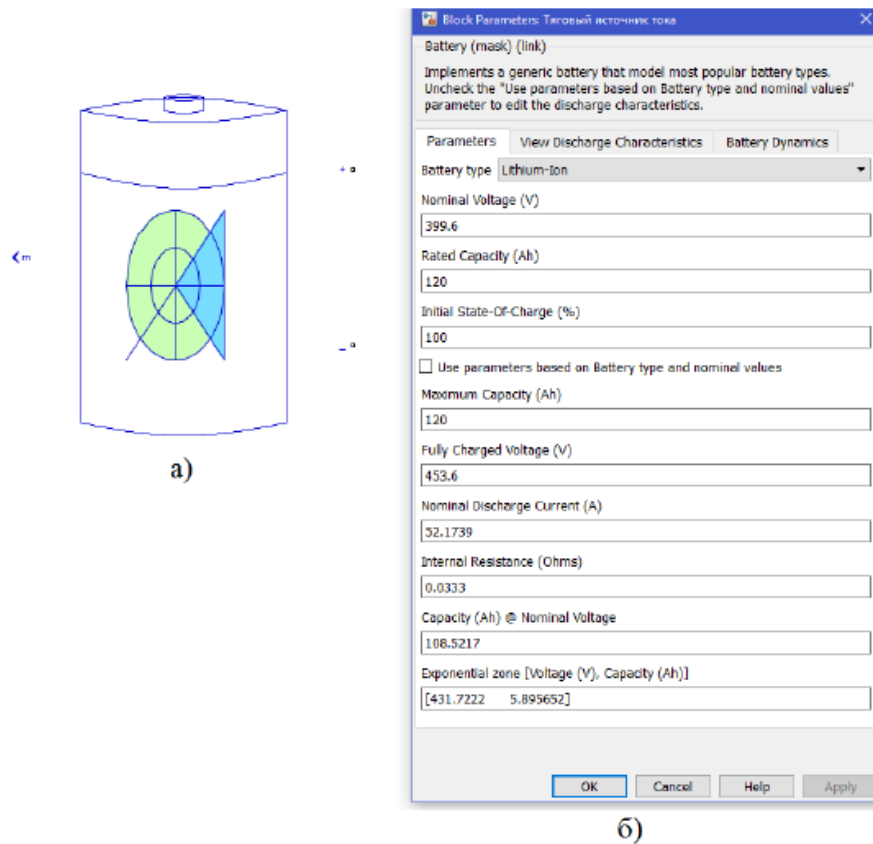


Рисунок 5.2 – Вигляд АБ (а) та встановлення параметрів (б)

Наведена узагальнена модель має можливість імітувати АБ чотирьох найбільш поширених типів:

- свинцево-кислотні (Lead-Acid);
- літій-іонні (Li-ion);
- нікель-кадмієві (Nickel-Cadmium);
- нікель-металогідридні (Nickel-Metal-Hydride).

Блок вимірювання параметрів на виході АБ показує поточне значення струму, напруги та рівень заряду (SOC). Перевагою даної моделі є її простота у використанні.

В бібліотеці Machines є всі існуючі типи електродвигунів, в тому числі Permanent Magnet Synchronous Machine (синхронний двигун з постійними магнітами СДПМ). Модель СДПМ реалізована в залежності від характеру

навантаження і може працювати як в двигунному, так і в генераторному режимі [27].

На рисунку 5.3 (а, б, в) приведений загальний вигляд моделі СДПМ та вкладки блоків налаштування параметрів.

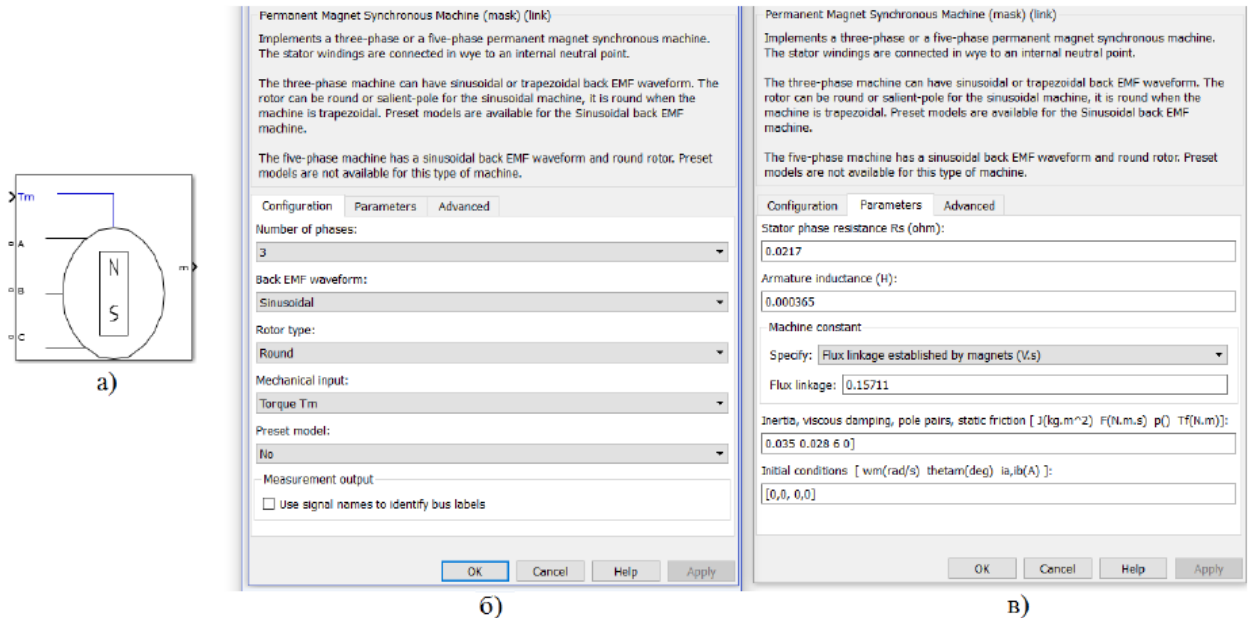


Рисунок 5.3 – Модель СДПМ (а) та вкладки параметрів (б, в)

На вхід моделі подається трифазна напруга на клеми А, В, С, а механічне навантаження подається на вхід T_m . Вихідні характеристики, такі як частота обертання ротора ω , електромагнітний момент двигуна M та струми статора i_{as} , i_{bs} , i_{cs} , можна вивести за допомогою вимірювача сигналів m .

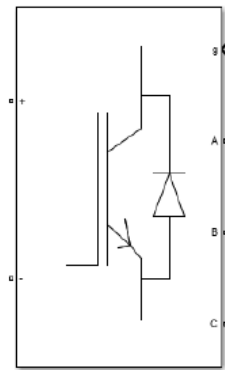
У бібліотеці SimPowerSystem, в розділі Power Electronics, є різні напівпровідникові прилади, в тому числі Universal bridge (модульний універсальний міст). У цій моделі реалізований трифазний перетворювач напруги з використанням шести силових ключів, з'єднаних за трифазною мостовою схемою.

Конфігурація і тип силових ключів вибираються з діалогового вікна налаштування параметрів. Дана універсальна модель дозволяє імітувати перетворювач з використанням наступних типів силових ключів:

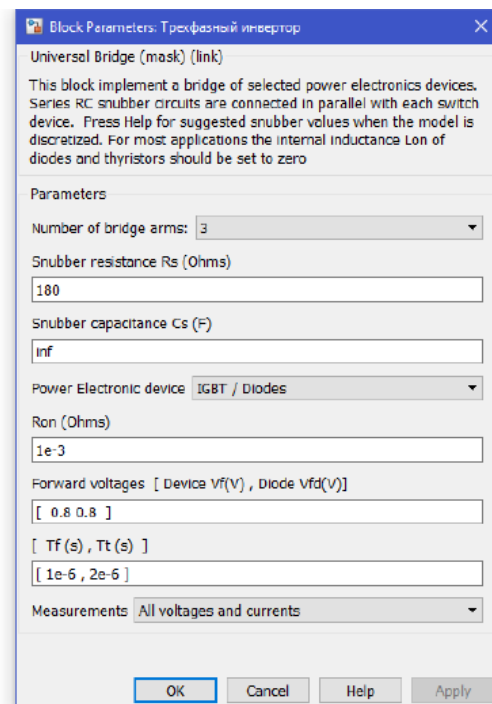
- діоди;

- тиристори;
- транзистори типу GTO;
- транзистори типу Mosfet;
- транзистори типу IGBT;
- ідеалізований ключ.

На малюнку 5.4 (а, б) представлений загальний вид універсального перетворювача та діалогове вікно настройки параметрів перетворювача.



а)



б)

Рисунок 5.4 – Модель універсального перетворювача (а)
та вкладка параметрів (б)

При побудові імітаційної моделі силового електрообладнання електромобіля універсальний перетворювач реалізований з використанням силових IGBT-транзисторів.

Формування напруги управління на виході інвертора забезпечується системою управління (рисунок 5.5), яка складається з блоку завдання швидкості, блоку регуляторів, блоку координатних перетворень та ШІМ-генератора.

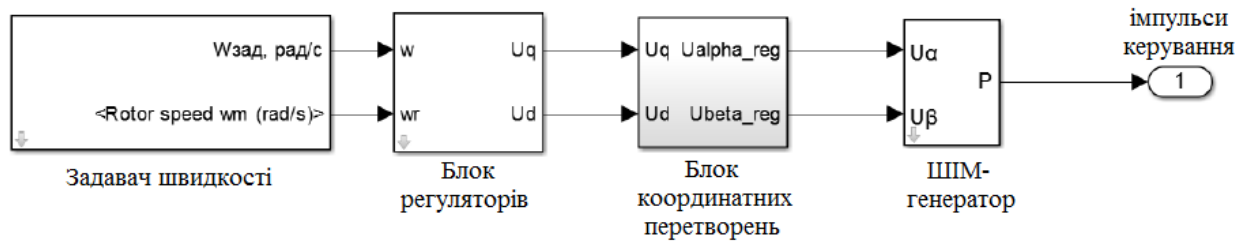


Рисунок 5.5 – Модель системи керування інвертор-двигун

Кінцевим вихідним сигналом системи керування є імпульси, які керують силовими ключами інвертора, формуючи таким чином напруги необхідної форми на виході інвертора і відповідно на вхід двигуна. Одним з основних вузлів в системі управління є блок завдання швидкості, вихідні сигнали якого, впливаючи на інші вузли СУ, змінюють імпульси, і таким чином формують сигнал завдання прискорення або уповільнення електроприводу. Структура блоку завдання швидкості та моменту опору показана на рисунку 5.6.

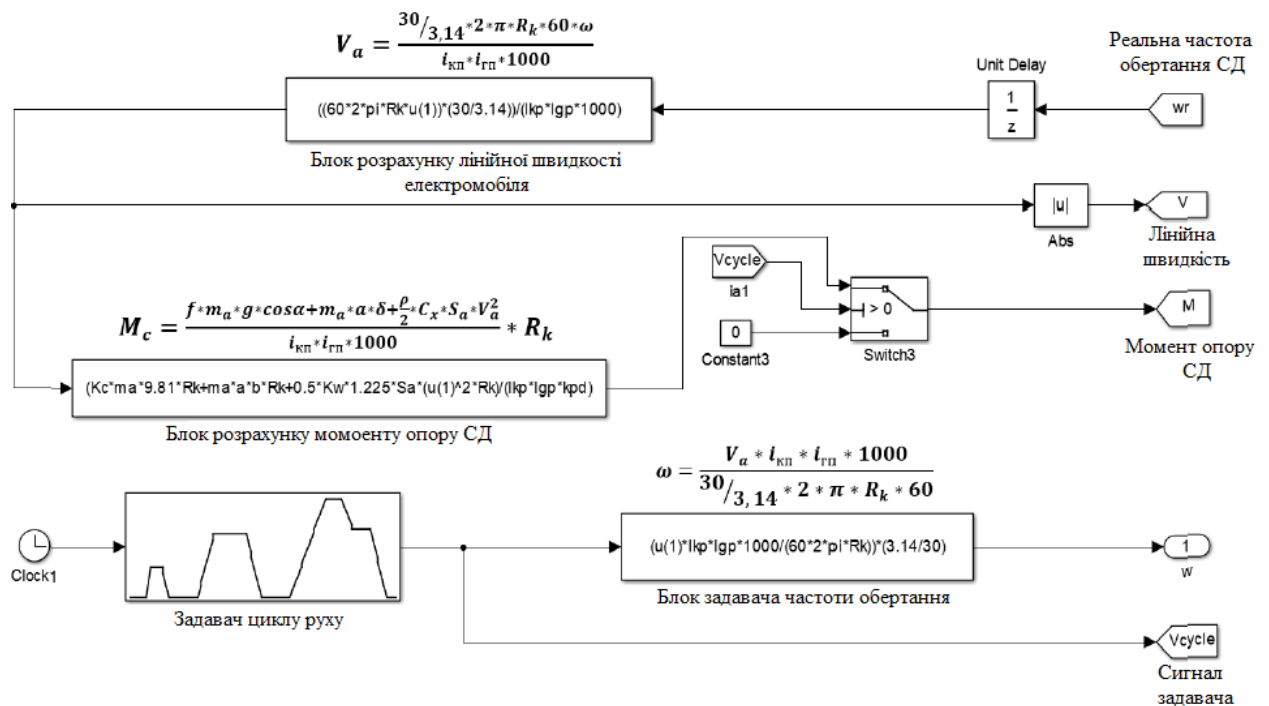


Рисунок 5.6 – Модель задавачів швидкості та моменту опору

Основним елементом в блоці завдання швидкості є задавач циклу руху, який формує характер руху транспортного засобу та імітує реакцію водія. Даний елемент дозволяє встановити різні форми стандартних та

нестандартних циклів руху автомобіля для випробування транспортного засобу. Крім того, інший функціональний перетворювач розраховує сигнал завдання моменту опору для двигуна в залежності від характеру циклу руху, використовуючи вихідні параметри електромобіля із врахуванням змінних параметрів змінюються в процесі випробування, а саме: швидкість прискорення і т.д.

Імітаційна модель силовій схеми трьохканального оборотного перетворювача постійної напруги приведена на рисунку 5.7.

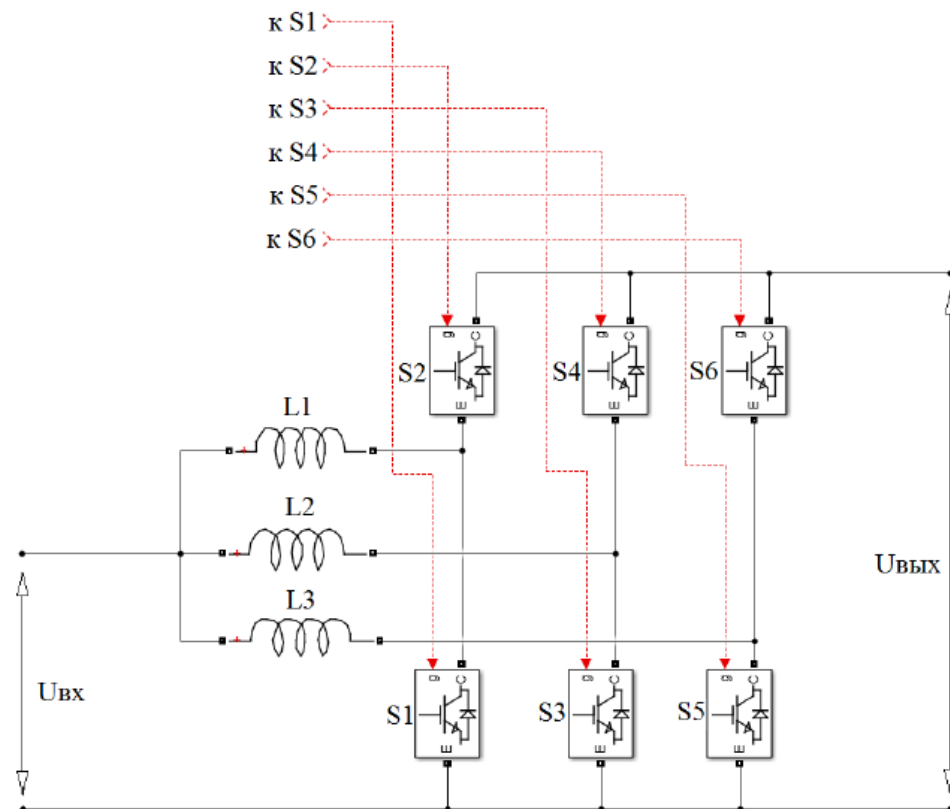


Рисунок 5.7 – Модель трьохканального ОППН

Імпульси керування силових ключів $S1 \dots S6$ забезпечуються системою управління ОППН. Імітаційна модель системи управління, побудована з використанням ідеального релейного елемента та дискретного пропорційно-інтегрального регулятора (ПІ-регулятор), генерує на виході прямокутні імпульси управління, зі змінною шпаруватістю, в залежності від різниці напруги завдання та вихідної напруги перетворювача.

На рисунку 5.8 приведена модель системи управління трьохканального ОППН. Дискретний ПІ-регулятор, на вхід якого підводиться похибка напруги завдання та поточного значення вихідної напруги, забезпечує прагнення вихідної напруги перетворювача наблизитися до заданого значення. Зміна вихідної напруги забезпечується коригуванням поточного значення коефіцієнта заповнення імпульсів управління.

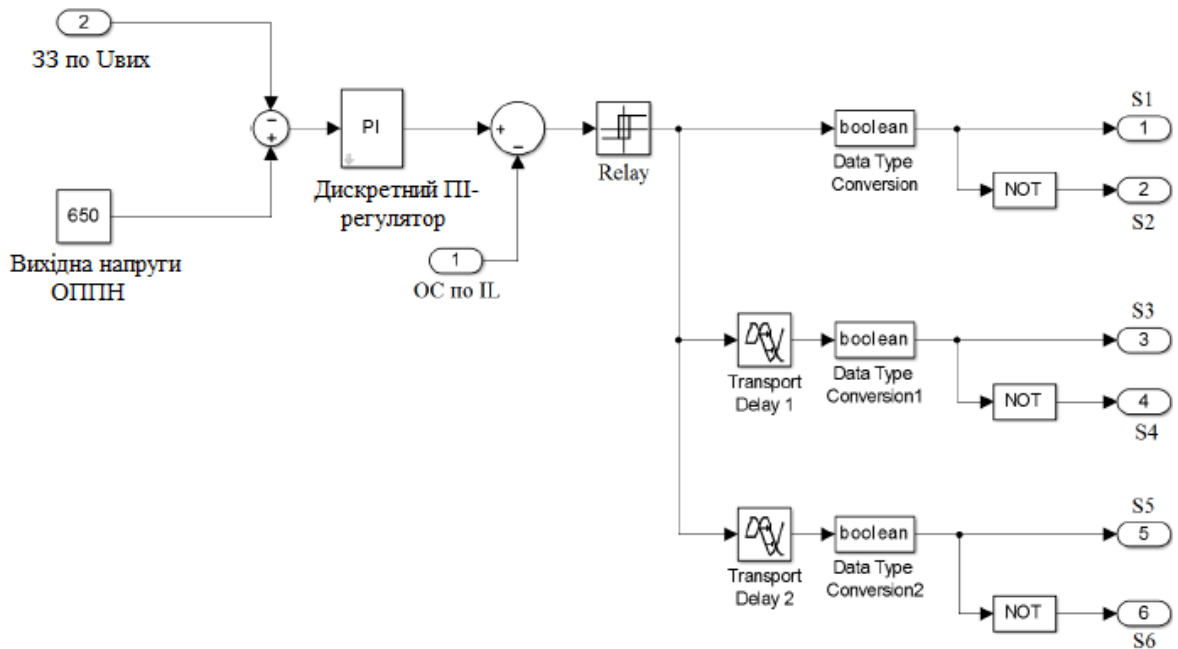


Рисунок 5.8 – Модель трьохканального ОППН

На вхід ідеального релейного елемента підводиться вихідний сигнал дискретного ПІ-регулятора за вирахуванням поточного значення струму котушки індуктивності. Це забезпечує перемикання імпульсів від ключа S1 до S2, і навпаки, в результаті чого здійснюється перехід від режиму «накопичення енергії» в котушці до режиму «віддачі енергії» в навантаження, тобто поточне значення струму котушки, переходячи від позитивного значення до негативного, і навпаки, є природним перемикачем імпульсів управління силовими ключами.

На рисунку 5.9 приведені графіки зміни прискорення автомобіля протягом усього циклу руху.



Рисунок 5.9 – Швидкість руху електромобіля

Відповідна швидкісній характеристиці частота обертання двигуна СДПМ приведена на рисунку 7.10.

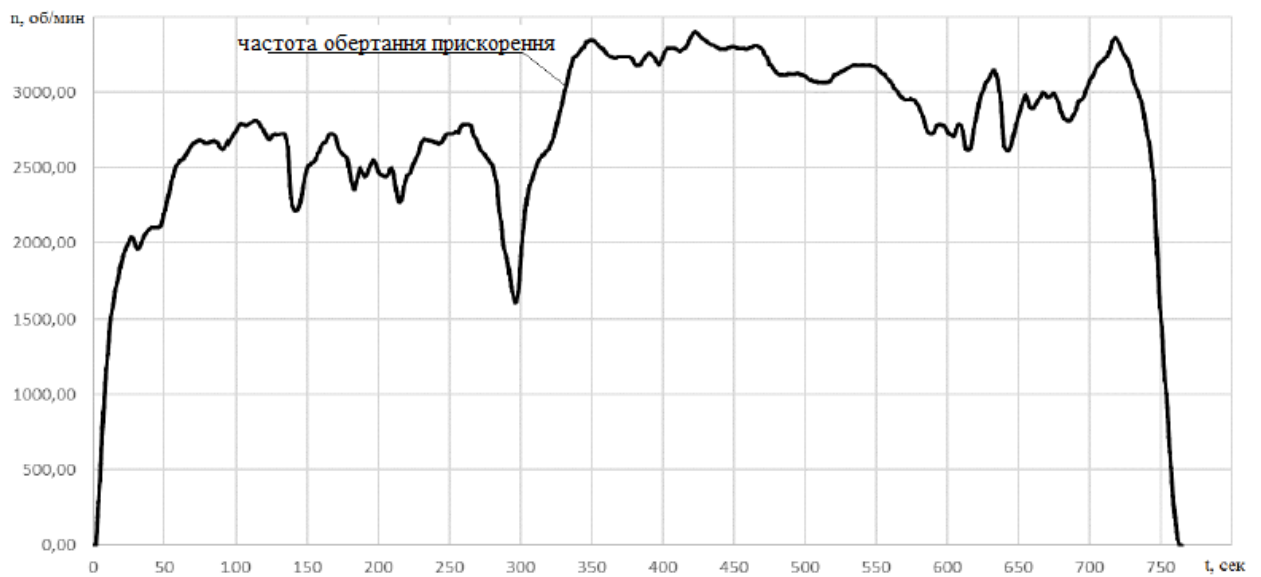


Рисунок 5.10 – Частота обертання СДПМ електромобіля

Крутний момент тягового двигуна відображені на діаграмі на рисунку 5.11.

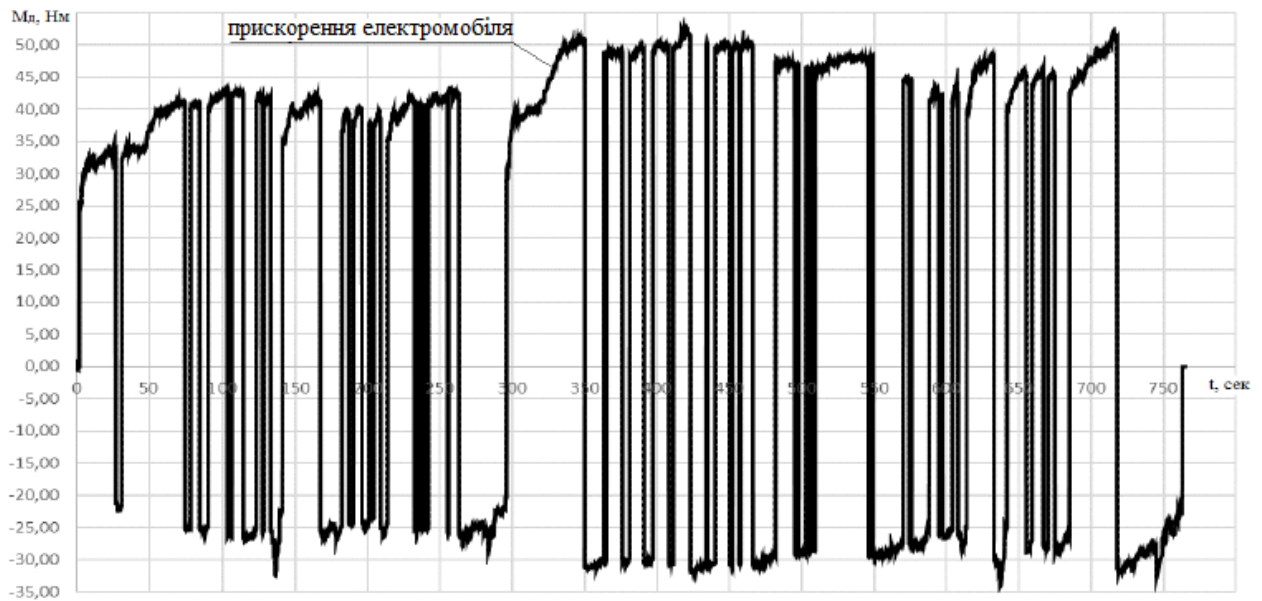


Рисунок 5.11 – Крутний момент на валу СДПМ електромобіля

Результати проведених досліджень свідчать про те, що підвищення напруги джерела при використанні ППН дає можливість знизити втрати в перехідних режимах. Оскільки електромобіль, як і будь-який інший автомобіль, значну частину руху працює в перехідних режимах (часте прискорення, сповільнення, гальмування) особливо в міських умовах, тому завдання оптимізації втрати енергії в тяговому приводі електромобіля має велике значення.

5.1 Висновок

Для запропонованої моделі двонаправленого перетворювача постійної напруги в складі силової установки електромобіля в середовищі ППП Matlab Simulink були побудовані моделі окремих вузлів та агрегатів, а саме: імітаційна модель акумуляторної батареї; імітаційна модель синхронного двигуна з постійними магнітами; імітаційна модель трифазного інвертора з системою управління; імітаційна модель трьохканального двонаправленого перетворювача постійної напруги.

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

6.1 Розрахунок капітальних вкладень

Замовник залучає власні кошти для реалізації технічного рішення зі створення системи керування електроприводом постійного струму. Він несе витрати на розробку, впровадження та експлуатацію розробки.

Всі витрати, пов'язані з реалізацією проекту називають капітальними вкладеннями. До капітальних вкладень відносять витрати на розробку проекту, придбання обладнання, доставку на підприємство, монтаж і налагодження.

Виходячи з маси вантажу, відстані і тарифу перевезень 1 т вантажу на 1 км, визначають витрати на доставку вантажу. Витрати на монтаж обладнання визначають розрахунковим методом, виходячи з нормативів вартості монтажних робіт. Витрати на налагоджувальні роботи визначають аналогічно. Для загальних розрахунків витрати на доставку, витрати на монтаж обладнання, витрати на налагоджувальні роботи приймають рівними 10% від вартості обладнання.

Одноразові витрати на поновлення оборотних фондів у зв'язку з впровадженням нової техніки включають витрати на придбання необхідної кількості запасів основних матеріалів, запасних частин, комплектуючих виробів та ін. З використанням системи технічного обслуговування і ремонту енергетичного обладнання (ТОР ЕО) визначають необхідний рівень запасів матеріалів.

Виходячи з нормативів затрат на будівельні роботи, розрахунковим методом визначають витрати на будівельні роботи (влаштування фундаментів та ін.). Для загальних розрахунків витрати на будівельні роботи приймаються рівними 10% вартості обладнання.

Витрати на технічні заходи з охорони навколишнього середовища, навчання персоналу, покращення умов праці персоналу та інші, відносять до

інших капітальних вкладень. Вони включають в себе також залишкову вартість неповністю зношеного обладнання, що ліквідується.

В таблиці 6.1 приведено розрахунок капітальних вкладень на розробку та впровадження діагностичної системи електричного обладнання транспортних засобів [26].

Примітка: враховуючи той факт, що в роботі не ставилася задача розрахунку конкретного значення потужності тягового електропривода електромобіля, а лише розробка оберненого перетворювача постійної напруги, тому для розрахунків приймаємо типові значення потужності тягового електропривода 120 кВт.

Таблиця 6.1 – Капітальні витрати на електроустаткування

Найменування обладнання	Кошторисна вартість, грн.
Електродвигун тяговий СДПМ (120 кВт)	88600
Система керування ПЧ-СДПМ	122400
Кабелі, апарати захисту, сенсори, доп. пристрої та ін.	34500
Бортова операційна система контролю: - операційна панель; - периферійне обладнання	25400
Персональний комп'ютер (оренда на етапі проектування та впровадження)	2800
Спеціалізоване програмне забезпечення для програмування та оптимізації режимів ТЕП	8240
Всього	281940,00
Витрати на транспортування (13%)	36652,20
Монтажні та налагоджувальні роботи (10%)	28194,00
Всього капітальні вкладення	346786,20

Отже, капітальні витрати $E_k = 346786,20$ грн.

6.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати включають витрати на забезпечення нормального функціонування певного технічного рішення в період його експлуатації в розрахунку на рік [26].

Експлуатаційні витрати E включають:

1. Амортизаційні відрахування E_a ;
2. Заробітна плата $E_{зп}$ обслуговуючого персоналу (основна, додаткова, нарахування на заробітну плату);
3. Витрати на силову електроенергію E_e ;
4. Витрати на поточний ремонт $E_{пр}$;
5. Інші витрати $E_{ін}$.

Тобто:

$$E = E_a + E_{зп} + E_e + E_{пр} + E_{ін}. \quad (6.1)$$

6.2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Річні амортизаційні відрахування становлять (норма амортизації 10% в рік для механізму підвищеної складності):

$$E_a = 10\% \cdot E_k, \quad (6.2)$$

$$E_a = 0,1 \cdot 346786,20 = 34679 \text{ (грн)}.$$

6.2.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Обслуговування електромобіля здійснюватиметься на спеціалізованій станції технічного обслуговування. Згідно ПУЕ обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого, група допуску не нижча третьої групи по електробезпеці.

Витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу розраховуємо за формулою:

$$E_{3\Pi} = E_{3O} + E_{3L} + E_{3H}. \quad (6.3)$$

E_{3H} – нарахування на заробітну плату.

$$E_{30} = N \cdot T_l \cdot K \cdot \Phi_{\text{eff}} \cdot K_c \cdot \beta. \quad (6.4)$$

$\Phi_{\text{эф}}$ – ефективний фонд робочого часу на обслуговування та ремонт електропривода діагностичної системи.

K_c – коефіцієнт співвідношення, встановлений Генеральною угодою міжпрофспілками і урядом ($K_c=1$);

β – частка часу, який витрачає робітник на обслуговування установки в загальному часі своєї роботи ($\beta=1$).

Трудомісткість ремонтних робіт визначається згідно графіка планово-попереджувальних ремонтів (таблиця 6.2) [26].

Таблиця 6.2 – Графік ремонтів

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Кількість годин за рік
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Система керування	6						8				8		22
Приводний двигун		5				5					7		17
Кабельна мережа, апарати захисту та керування	4						4					4	12
Бортова операційна система контролю		6				8					8		22
Допоміжні елементи та вузли	4						4					4	12
Загальна трудомісткість, год													85

В таблиці 6.2 зазначено тривалість міжремонтних періодів та трудомісткість кожного виду ремонту чи обслуговування.

Незначна кількість годин на обслуговування системи пов'язана із тим, що система є новою та сучасною, із використанням мікропроцесорної системи керування, яка має працювати стабільно та надійно і не потребує значного часу на обслуговування.

Слід відзначити, що обслуговування вузлів гібридного автомобіля займає лише частину робочого часу електрослюсаря. Тому, для даного виду робіт розраховуємо основну заробітну плату по тарифу:

$$E_{zo} = 1 \cdot 40 \cdot 2,33 \cdot 85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot = 7922 \text{ грн.}$$

Додаткова заробітна плата E_{zd} становить 10% основної заробітної плати:

$$E_{zd} = 0,1 \cdot 7922 \cdot = 792,2 \text{ грн.}$$

Розрахунок нарахувань на заробітну плату зведемо в таблицю 6.3.

Таблиця 6.3 – Розрахунок нарахувань на заробітну плату

Показник	Сума
Основна заробітна плата, E_{zo} грн.	7922
Додаткова заробітна плата, E_{zd} грн.	792,2
Разом основна і додаткова заробітна плата, $(E_{zo}+E_{zd})$ грн.	8714,2
Єдиний внесок на загальнообов'язкове соціальне страхування, (22%) грн.	1917,1
Всього нарахування, грн	10631,3

6.2.3 Розрахунок витрат на електроенергію

Варто відзначити, що показник додаткових витрат, що враховують втрати енергії в стаціонарних і перехідних режимах роботи електропривода, є досить відносним, оскільки включає в себе і безпосереднє споживання електроенергії змінного струму із мережі, і використання акумуляторних

автомобільних батарей постійного струму, і акумулятора діагностичного ноутбука.

Витрати на силову електроенергію знаходимо за формулою:

$$E_E = \frac{P}{\eta} \cdot B \cdot T_{\text{еф}} \cdot K_{\text{вм}} \cdot K_3, \quad (6.5)$$

де B – вартість електроенергії. Ціна на універсальні послуги для побутових споживачів, електроустановки яких приєднані до електричних мереж згідно з II класом напруги з ПДВ складає приблизно 4,32 грн/кВт·год. із врахуванням тієї обставини, що автомобіль використовується в побутових цілях <https://www.voe.com.ua/news/pro-novyuy-taryf-na-elektroenerhiyu#:>);

P – номінальна потужність ($P = 120$ кВт);

η – коефіцієнт корисної дії ($\eta = 0,95$);

$T_{\text{еф}}$ – ефективний фонд часу роботи в рік складає 360 год/рік);

$K_{\text{вм}}$ – коефіцієнт ввімкнення (складає 0,4);

K_3 – коефіцієнт завантаження (використання за потужністю – 0,8).

Номінальна потужність двигуна складає 120 кВт. Коефіцієнт завантаження складає 0,8.

Особливістю роботи електропривода електромобіля є використання в процесі експлуатації режиму рекуперації електричної енергії, накопичення її в акумуляторних батареях автомобіля та повторне використання її для потреб тягових режимів руху. Споживання з мережі енергії змінного струму здійснюються лише на етапі заряду батарей для забезпечення режиму тяги. Тому в розрахунок вводимо додатковий коефіцієнт перерахунку, який враховує співвідношення спожитої електричної енергії змінного струму з мережі та безпосередньо запасеної в акумуляторних батареях, рекуперованої та витраченої на тягу енергії. Приймаємо значення даного співвідношення за рік рівним 0,85.

Отже, за формулою (6.5) маємо:

$$E_E = \frac{P}{\eta} \cdot B \cdot \Phi_{E\Phi} \cdot k_B \cdot k_s = \frac{120}{0,95} \cdot 4,32 \cdot 360 \cdot 0,4 \cdot 0,8 = 53433,4 \text{ (грн.)}$$

6.2.4 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

Поточний ремонт системи електроприводу здійснюється на станції технічного обслуговування з його відключенням і зупинкою, силами фахівця установи.

Витрати на матеріали, комплектуючі та запасні частини для поточного ремонту приймаємо рівними 30% витрат від основної заробітної плати електрослюсаря IV розряду (запчастини є дорого вартісними). Тобто, витрати на матеріали становлять:

$$E_{\text{пр}} = E_{\text{зп}} \cdot 0,3. \quad (6.6)$$

$$E_{\text{пр}} = 5848 \cdot 0,30 = 1754 \text{ (грн.)}$$

$$10631,3 \cdot 0,3 = 3189,4 \text{ грн.}$$

6.2.5 Інші витрати

Розмір інших витрат приймаємо рівним 5% від загальної суми попередніх витрат. Тобто:

$$E_{\text{ін}} = (E_a + E_{\text{зн}} + E_e + E_{\text{пр}}) \cdot 5\%, \quad (6.7)$$

$$E_{\text{ін}} = (34679 + 10631,3 + 53433,4 + 3189,4) \cdot 0,05 = 1900,5 \text{ (грн.)}$$

Розрахунок загальної суми експлуатаційних витрат за формулою (6.4) наведемо в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Розрахунок сумарних експлуатаційних витрат

Найменування витрат	Сума
Амортизаційні відрахування E_a , грн.	34679
Заробітна плата $E_{зп}$ обслуговуючого персоналу, грн.	10631,3
Витрати на електроенергію E_e , грн.	53433,4
Витрати на поточний ремонт $E_{пр}$, грн.	3189,4
Інші витрати $E_{ін}$, грн.	5096,7
Всього експлуатаційні витрати E , грн.	107029,8

Висновок: В даному розділі було проведено розрахунок капітальних вкладень для розробки та впровадження в роботу електромобіля на основі електропривода змінного струму. Розраховано основну заробітну плату обслуговуючого персоналу, витрати на електроенергію, на планові ремонти та інші витрати. Оскільки можливу вигоду від впровадження даної системи наразі оцінити неможливо, тому термін окупності не розраховується. Відносним економічним показником є в даному випадку експлуатаційні витрати.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ

У випусковій кваліфікаційній роботі розглядаються заходи з підвищення ефективності тягового електропривода автомобіля с системою багатоканального перетворення напруги. На станції технічного обслуговування автомобілів (СТО), де обслуговується електромобіль, передбачається створення належного температурного режиму, який забезпечує необхідні санітарно-гігієнічні норми праці. Усі металеві неструмовідні частини (корпуса електродвигунів, шаф, світильників, тощо), які можуть опинитися під напругою в наслідок пошкодження ізоляції, заземлюються шляхом приєднання до нульового проводу живлячої мережі [27-31].

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори згідно ГОСТ 12.0.003-74, які впливають на електромонтерів, що здійснюють діагностику автомобілів та обслуговують діагностичний стенд на СТО:

- фізичні:
- підвищена та понижена температура повітря робочої зони;
- рухомі машини і механізми, незахищені рухомі елементи виробничого обладнання;
- підвищена та понижена температура поверхонь обладнання, матеріалів;
- недостатнє освітлення робочої зони;
- недостатність природного освітлення;
- небезпечний рівень напруги електричного кола, замикання якої може відбутися через тіло людини;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищена вологість повітря;
- психофізіологічні небезпечних та шкідливих виробничих фактори:
- фізичні перевантаження (динамічні);
- нервово - психічні перевантаження (монотонність праці) [27-29].

7.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

7.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочого місця

Роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці. Це забезпечить не лише безпечність умов праці, а й створить відповідний настрій всередині колективу.

Комплексне оснащення робочого місця є необхідною передумовою ефективної організації процесу праці. Однак іншою важливою умовою є раціональне просторове розміщення засобів оснащення на робочому місці так, щоб забезпечити зручність їх обслуговування, вільний доступ до механізмів, економію рухів і пересувань працівника, зручну робочу позу, хороший огляд робочої зони, безпеку праці, економію виробничої площі, зручний взаємозв'язок із суміжними робочими місцями, з підлеглими і керівниками. Забезпечення цих умов досягається в ході планування робочих місць, яке ми коротко визначаємо як найраціональніше просторове розміщення матеріальних елементів виробництва, що складають оснащення робочого місця, та самого працівника [27-31].

Схема приміщення необхідного для виконання проектно-конструкторських робіт представлено на рисунку 7.1.

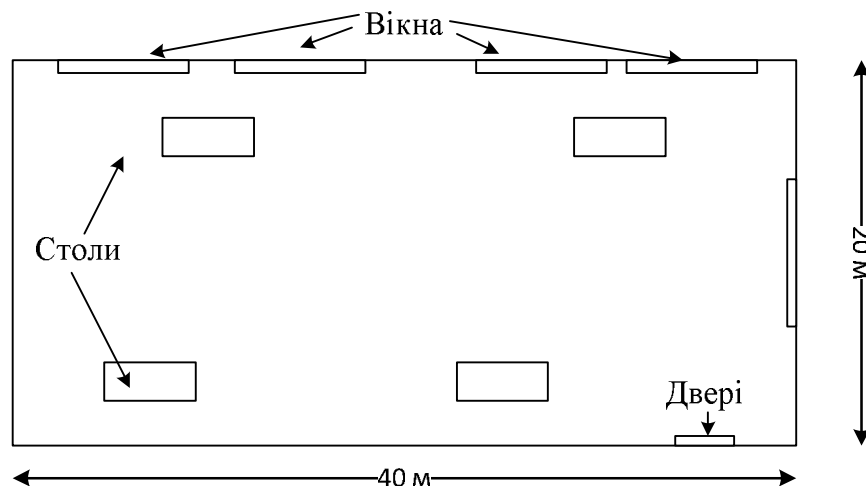


Рисунок 7.1 – Схема приміщення СТО

7.1.2 Електробезпека

Живлення здійснюється від п/ст 10/0,4 кВ кабельними лініями, що прокладені в траншеях. У приміщенні станції технічного обслуговування гібридних автомобілів використовується трифазна чотирьохпровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Категорія умов по небезпеці електротравматизму залежить від наявності факторів підвищеної або особливої небезпеки. При наявності такого фактору як струмопровідний пил, приміщення можна віднести до категорії підвищеної небезпеки.

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно:

- розміщувати неізолювані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах;

- використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки;

- підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника [27-31].

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом

дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

При роботі, яка зв'язана з доторканням до струмоведучих частин електродвигуна або до обертових частин електродвигуна, який приводить в рух механізм, необхідно зупинити електродвигун та на його пусковому пристрої або ключі керування повісити плакат "НЕ ВМИКАТИ, ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ".

Розшиновку або від'єднання кабеля при підготовці робочого місця може виконати ремонтний робітник, який має третю групу. Під наглядом чергового або оперативно-ремонтного робітника. З найближчих до робочого міста струмоведучих частин до наступних доторканню повинна бути знята напруга або вони повинні бути огорожені. Відключене положення комутаційних апаратів до 1000 В з недоступними для огляду контактами (автоматичні вимикачі, пакетні вимикачі, рубильники в закритому виконанні тощо) визначається перевіркою відсутності на їх затискачах або на відходячих шинах, проводах або затискачах обладнання, яке відключається цими комутаційними апаратами.

В електроустановках до 1000 В при роботах на збірних шинах РУ, щитів, збірок напруга з шин повинна бути знята та шини (за винятком шин, які виконані ізолюваним проводом) повинні бути заземлені. Необхідність та можливість встановлення на приєднання цих РУ, щитів, збірок та підключеного до них обладнання визначає працівник, який видає наряд (розпорядження). Перед допуском до роботи на електродвигунах насосів, димососів та вентиляторів, якщо можливо обертання електродвигунів від з'єднаних з ними механізмів, повинні бути закриті та заперті на замок засувки цих механізмів, а також прийняті заходи для гальмування ротора електродвигунів.

Випробування електроприводів разом з виконуючим механізмом потрібно проводити з дозволу начальника зміни технологічного цеху, в якому вони встановлені.

При видачі робиться запис в оперативному журналі технологічного цеху, а отриманні цього дозволу - в оперативному журналі цеху (ділянки), який проводить випробування.

7.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

7.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні встановлюють оптимальну та допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення.

Таблиця 7.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості Па	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення нормованих значень руху повітря проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

7.2.2 Склад повітря робочої зони

Робочою зоною вважається простір, який обмежений огорожуючими конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем підлоги або площини, на яких знаходяться місця постійного або непостійного перебування працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу атмосферного повітря і впливу на нього ряду шкідливих виробничих факторів, утворених в процесі трудової діяльності людини. Склад повітря залишається постійним. Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³.

Таблиця 7.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Окис вуглецю		20	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів по очищенню

області. Необхідно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (зернистість), тим вище небезпека.

Тому необхідно здійснювати наступні заходи:

- очищувати металевий пил якнайчастіше.
- щодня протирати гарячі поверхні.
- принаймні, двічі в рік проводити генеральне прибирання всіх областей, включаючи кроквяні ноги, з використанням продувки або пилососа.
- при високих концентраціях обробляти області по частинам.

Низька вологість збільшує потенційну небезпеку, це повинне прийматися в увагу при продувках.

Планувати продувки або прибирання так щоб вони приходилось на час коли устаткування виключене, як, наприклад, у другу половину дня п'ятниці або на вихідні.

7.2.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення. КЕО при природному та сумісному освітленнях.

Характеристика зорової роботи - роботи середньої точності; розряд - IV; підрозряд зорової роботи – а; контраст об'єкту розпізнавання – малий; характеристика фону – темний.

Бокове КЕО, %: природне 1,5; суміщене 0,9.

Нормовані значення КЕО для приміщень визначаються за формулою:

$$e_N = e_H \cdot m_N, \quad (10.1)$$

$$e_N = 1,5 \cdot 0,75 = 1,2\%,$$

де e_H – значення КЕО для будинків;

m – коефіцієнт сонячності клімату - 0,75, вікна зорієнтовані на схід.

Штучне освітлення, лк:

- загальне 75лк;

Для забезпечення нормативного значення e_{min} передбачено:

Штучне освітлення в приміщенні цеху забезпечується світильниками типу РСР08×250 (однолампові) з лампами ДРЛ-250.

7.2.4 Виробничий шум

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки».

Таблиця 7.3 – Рівень звукового тиску.

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.

7.2.5 Виробничі вібрації

У нашому цеху присутня вібрація типу – За. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання.

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у табл. 7.4.

Таблиця 7.4 - Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Категорія вібрації по санітарним нормам	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		м·с-2	ДБ	м·с-2·10-2	ДБ
За	Zo, Yo, Xo	0,1	100	0,2	92

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: зміна конструктивних елементів машин; застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом [27-31].

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода автономного транспортного засобу» були запропоновані рішення щодо підвищення енергетичної ефективності функціонування електропривода та отримані такі результати:

1. Запропоновано рекомендації щодо вибору варіанта компоновання тягової системи транспортного засобу для підвищення його енергоефективності.

2. Запропоновано методику визначення та розрахунку параметрів основних компонентів ОППН тягового привода електромобіля та надано рекомендації щодо проектування системи управління багатоканальних перетворювачів постійної напруги.

3. Розроблена математична модель тягового електрообладнання електромобіля на базі синхронного електродвигуна з постійними магнітами (СДПМ) та ОППН, інтегрованого в силове коло з метою підвищення напруги тягового джерела струму.

4. Запропонована модель двонаправленого перетворювача постійної напруги в складі силової установки електромобіля в середовищі ППП Matlab Simulink. Були побудовані моделі окремих вузлів та агрегатів, а саме: імітаційна модель акумуляторної батареї; імітаційна модель синхронного двигуна з постійними магнітами; імітаційна модель трифазного інвертора з системою управління; імітаційна модель трьохканального двонаправленого перетворювача постійної напруги.

5. Виконано техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропривода. Визначено, що за рахунок впровадження запропонованих рішень досягається економія річних експлуатаційних витрат. Це підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

6. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Yu, H., Wang, Y., Bortoff, S.A., Ueda, K Energy-Efficient Trajectory Planning for a Mobile Agent by Using a Two-Stage Decomposition Approach // World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC). - 2014
2. Zhao, Y., Wang, Y., Bortoff, S.A., Nikovski, D Energy-Efficient Collision-Free Trajectory Planning Using Alternating Quadratic Programming // American Control Conference (ACC). – 2014
3. International Energy Agency. Global EV Outlook 2023 Catching up with climate ambitions / [Электронный ресурс] // IEA – International Energy Agency : [сайт]. — URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacfl4d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf> (дата обращения: 03.06.2023).
4. Xu G., Zheng C., Zhang Y., Xu K., Liang J. Energy Efficiency of Electric Vehicles – Energy Saving and Optimal Control Technologies / Xu G., Zheng C., Zhang Y., Xu K., Liang J. [Электронный ресурс] // Intechopen : [сайт]. — URL: <https://www.intechopen.com/chapters/47720> (дата обращения: 03.06.2023).
5. Xu G., Li W., Xu K., Song Z. An Intelligent Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles // Energies. - 2011. - №4. - С. 1461-1477.
6. Naseri F., Barbu C., Sarikurt T. Optimal sizing of hybrid high-energy/highpower battery energy storage systems to improve battery cycle life and charging power in electric vehicle applications // Journal of Energy Storage. - 2022. - №55. - С. 1-20.
7. Wang J., Yuan X., Atallah K. Design Optimization of a Surface-Mounted Permanent-Magnet Motor With Concentrated Windings for Electric Vehicle Applications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. - 2013. - №62. - С. 1053-1064.
8. Zhao W., Zhao F., Lipo T., Kwon B. Optimal Design of a Novel V-Type Interior Permanent Magnet Motor with Assisted Barriers for the Improvement of Torque Characteristics // IEEE Transactions on Magnetics. - 2014. - №50. - С. 1-4.

9. Yamazaki K., Kato Y., Ikemi T., Ohki S. Reduction of Rotor Losses in Multilayer Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors by Introducing Novel Topology of Rotor Flux Barriers // IEEE Transactions on Industry Applications. - 2013. - №50. - С. 1220-1226.

10. Тімков О.М. Історія створення та перспективи розвитку гібридних автомобілів/ О.М. Тімков// Автошляховик України. Вісник центрального наукового центру транспортної академії України. — 2010. — №13. — С. 69–71.

11. Allen E.Fuhs. Hybrid vehicles and the future of personal transportation / Allen E.Fuhs. — CRC Press, 2008. — 504 p.

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

13. Prasun Mishra. Design and Implementation of Speed Controller with Anti-Windup Scheme for Three Phase Induction Motor Used in Electric Vehicle, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 89 – No 9, March 2014, Режим доступу: https://www.researchgate.net/profile/Prasun_Mishra3/publication/262985880_Design_and_Implementation_of_Speed_Controller_with_Anti-Windup_Scheme_for_Three_Phase_Induction_Motor_Used_in_Electric_Vehicle/links/592013ae458515e3d401ceec/Design-and-Implementation-of-Speed-Controller-with-Anti-Windup-Scheme-for-Three-Phase-Induction-Motor-Used-in-Electric-Vehicle.pdf

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

15. Markel T. Energy storage system considerations for grid-charged hybrid electric vehicles [Електронний ресурс] / T. Markel, A. Simpson. - Режим доступу: <http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/38538.pdf>

16. Burke A. Review of ultracapacitor technologies for vehicle Applications [Електронний ресурс] / A. Burke. - Режим доступу: http://www.nesscAppcom/data_nesscap/papers/2001/Review%20of%20Ultracapacitor%20Technologies%20for%20Vehicle%20APplication.pdf.

17. Espanet C. In-wheel motor for a small hybrid electric vehicle: design, realization and experimental characterization / C. Espanet // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). - 2012. - P. 892 - 898.

18. Jain M. Suitability analysis of in-wheel motor direct drives for electric and hybrid electric vehicles / M. Jain, S. S. Williamson // IEEE Electrical Power Energy Conference (EPEC). - 2009. - P. 1 - 5.

19. Fei Xu. Characteristics analysis of multiple in-wheel-induction-motors drive system / Fei Xu, Liming Shi // 2011 IEEE International Conference on Industrial Technology. - 2011. - P. 121 - 126.

20. Miyamasu M. Efficiency comparison between Brushless dc motor and Brushless AC motor considering driving method and machine design /M. Miyamasu, K. Akatsu // IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. - 2011. - P. 1830-1835.

21. K. Jaber, A. Fakhfakh and R. Neji. Modeling and Simulation of High Performance Electrical Vehicle Powertrains in VHDL-AMS, Electrical Vehicle Design and Modeling, 2011, 25-40 pp., Режим доступу: <https://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations/modeling-and-simulation-of-highperformance-electrical-vehicle-powertrains-in-vhdl-ams/>

22. Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2022)», Вінниця, 2022. [Електронний ресурс]. URL: – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 3 с.

23. Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода автономного транспортного засобу / В.П. Шестопад, В.С. Бомбик, О.А. Паянок – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)», [Електронний ресурс]. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/schedConf/presentations>, – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 3 с.
24. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. - 404 с.
25. Розробка і реалізація ПІД-регуляторів в середовищі Matlab [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://matlab.com>
26. Демов О. Д., Бірюков О. О., Мельничук Л. М., Демов А. Д., Бірюков А. А., Мельничук Л. М., Demov O. D., Biryukov A. A., Melnychuk L. M.. Розрахунок собівартості електроенергії на промисловому підприємстві. Демов О. Д. Розрахунок собівартості електроенергії на промисловому підприємстві [Текст] : навчальний посібник / О. Д. Демов, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 92 с.
27. НПАОП 40.1-1.32-01.(ДНАОП 0.00-1.32-01).Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.[Чинний від 2002-01-01].URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01>.
28. ДСТУ 2848-94 Апарати електричні комутаційні. Основні поняття. Терміни та визначення.
29. ДСТУБ В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
30. EN 61800-3:2004 Adjustable speed electrical power drive systems. - Part 3: EMC requirements and specific test methods (Системи силового електроприводу з регульованою швидкістю. Частина 3. Вимоги до електромагнітної сумісності та спеціальні методи випробування).

31. Правила улаштування електроустановок. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Відокремлений підрозділ «Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України» державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НПЦР ОЕС України), Наказ Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476.

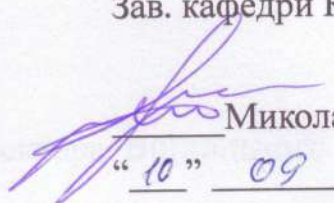
Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

К.Т.Н., доц.

 Микола МОШНОРІЗ

« 10 » 09 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

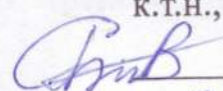
на магістерську кваліфікаційну роботу

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

08-24.МКР.015.00.000 ТЗ

Керівник роботи

К.Т.Н., доц.

 Вадим БОМБИК

« 10 » 09 2024 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-236

 Віталій ШЕСТОПАЛ

« 10 » 09 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода автономного транспортного засобу».

Скорочене найменування розробки – «Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода автономного транспортного засобу».

Замовник – Кафедра електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем дипломного проектування.

3 Призначення розробки і галузь використання

Електричні автономні транспортні засоби є однією з технологій, що найбільш швидко розвиваються. Їх застосування може стати вирішенням проблеми ефективного використання енергії та зниження шкоди навколишньому середовищу, що наноситься двигунами внутрішнього згоряння. На сьогоднішній день конструювання електромобілів вийшло значно новий рівень, проте щодо висока вартість і обмеженість запасу автономного ходу залишаються головними проблемами. Збільшення автономного ходу електричних транспортних засобів, зараз, досягається різними способами.

4 Вимоги до розробки

До компонентів електромобілів, як і до будь-яких інших транспортних засобів, пред'являються вимоги високої надійності безпеки. Тому до ППН, які використовуються в схемі силового електрообладнання електромобіля також пред'являються аналогічні вимоги при проектуванні та розрахунку. На таких вимог можна віднести такі:

- номінальна вхідна напруга перетворювача повинна відповідати напрузі блоку акумуляторної батареї;

- межі зміни вихідної напруги перетворювача повинні відповідати напрузі на вході трифазного інвертора;
- вихідна напруга перетворювача має бути стабілізованою незалежно від рівня заряду АБ;
- наявність сигнальних попереджень при підвищенні вхідних та вихідних напруг вище максимальної;
- наявність захисту та сигнальних попереджень при коротких замиканнях та перевантаженні;
- наявність системи охолодження (повітряне або рідинне);
- механічні та кліматичні чинники, при яких ОППН повинен забезпечити безперебійну та надійну роботу;
- по функціональності ППН повинен бути двонаправленим для забезпечення зворотної передачі потужності рекуперації в гальмівних режимах електромобіля.

5 Технічні характеристики

Таблиця 5.1 – Дані для проведення тягового розрахунку

Параметри	Умовні позначення	Значення параметрів
Маса електромобіля, кг	m_a	1800
Площа поперечного перерізу електромобіля, м ²	S_a	2,2
Коефіцієнт аеродинамічного опору, у.о.	C_x	0,3
Радіус колеса електромобіля, м.	r_k	0,323
ККД механічної трансмісії, у.о.	η_{mm}	0,96
Передаточне число головної передачі, у.о.	i_{zn}	4,3
Передаточне число коробки передач, у.о.	i_{kp}	1,645
Кут нахилу дорожнього полотна, град.	α	0

6 Комплектація розробки

Мережа 220/380 В – побутова мережа або станція швидкої зарядки; ЗП АС/DC – зарядний пристрій; ВАБ 400 В – високовольтна акумуляторна батарея; ПП DC/DC 400/12D – проміжний перетворювач; ДППН – двонаправлений перетворювач постійної напруги; НАБ 12В – низьковольтна

бортова акумуляторна батарея; СМПМ – синхронна машина з постійними магнітами; ПЗПГ – пристрій завдання прискорення та гальмування.

7 Джерела розробки

2. Zhao, Y., Wang, Y., Bortoff, S.A., Nikovski, D Energy-Efficient Collision-Free Trajectory Planning Using Alternating Quadratic Programming // American Control Conference (ACC). – 2014

3. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. - 404 с.

4. EN 61800-3:2004 Adjustable speed electrical power drive systems. - Part 3: EMC requirements and specific test methods (Системи силового електроприводу з регульованою швидкістю. Частина 3. Вимоги до електромагнітної сумісності та спеціальні методи випробування).

5. Правила улаштування електроустановок. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Відокремлений підрозділ «Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України» державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НПЦР ОЕС України), Наказ Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476.

8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

9 Конструктивне виконання

Складові установки виготовляються окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у пило-вологозахищеному виконанні.

10 Елементна база

В схемі можна виділити три основні частини: програмований контролер, драйвери IGBT-транзисторів та силова схема трьохканальний ОПН. Драйвери IGBT-транзисторів в цій схемі є проміжною ланкою між силовими перетворювачами та керуючим контролером, завдання яких полягає у формуванні необхідного рівня керуючих сигналів (підсилювач імпульсів) для силових транзисторів VT1u ... VT3u та VT1d ... VT3d.

В якості системи управління перетворювачем, тобто генератора імпульсів для транзисторного ключа G1, використовується програмований мікроконтролер сімейства ATmega – це мікропроцесор, який має в своїй структурі процесор (CPU), генератор тактових сигналів (GCK), постійний запам'ятовуючий пристрій, виконаний за технологією флеш для зберігання програм (FlashROM), постійний запам'ятовуючий пристрій, виконаний за технологією EEPROM для зберігання даних, оперативний запам'ятовуючий пристрій статичного типу для зберігання даних (SRAM) і набір периферійних пристроїв [39].

11 Технічне обслуговування та ремонт

До оперативного обслуговування електроустановками допускаються працівники, які знають їхні схеми, інструкції з експлуатації, особливості конструкції та роботи обладнання і пройшли навчання та перевірку знань.

12 Порядок контролю та прийняття

Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО
ЗАСОБУ**

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження

Об'єктом є система тягового електроприводу автономного транспортного засобу з акумуляторним джерелом живлення.

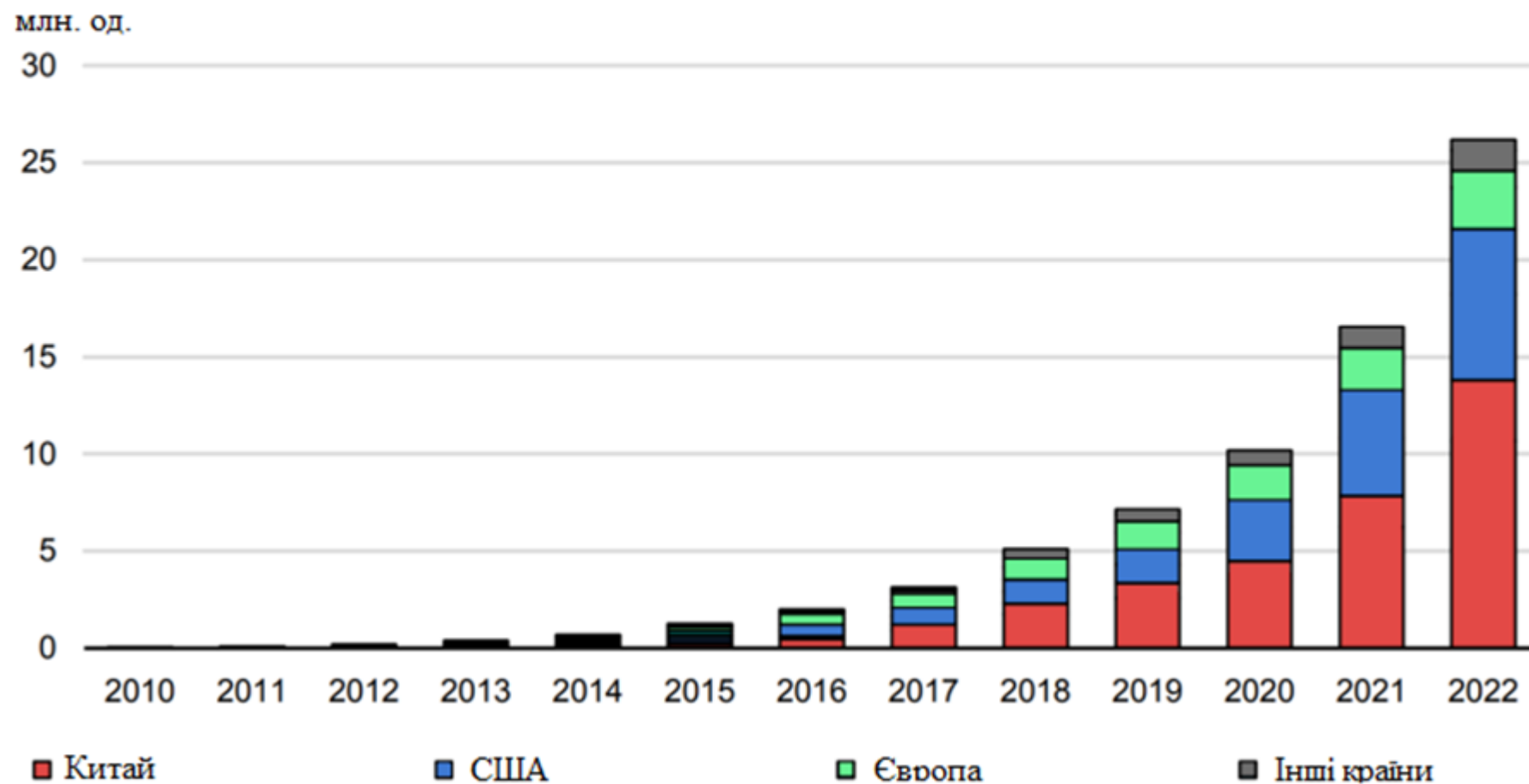
Предметом є математичні моделі та структури, алгоритми керування тяговим електроприводом, які дозволяють підвищити ефективність електропривода автономного транспортного засобу з акумуляторним джерелом живлення.

Мета і завдання дослідження. магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності підвищення енергетичної ефективності системи тягового електроприводу автономного транспортного засобу з акумуляторним джерелом живлення за рахунок раціонального вибору компоновання тягової системи та використання сучасних алгоритмів керування.

До **задач** магістерської кваліфікаційної роботи можна віднести:

- Проаналізувати варіанти компоновання тягової системи автономного транспортного засобу та існуючі методи та засоби підвищення його енергоефективності.
- Запропонувати методику визначення та розрахунку параметрів основних компонентів ОППН тягового привода електромобіля та надати рекомендації щодо проектування системи управління багатоканальних перетворювачів постійної напруги.
- Розробити математичну модель тягового електрообладнання електромобіля на базі синхронного електродвигуна з постійними магнітами (СДПМ) та ОППН, інтегрованого в силове коло з метою підвищення напруги тягового джерела струму.
- Дослідити підвищення ефективності електропривода і поліпшення масогабаритних показників електричного транспортного засобу із застосуванням перетворювача постійної напруги.
- Запропонувати модель двонаправленого перетворювача постійної напруги в складі силової установки електромобіля в середовищі ППП Matlab Simulink.
- виконати техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропривода та обґрунтувати правильність виконання досліджень та економічну доцільність впровадження технічних рішень.

АКТУАЛЬНІСТЬ СУЧАСНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ



ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ КОМПОНОВКИ СИСТЕМИ ТЕП

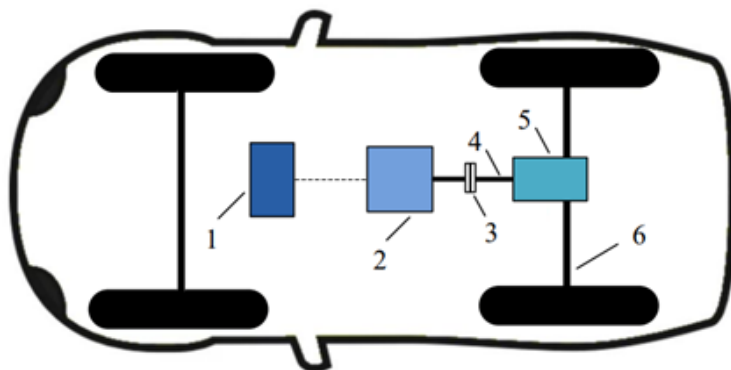


Рисунок 1 – Тягова система електричного ТЗ з централізованим приводом

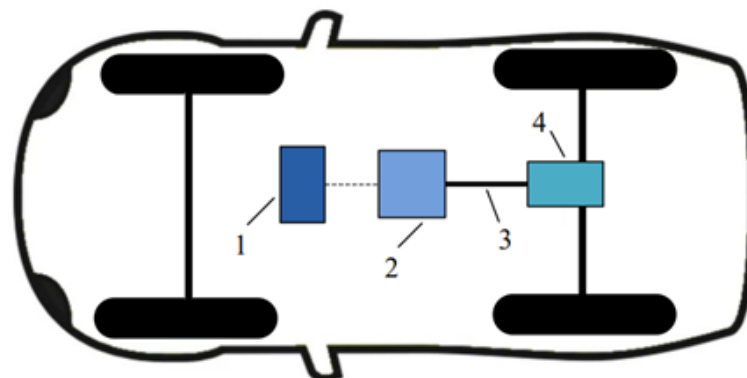


Рисунок 2 – Тягова система електричного ТЗ з централізованим приводом без зчеплення

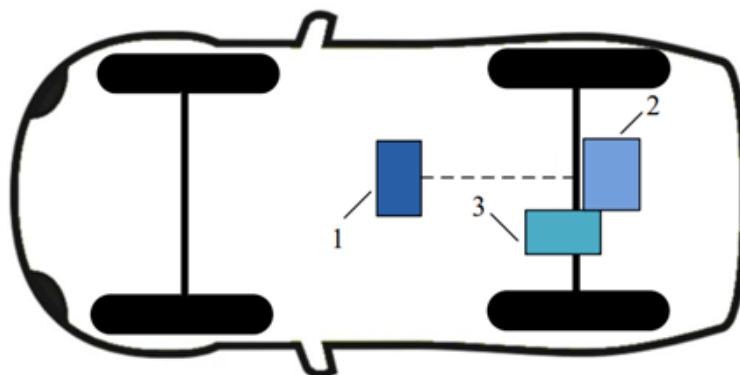


Рисунок 3 – Тягова система електричного ТЗ з осьовим диференціалом

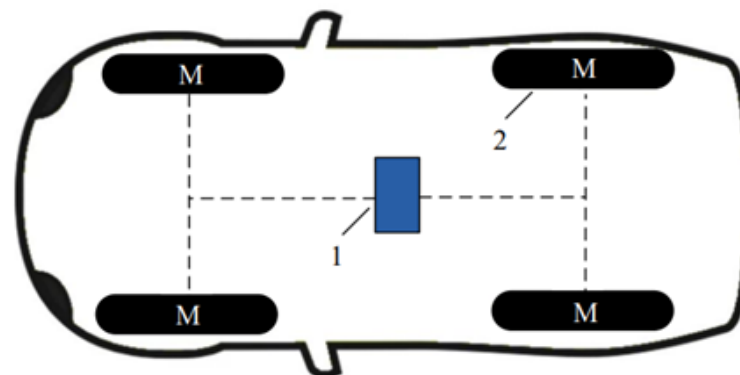


Рисунок 4 – Тягова система електричного ТЗ на базі мотор-колів

На рисунках прийняті такі позначення: 1 – система накопичення енергії; 2 – електричний двигун; 3 – зчеплення; 4 – редуктор; 5 – диференціал.

Вимоги та критерії побудови ТЗ з тяговим електроприводом

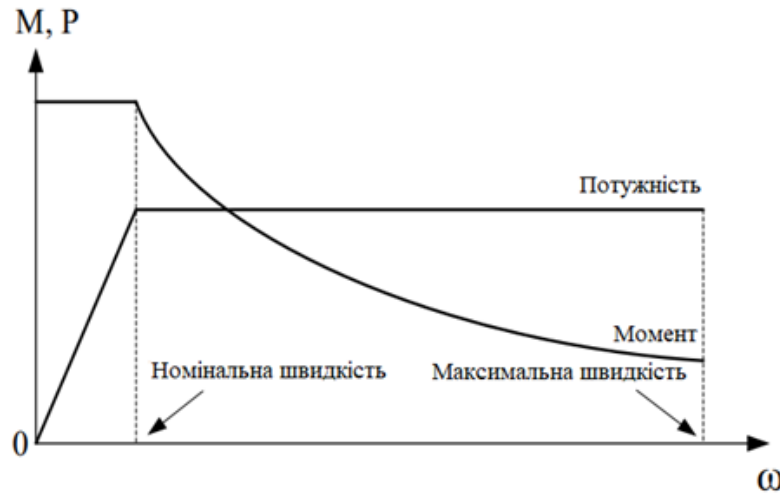


Рисунок 5 – Вихідні характеристики тягового двигуна

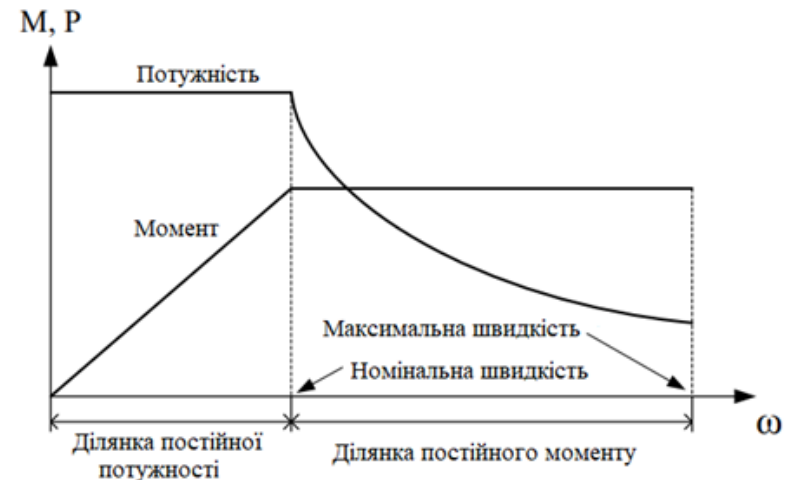


Рисунок 6 – Характеристика крутного моменту та швидкості ТД

В складі двигун-колів можуть застосовуватися електричні двигуни, характеристики яких відповідають наступним вимогам:

1. високий крутний момент на низьких швидкостях;
2. широкий діапазон регулювання швидкості;
3. Високий коефіцієнт питомої потужності.

Електричні двигуни, які відповідають усім вищезазначеним вимогам:

1. асинхронний електродвигун;
2. синхронний двигун із постійними магнітами;
3. безщітковий двигун постійного струму;
4. вентильний реактивний електродвигун.

Вимоги та критерії побудови ТЗ з тяговим електроприводом

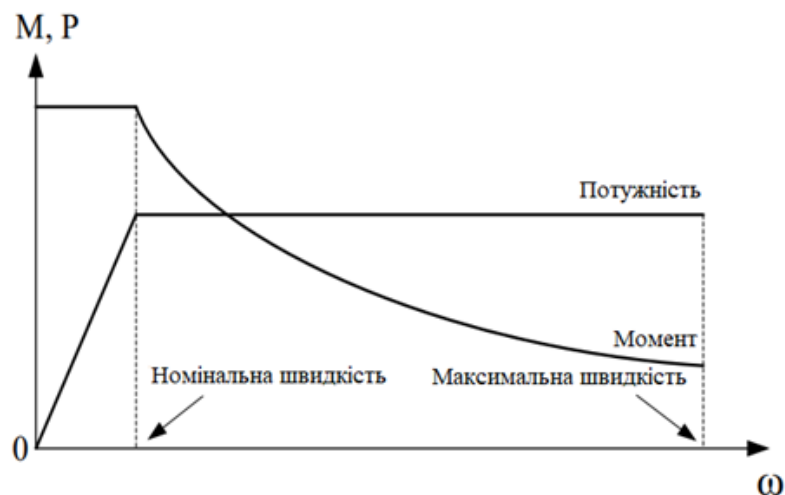


Рисунок 5 – Вихідні характеристики тягового двигуна

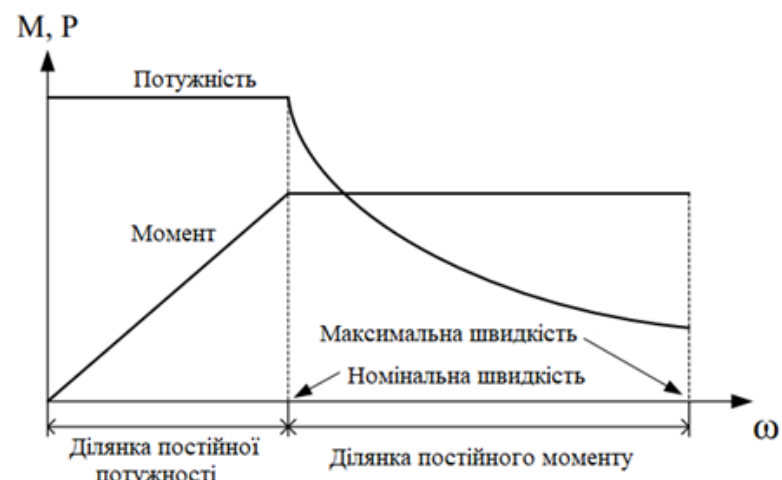


Рисунок 6 – Характеристика крутного моменту та швидкості ТД

В складі двигун-колів можуть застосовуватися електричні двигуни, характеристики яких відповідають наступним вимогам:

1. високий крутний момент на низьких швидкостях;
2. широкий діапазон регулювання швидкості;
3. Високий коефіцієнт питомої потужності.

Електричні двигуни, які відповідають усім вищезазначеним вимогам:

1. асинхронний електродвигун;
2. синхронний двигун із постійними магнітами;
3. безщітковий двигун постійного струму;
4. вентильний реактивний електродвигун.

ІСНУЮЧІ РІШЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

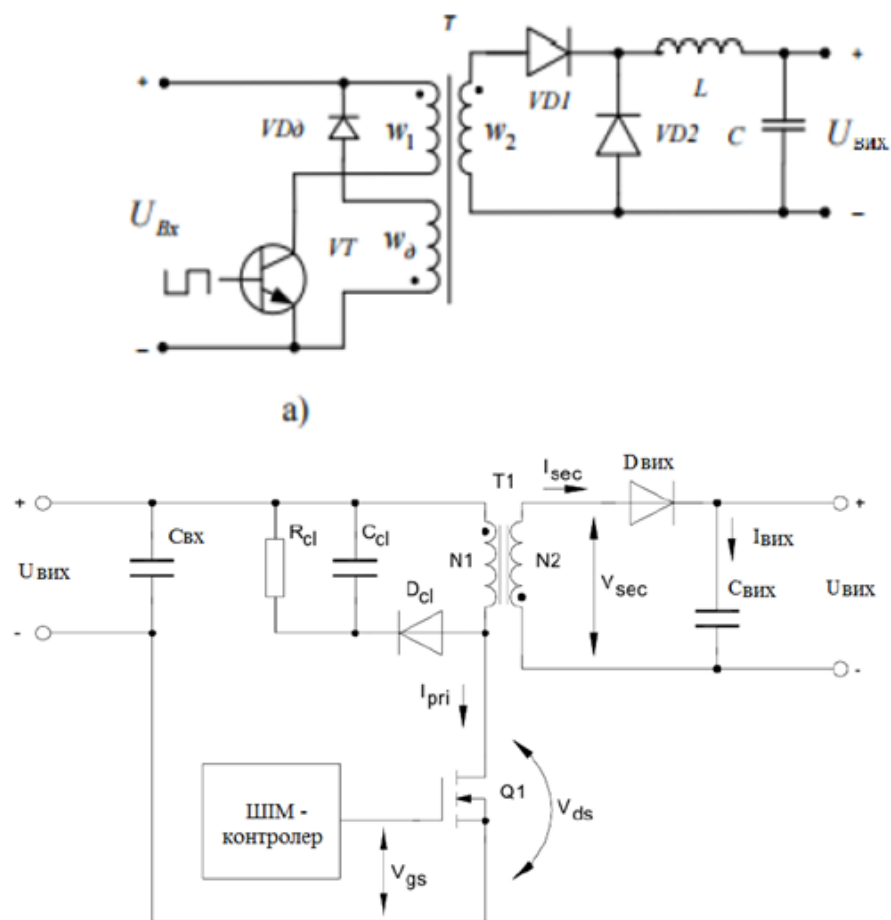


Рисунок 7 – Зворотногоходовий перетворювач постійної напруги

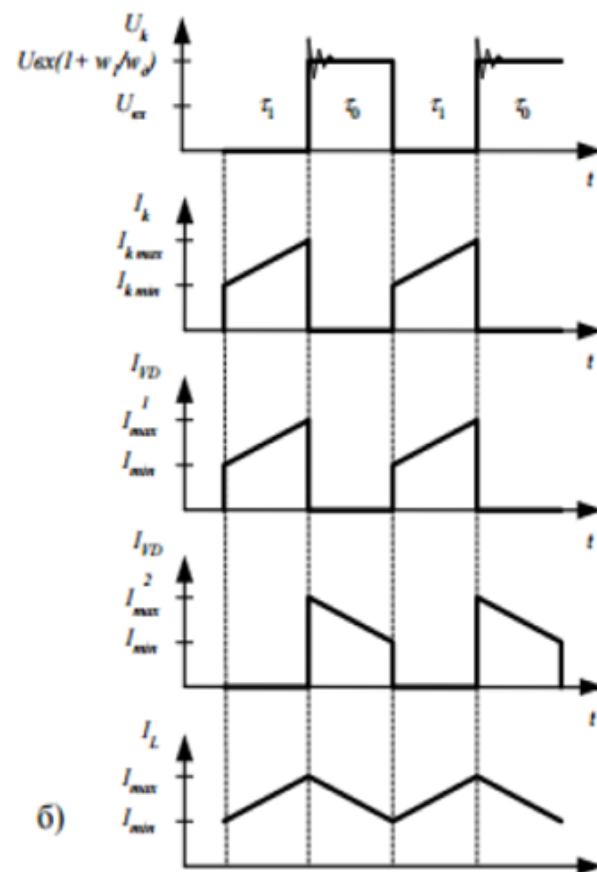


Рисунок 8 – Схема (а) і часові діаграми роботи (б) прямоходового перетворювача

ІСНУЮЧІ РІШЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

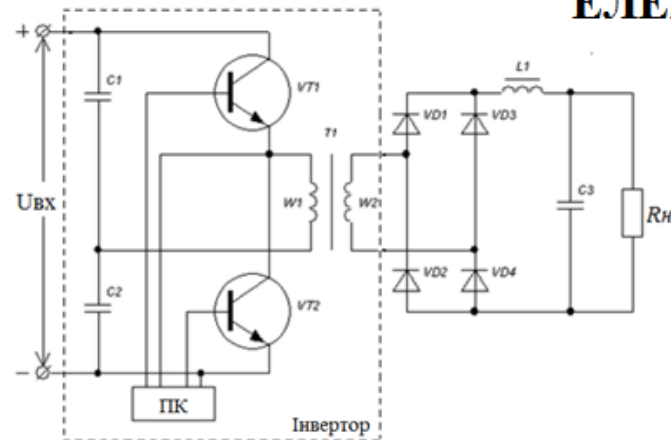


Рисунок 9 – Схема двохтактного напівмостового ППН

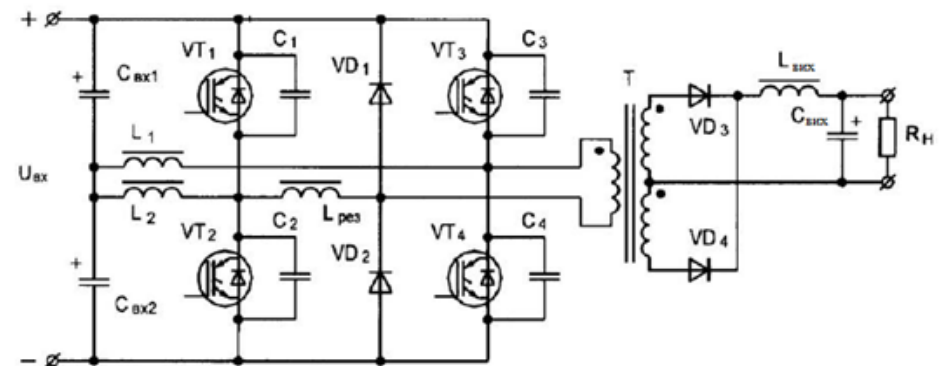


Рисунок 10 – Схема мостового перетворювача постійної напруги

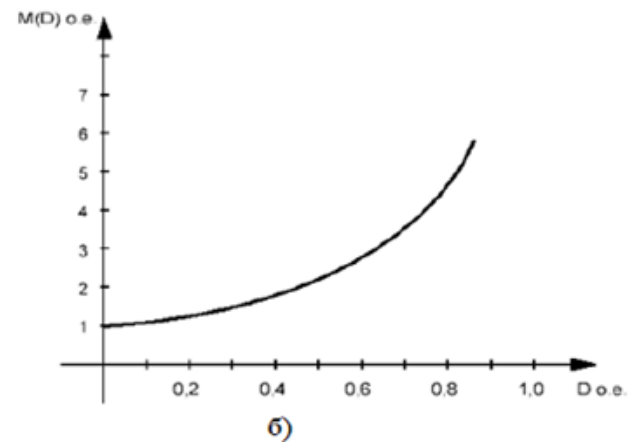
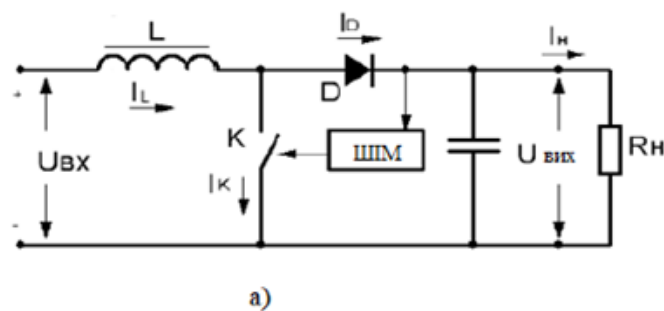


Рисунок 11 – Схема підвищуючого перетворювача постійної напруги (а) та залежність коефіцієнта перетворення від коефіцієнта заповнення (б)

ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ППН ТЕП ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ



Рисунок 10 – Класифікація імпульсних ППН



Рисунок 11 – Функціональна схема ОПН

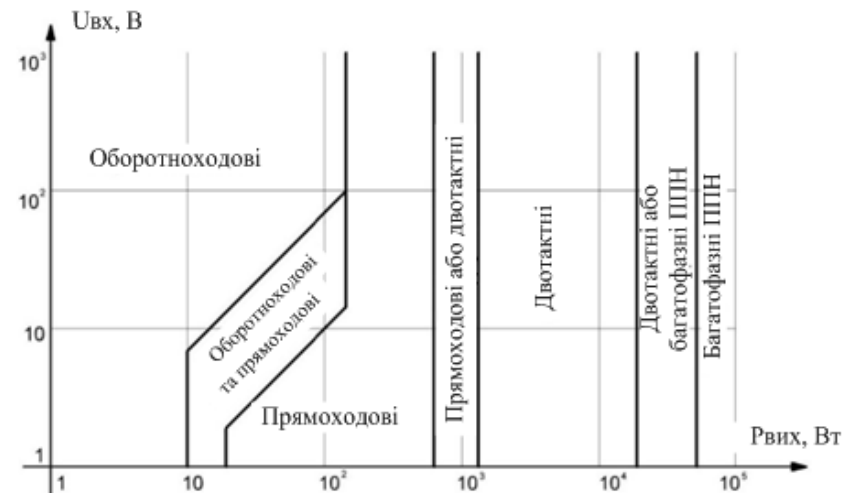


Рисунок 12 – Вибір перетворювача за вхідною напругою та вихідною потужністю

РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

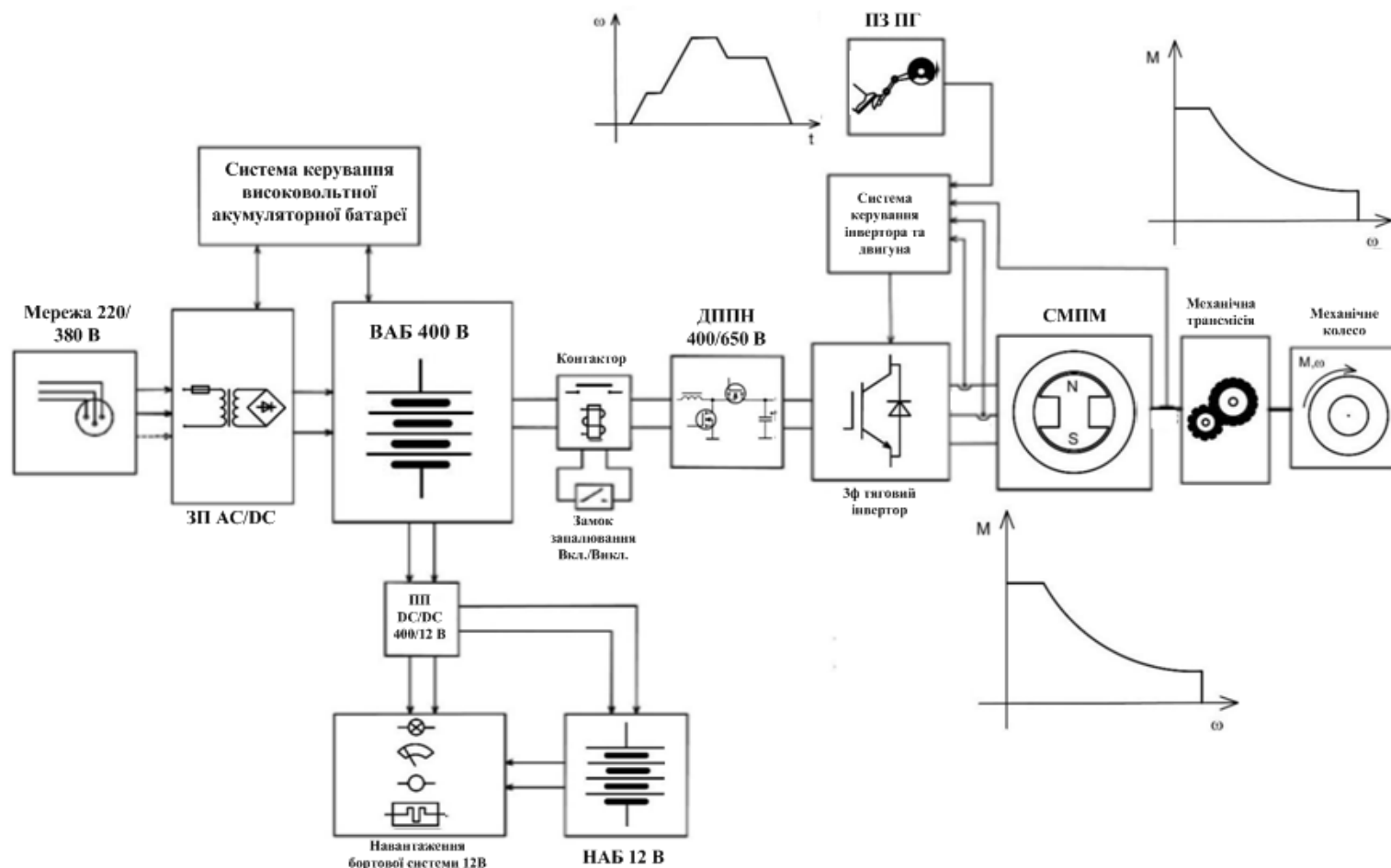


Рисунок 9 – Структурна блок-схема силової установки електромобіля з використанням ОППН: Мережа 220/380 В – побутова мережа або станція швидкої зарядки; ЗП АС/DC – зарядний пристрій; ВАБ 400 В – високовольтна акумуляторна батарея; ПП DC/DC 400/12В – проміжний перетворювач; ДППН – двонаправлений перетворювач постійної напруги; НАБ 12В – низьковольтна бортова акумуляторна батарея; СМПМ – синхронна машина з постійними магнітами; ПЗПГ – пристрій завдання прискорення та гальмування.

ДЕТАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ОППН ТЕП ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Потужність ОППН в складі електротехнічного комплексу електромобіля визначається виходячи з потужності силового електропривода із врахуванням втрат енергії:

$$P_{\text{ОППН}} = \frac{P_{\text{ТП}}}{\eta_{\text{ТП}}}, \quad (5.1)$$

$$P_{\text{ТП}} = \frac{P_{\text{ТЕД}}}{\eta_{\text{ТЕД}}}, \quad (5.2)$$

$$P_{\text{ТЕД}} = M_{\text{ТЕД}} \cdot \omega_{\text{ТЕД}}, \quad (5.3)$$

де $P_{\text{ОППН}}$, $P_{\text{ТП}}$, $P_{\text{ТЕД}}$ – потужність ОППН, трифазного тягового інвертора та тягового електродвигуна;
 $\eta_{\text{ТП}}$ – ККД трифазного інвертора;

$\eta_{\text{ТЕД}}$, $M_{\text{ТЕД}}$, $\omega_{\text{ТЕД}}$ – ККД, крутний момент та частота обертання тягового електродвигуна.

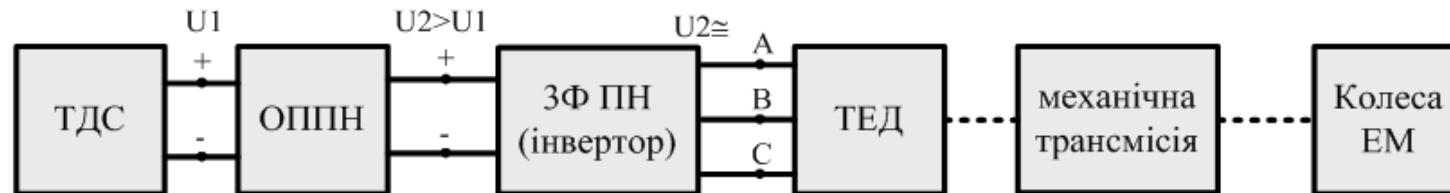


Рисунок 13 – Функціональна схема електромобіля із застосуванням ОППН:



Рисунок 14 – Спрощена функціональна схема ОППН з еквівалентним навантаженням

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КЛЮЧАМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

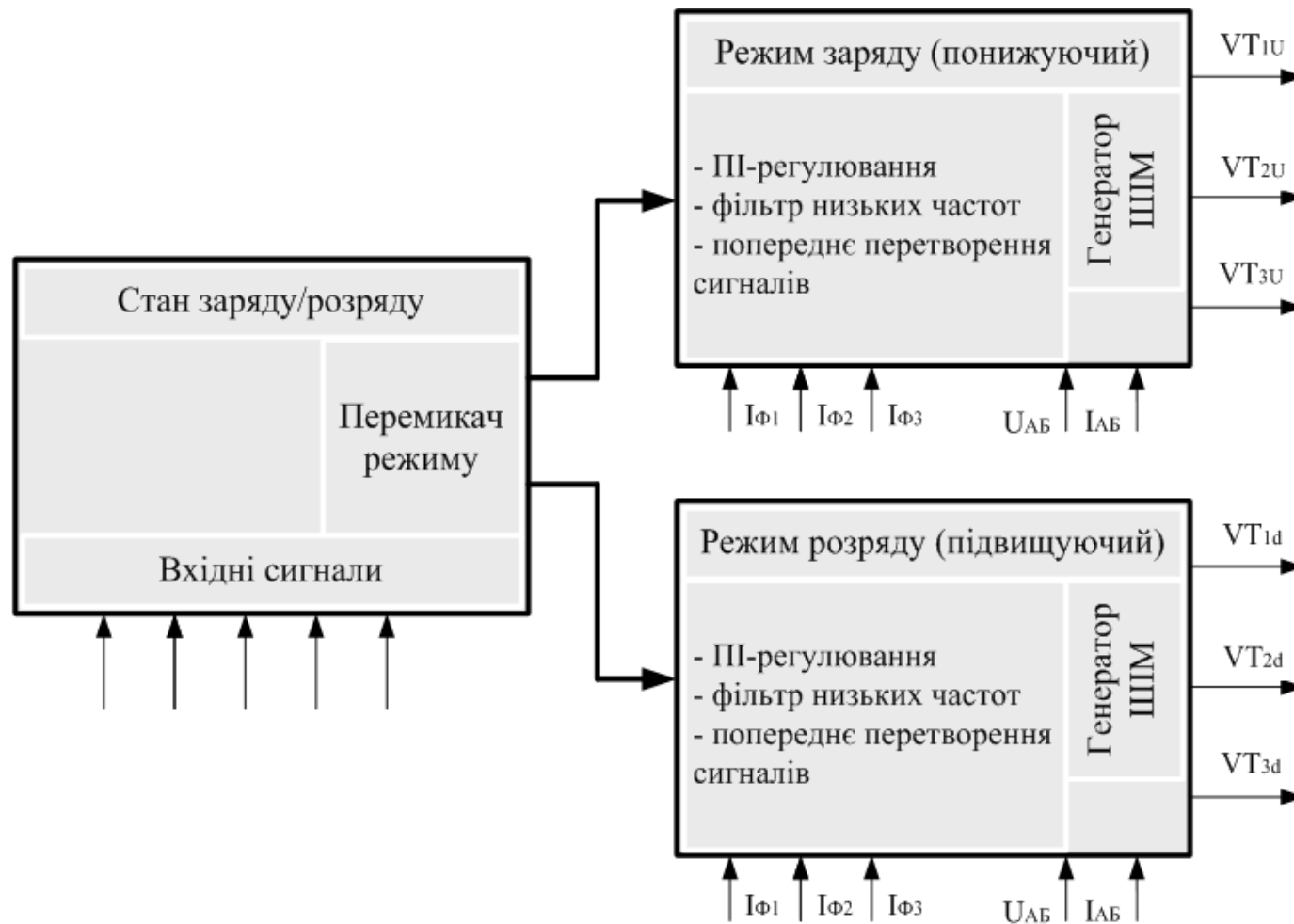


Рисунок 15 – Система керування двонаправленого ППН

РОЗРОБКА СХЕМИ ТРЬОХКАНАЛЬНОГО ОПН ТЕП

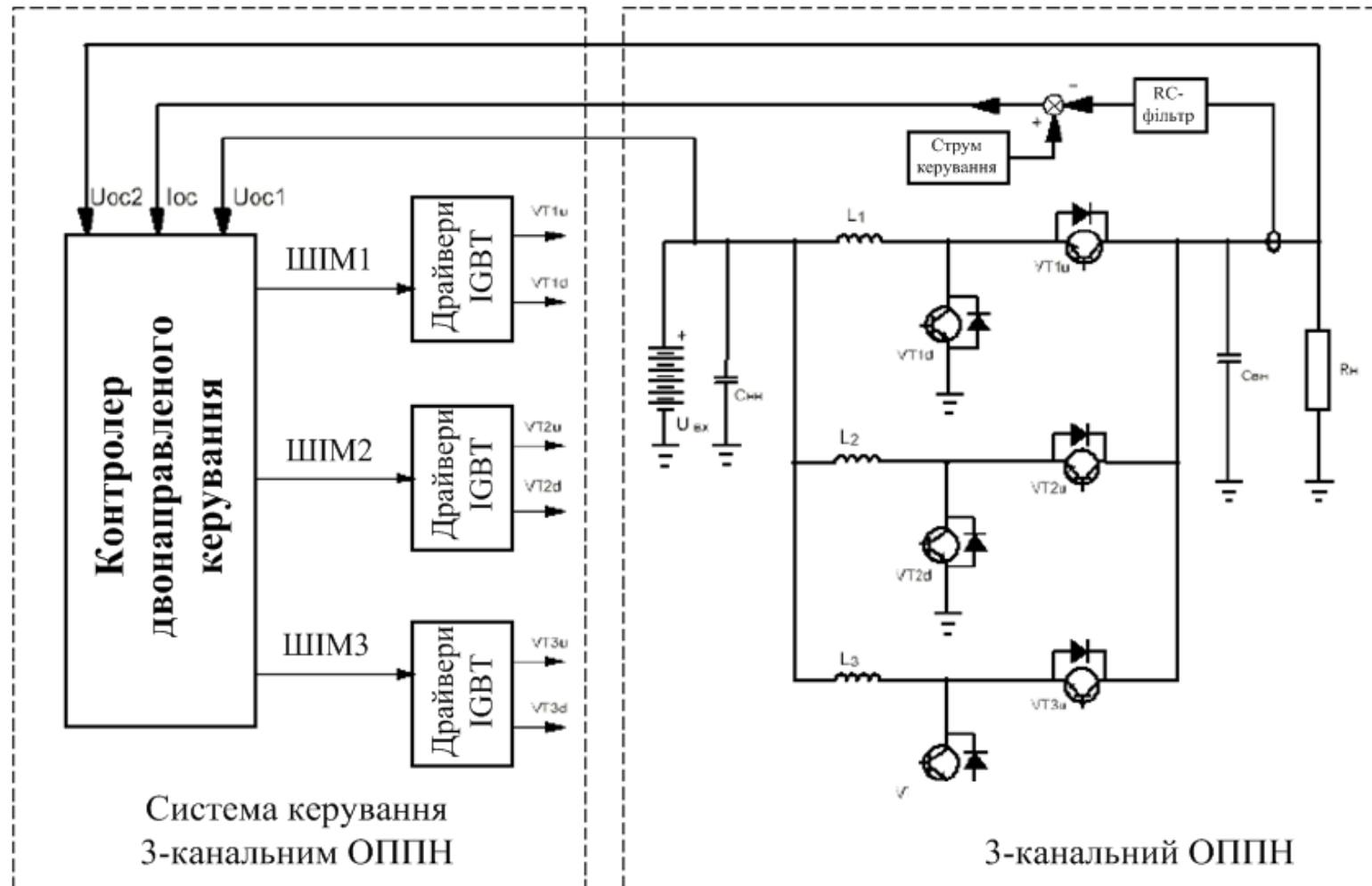


Рисунок 16 – Трьохканальний ОПН з контролером в якості системи керування

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО СДПМ

$$\left\{ \begin{aligned} U_d &= R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \psi_{sq} \cdot \omega_e; \\ U_q &= R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \psi_{sd} \cdot \omega_e; \\ \psi_{sd} &= L_{sd} \cdot I_{sd} + \psi_f; \\ \psi_{sq} &= L_{sq} \cdot I_{sq}; \\ M_e &= \frac{3}{2} Z_p \cdot (\psi_{sd} \cdot I_{sq} - \psi_{sq} \cdot I_{sd}); \\ J \frac{d\omega_r}{dt} &= (M_e - M_c - \beta \cdot \frac{\omega_e}{Z_p}), \end{aligned} \right.$$

де U_d, U_q, I_{sd}, I_{sq} – складові векторів напруги і струмів в осях d і q;

β – коефіцієнт в'язкого тертя.

ψ_d, ψ_q – потокозчеплення статора по осях d і q.

ψ_f – потокозчеплення, створюване постійними магнітами ротора.

L_d, L_q – індуктивності обмоток статора по осях (d, q).

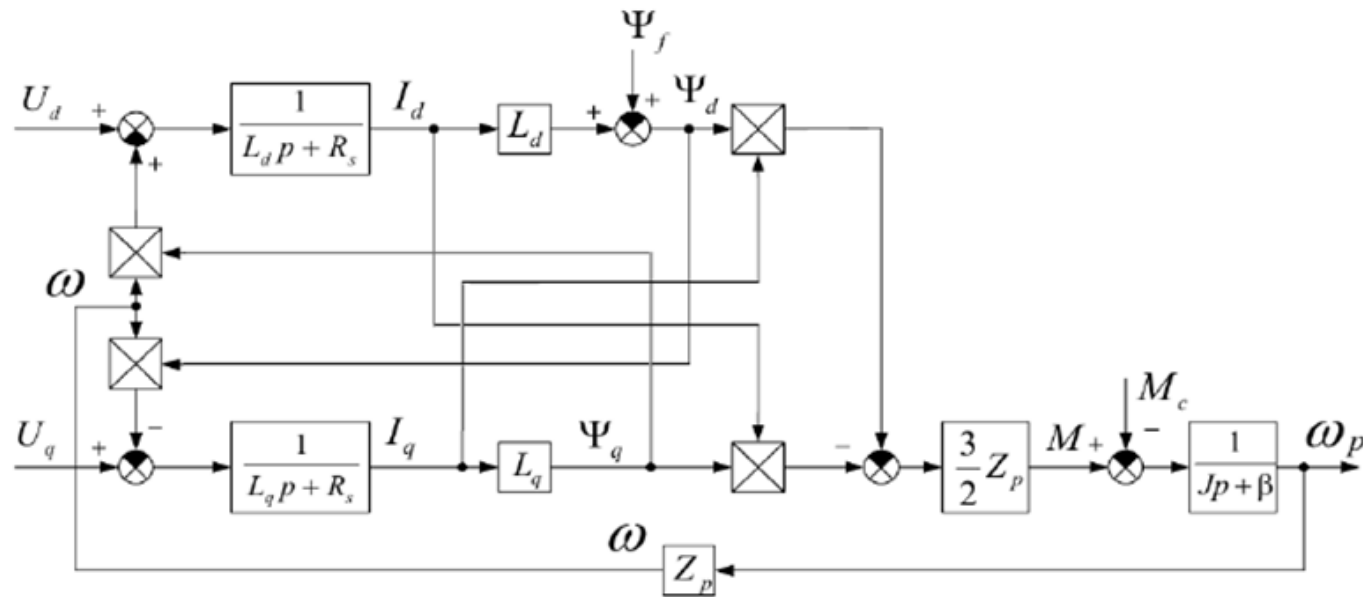


Рисунок 17 – Структурна схема СДПМ у вісях (d, q)

МОДЕЛЮВАННЯ ДВОНАПРАВЛЕНОГО ПІН ТЕП ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

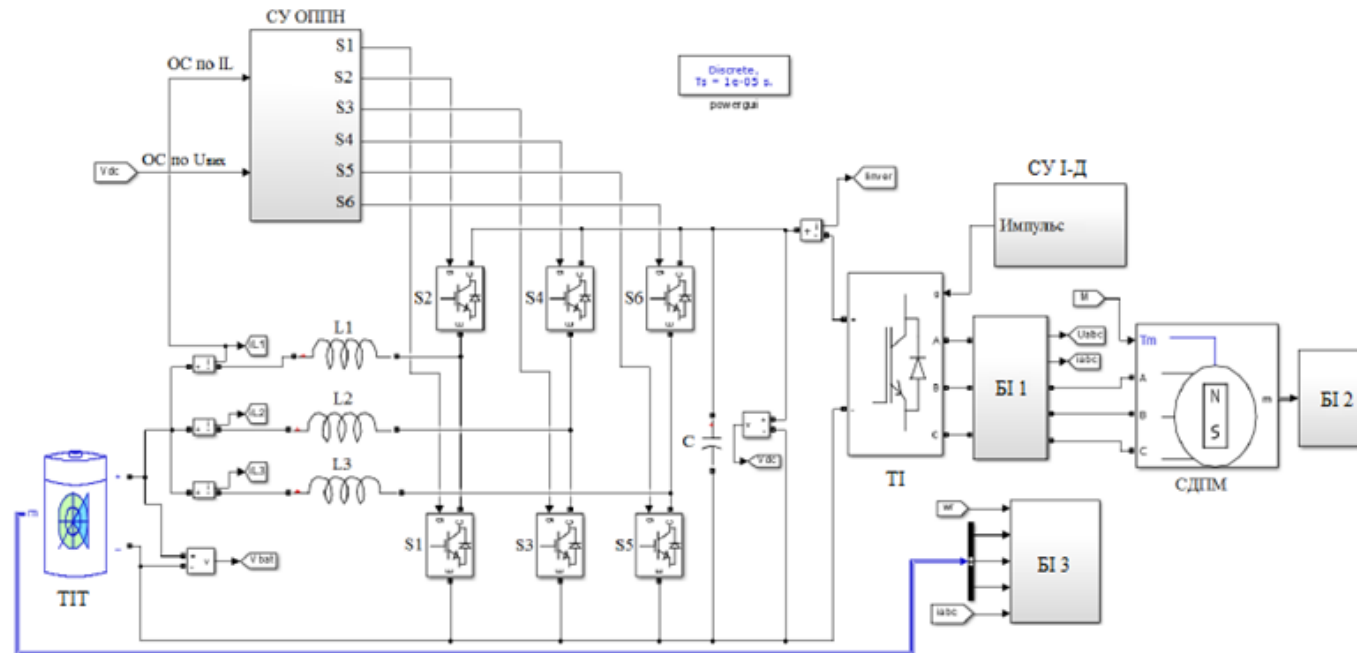


Рисунок 18 – Модель ОППН тягового електропривода

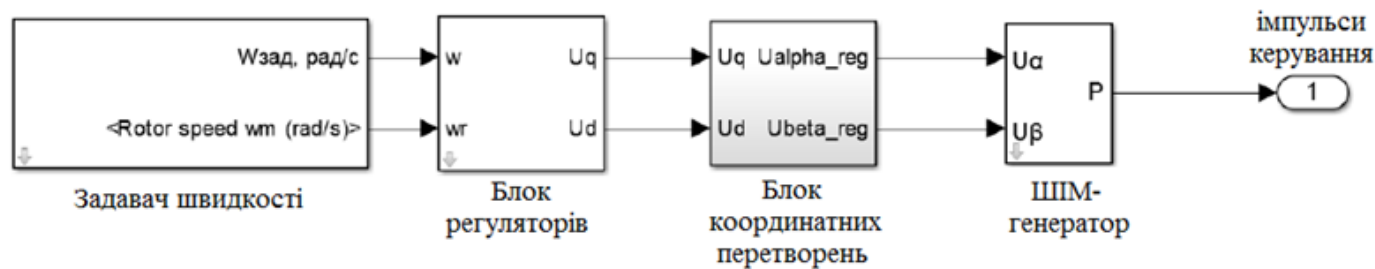


Рисунок 19 – Модель системи керування інвертор-двигун

МОДЕЛЮВАННЯ ДВОНАПРАВЛЕНОГО ПІН ТЕП ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ



Рисунок 20 – Швидкість руху електромобіля



Рисунок 21 – Частота обертання СДПМ електромобіля

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано рекомендації щодо вибору варіанта компоновання тягової системи транспортного засобу для підвищення його енергоефективності.
2. Запропоновано методику визначення та розрахунку параметрів основних компонентів ОППН тягового привода електромобіля та надано рекомендації щодо проектування системи управління багатоканальних перетворювачів постійної напруги.
3. Розроблена математична модель тягового електрообладнання електромобіля на базі синхронного електродвигуна з постійними магнітами (СДПМ) та ОППН, інтегрованого в силове коло з метою підвищення напруги тягового джерела струму.
4. Запропонована модель двонаправленого перетворювача постійної напруги в складі силової установки електромобіля в середовищі ППП Matlab Simulink. Були побудовані моделі окремих вузлів та агрегатів, а саме: імітаційна модель акумуляторної батареї; імітаційна модель синхронного двигуна з постійними магнітами; імітаційна модель трифазного інвертора з системою управління; імітаційна модель трьохканального двонаправленого перетворювача постійної напруги.
5. Виконано техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропривода. Визначено, що за рахунок впровадження запропонованих рішень досягається економія річних експлуатаційних витрат. Це підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.
6. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода автономного транспортного засобу»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-23м

Науковий керівник: ст. викл. Бомбик В.С.
(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності Turnitin

Оригінальність	92 %
Загальна схожість	8 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

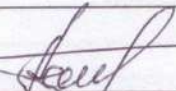
Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор 
(підпис)

Шестопад В.П.
(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

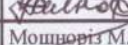
Паянов О.А.
(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби)

(підпис)

(прізвище, ініціали, посада)

					08-24.МКР.015.00.000			
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода автономного транспортного засобу	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Шестопад В.П.		19.12.24				
Перевірив		Бомбик В.С.		19.12.24				
Т. контр.								
						Аркуш	Аркушів	
Регистр				18.12.24		ВНТУ, гр. ЕПА-23м		
Норм. кон.				18.12.24				
Затверд.		Мошноріз М.М.		18.12.24				