

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра компютерні електромеханічні системи і комплекси

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Система автоматизованого керування тяговим електроприводом
транспортного засобу»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕПА-24м

спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Віктор ГУРКІВСЬКИЙ

Керівник: к.т.н., доц. кафедри КЕМСК
Олексій ЖУКОВ

«25» листопада 2025 р.

Опонент: к.т.н., доцент, доцент кафедри КЕМСК
Винниченко С.І.

«19» грудня 2025 р.

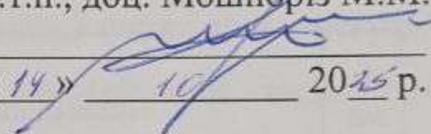
Допущено до захисту

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц. МИКОЛА Мошноріз

«25» листопада 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

ЗАТВЕРДЖУЮ
зав. кафедри КЕМСК
к.т.н., доц. Мошнорізі М.М.

« 14 » 10 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Гурківському Віктору Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система автоматизованого керування тяговим електроприводом транспортного засобу

керівник роботи Жуков Олексій Анатолійович к.т.н. доц.

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

затверджені наказом ВНТУ від « 24 » бересня 2025 року № 313.

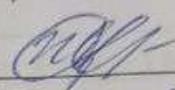
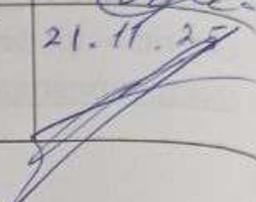
2. Строк подання студентом проекту (роботи): _____

3. Вихідні дані до роботи: Маса електромобіля 1,700 кг. Кількість місць для сидіння 5. Підйом, який має долати електромобіль 18%. Максимальна швидкість 95 км/год. Коефіцієнт корисної дії передачі 0,97. Загальне передаточне число 9,817.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Коротка характеристика виробничого механізму і режимів його роботи. Розрахунок статичних навантажень і тахограми руху робочого органу виробничого механізму. Попередній розрахунок потужності приводного двигуна. Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електропривода. Вибір електродвигуна. Розрахунок динамічних навантажень та побудова навантажувальної діаграми електропривода. Перевірка вибраного двигуна за нагрівом, перевантажувальною здатністю та умовами пуску. Розрахунок статичних характеристик двигуна. Розробка системи керування електричного привода. Моделювання перехідних процесів САЕП. Економічна частина. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Зовнішній вигляд, кінематична схема та тахограми роботи. Схема електрична структурна. Моделювання перехідних процесів. Схема електрична функціональна.

6. Консультанти розділів роботи

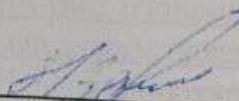
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Жуков О.А. к.т.н., доц, каф. КЕМСК	14.10.25 	24.10.25 
Економічна частина	Шуле Ю.А., к.т.н, доц. каф. ЕСЕЕМ	14.10.25 	21.11.25 

7. Дата видачі завдання «14» 10 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

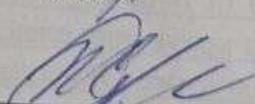
№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	24.09.25	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	28.10.25	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	21.11.25	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	21.11.25	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	21.11.25	
6	Попередній захист МКР	25.11.25	
7	Нормоконтроль МКР	24.11.25	
8	Рецензування МКР	18.12.25	

Студент


(підпис)

Віктор ГУРКІВСЬКИЙ

Керівник роботи


(підпис)

Олексій ЖУКОВ

АНОТАЦІЯ

УДК: 621.311.24

Гурківський В.С. Система автоматизованого керування тяговим електроприводом транспортного засобу. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2025. 120 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 145 назв; рис.: 26; табл. 14.

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано модернізацію тягового електроприводу електромобіля, яка забезпечує плавний пуск і точне регулювання швидкості руху. Проведено розрахунок та обґрунтований вибір тягового електродвигуна, розроблено систему векторного керування з урахуванням енергоощадних режимів роботи. Виконано розрахунки статичних і динамічних характеристик електроприводу, синтезовано регулятори струму, моменту та потокозчеплення, а також побудовано структурну і функціональну схеми системи керування.

Розроблено заходи з охорони праці та безпечної експлуатації електроприводу.

Ключові слова: електропривод, електромобіль, асинхронний двигун, векторне керування, тяговий електропривод, система керування, енергоефективність

ABSTRACT

Gurkivsky V.S. «Automatic Control System of a Traction Electric Drive for Vehicles». Master's thesis in specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, educational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2025. – 120 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 145 titles; fig.: 26; tabl. 14.

In the master's qualification thesis, the modernization of the traction electric drive of an electric vehicle is carried out, which ensures smooth starting and accurate speed control. The calculation and justified selection of the traction electric motor are performed, and a vector control system is developed taking into account energy-saving operating modes. The static and dynamic characteristics of the electric drive are calculated; current, torque, and flux linkage controllers are synthesized; and the structural and functional diagrams of the control system are developed.

Occupational safety and safe operation measures for the electric drive are developed

Keywords: electric drive, electric vehicle, induction motor, vector control, traction electric drive, control system, energy efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ В АВТОТРАНСПОРТІ.....	10
1.1 Актуальність використання електричного приводу в транспортних засобах...	10
1.2 Аспекти використання тягових акумуляторних батарей в електричному транспорті	13
1.3 Тягові електродвигуни та компоновки електроприводу електромобілів.....	17
1.3.1 Аналіз конфігурацій електроприводу та вибір компоновки	23
1.3.2 Обґрунтування вибору тягового електродвигуна	24
2 СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ	28
2.1 Загальна характеристика та конфігурація системи тягового електроприводу електромобіля	28
2.2 Структура та функції основних компонентів електроприводу електромобіля.	29
2.3 Загальна конфігурація системи керування електроприводом електромобіля ..	31
3 РОЗРАХУНОК ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТА ПЕРЕВІРКА ВИБРАНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА	35
3.1 Кінематична схема тягового механізму електромобіля	35
3.2 Розрахунок режимів руху та тахограм електромобіля	36
3.3 Розрахунок приведених інерційних мас і моментів інерції	40
3.4 Визначення максимального моменту та потужності тягового електродвигуна. ...	43
3.5 Розрахунок статичних характеристик електроприводу	49
3.5 Розрахунок динамічних характеристик системи	51
4 СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ	55
4.1 Побудова функціональної схеми системи автоматизованого керування	55
4.2 Перетворення координат у системі векторного керування	58
4.2 Синтез регуляторів системи векторного керування	59

5 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	66
5.1 Побудова моделі САК АД електромобіля	66
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	70
6.1 Визначення величини затрат запропонованого варіанту	70
6.2 Розрахунок основного фонду заробітної плати	71
6.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів	73
6.3 Розрахунок економічної ефективності	75
7 ОХОРОНА ПРАЦІ	76
7.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації електромобіля	77
7.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	81
7.3 Пожежна безпека	85
ВИСНОВКИ	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	91
Додаток А Технічне завдання.....	96
Додаток Б Графічна частина.....	99
Додаток В Протокол перевірки дипломної роботи на наявність текстових запозичень	118

ВСТУП

Актуальність. Сучасний розвиток автомобільного транспорту відбувається в умовах зростаючих вимог до енергоефективності, екологічної безпеки та зниження викидів парникових газів. Посилення екологічних норм, обмеження використання транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння у великих містах, а також зростання вартості традиційних енергоресурсів зумовлюють активний перехід до електричного та гібридного транспорту. Ключовим елементом електромобіля є тяговий електропривод, який безпосередньо визначає динамічні характеристики, енергоспоживання та запас ходу транспортного засобу. Ефективність роботи електропривода значною мірою залежить не лише від типу та параметрів електродвигуна, але й від системи автоматизованого керування, що забезпечує формування необхідних режимів руху в умовах змінного навантаження та складної траєкторії руху в міському циклі.

Найбільш поширеними в тягових електроприводах електромобілів є асинхронні електродвигуни, які характеризуються високою надійністю, простотою конструкції та відносно невисокою вартістю. Проте класичні системи векторного керування асинхронними двигунами, як правило, реалізують роботу з фіксованим значенням потокозчеплення ротора, що не завжди є оптимальним з точки зору мінімізації енергетичних втрат, особливо в усталених режимах міського руху.

У зв'язку з цим актуальною є задача підвищення енергоефективності тягових електроприводів електромобілів за рахунок удосконалення алгоритмів автоматизованого керування, зокрема шляхом адаптивного регулювання магнітного режиму асинхронного електродвигуна залежно від умов руху. Реалізація енергоощадних алгоритмів керування дозволяє зменшити втрати в міді та сталі електродвигуна, знизити загальне енергоспоживання та збільшити запас ходу електромобіля.

Мета роботи. Підвищення енергоефективності тягового електропривода електромобіля шляхом розробки та дослідження системи автоматизованого керування, що реалізує енергоощадний алгоритм регулювання з адаптивною оптимізацією потокозчеплення ротора залежно від режимів руху.

Об'єкт дослідження – електромеханічні процеси автоматизованого керування тягового асинхронного електропривода.

Предмет дослідження – тяговий електропривод електромобіля на основі асинхронного електродвигуна у складі транспортного засобу.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовувалися: теорія електропривода та електричних машин; методи теорії автоматичного керування; імітаційне моделювання; методи порівняльного аналізу.

Постановка задачі проектування.

1) проаналізувати сучасний стан розвитку електромобільного транспорту та тягових електроприводів;

2) обґрунтувати вибір типу тягового електродвигуна та структури електропривода;

3) розробити структурну та функціональну схеми тягового електропривода;

4) провести імітаційне моделювання роботи тягового електропривода в умовах міського їздового циклу.

Наукова новизна:

Реалізовано принцип енергоощадного керування асинхронним електродвигуном шляхом визначення оптимального значення потокозчеплення ротора з урахуванням швидкості обертання та моментної складової струму. Та запропоновано відповідну функціональну схему.

Практичне значення одержаних результатів:

Запропонована функціональна схема системи керування може бути використана при проектуванні або модернізації тягових електроприводів електромобілів з асинхронними електродвигунами.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст магістерської кваліфікаційної роботи, отримані автором самостійно.

Публікації. За тематикою дослідження було опубліковано тези доповіді за результатами виступів на конференціях:

- Моделювання електроприводу електромобіля з урахуванням динамічних втрат // Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025) : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (22–23 жовтня 2025 р.) : збірник наукових праць. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – С. 144–146. – ISBN 978-617-8163-64-8.

- Електромеханічна система автоматизації процесу пастеризації молочних продуктів // Перспективи електричного транспорту : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 22-24 жовт. 2025 р. / ХНУМГ ім. О. М. Бекетова та ін. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – С. 119–120.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ В АВТОТРАНСПОРТІ

1.1 Актуальність використання електричного приводу в транспортних засобах

Аналіз забрудненості атмосферного повітря у містах з інтенсивним автомобільним рухом показує, що провідними чинниками негативного екологічно-хімічного впливу на організм людини є оксиди азоту та канцерогенні вуглеводні. В умовах міського середовища при взаємодії канцерогенних вуглеводнів з оксидами азоту утворюються нітроканцерогенні сполуки, які характеризуються підвищеною токсичністю та мутагенними властивостями. Окрім цього, значну загрозу становлять тверді частинки, викиди яких особливо характерні для дизельних транспортних засобів.

У зв'язку з цим забруднення атмосферного повітря міст оксидами азоту, канцерогенними та мутагенними речовинами, а також твердими частинками, зумовлене роботою автотранспорту, на сьогодні є однією з найгостріших екологічних проблем, що потребує невідкладного вирішення.

Підтвердженням цього є результати досліджень, проведених Німецькою транспортною асоціацією, яка формує екологічний рейтинг автомобілів за критеріями впливу на здоров'я людини. За даними медичних досліджень, частка канцерогенних вуглеводнів у загальному ризику виникнення злоякісних новоутворень у великих містах сягає 85%. У зв'язку з цим Федеральним відомством з охорони навколишнього середовища Німеччини було ініційовано завдання щодо зменшення автотранспортних викидів канцерогенів на 90% у найближчі роки [43].

З 2015 року країни Європейського Союзу перейшли до екологічного стандарту Euro-6, який суттєво обмежує допустимий вміст шкідливих речовин у вихлопних газах транспортних засобів. У межах цього стандарту Європейська спільнота стимулює виробників до розроблення енергоефективних та

екологічно сумісних силових установок. Паралельно з цим органи місцевого самоврядування змушені запроваджувати додаткові обмеження щодо експлуатації транспортних засобів із двигунами внутрішнього згоряння. Так, Федеральний суд Лейпцига надав містам Німеччини право обмежувати або забороняти в'їзд дизельних транспортних засобів на територію населених пунктів.

У багатьох країнах світу, зокрема у Франції, Великобританії, Норвегії, Нідерландах, Німеччині, Індії та Китаї, задекларовано поступову відмову від транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння та перехід до екологічних видів транспорту до 2040 року. Особлива увага приділяється міському громадському транспорту, де дизельні автобуси планується замінити електробусами або гібридними транспортними засобами.

Електричні та гібридні транспортні засоби забезпечують підвищену енергоефективність, зокрема за рахунок рекуперації енергії під час гальмування, що є особливо актуальним в умовах міського руху з частими зупинками. Навіть використання гібридних автобусів дозволяє знизити витрати палива до 30%, що забезпечує економію енергії до 60% та зменшення обсягу шкідливих викидів до 70% у порівнянні з дизельними аналогами [22]. Ще вищі екологічні та енергетичні показники демонструють електробуси.

Практичним підтвердженням ефективності електробусів є їх широке впровадження у розвинених країнах. Найбільшим виробником електробусів є компанія BYD Auto (Китай), зокрема модель BYD K9, яка здатна забезпечувати пробіг 250–300 км у міських умовах без підзарядки, а повний заряд акумуляторної батареї здійснюється протягом приблизно трьох годин [44].

Для вирішення проблеми тривалого часу заряджання компанія АВВ у Люксембурзі впровадила автоматизовані системи швидкої зарядки з автоматичним зчепленням, розміщеним на даху транспортного засобу. Такі системи дозволяють здійснювати заряджання електробусів протягом 4–6 хвилин і можуть бути інтегровані у вже існуючу транспортну інфраструктуру

шляхом встановлення зарядних пунктів на кінцевих зупинках, проміжних зупинках та у депо [15, 36].

Зі зростанням кількості електричного автотранспорту зростає потреба у розвитку відповідної зарядної інфраструктури, яка повинна забезпечувати надійну та ефективну експлуатацію транспортних засобів. Наукові дослідження [3, 11] вказують на необхідність створення розгалуженої міської та приміської мережі зарядних станцій, що відповідатимуть сучасним стандартам екологічної та електробезпеки.

Перспективним напрямом розвитку електробусів є використання суперконденсаторів як тягових джерел енергії. Такі рішення реалізовані компанією Zhuzhou Electric Locomotive Company, де швидка зарядка суперконденсаторів здійснюється через спеціальні контактні пристрої, встановлені на даху транспортного засобу. Одна зарядка забезпечує автономний пробіг до 5 км, а ресурс суперконденсаторів перевищує один мільйон циклів заряду-розряду при діапазоні робочих температур від -40 до $+65$ °C.

В умовах України додатковою перевагою є наявність розгалуженої тролейбусної контактної мережі, яка може бути використана для організації зарядної інфраструктури електробусів, що дозволяє модернізувати міський транспорт без повної реконструкції енергетичних систем [16].

Таким чином, в умовах зростання екологічних вимог та трансформації автомобільної галузі електрифікація автотранспорту є стратегічно важливим напрямом розвитку. Проєктування та впровадження транспортних засобів з електричним тяговим приводом для міського транспорту є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої сприятиме підвищенню енергоефективності, зменшенню екологічного навантаження та покращенню якості життя у містах.

1.2 Аспекти використання тягових акумуляторних батарей в електричному транспорті

Електромобіль – це транспортний засіб, який використовує електричну енергію як основне джерело живлення для руху. [3] На відміну від традиційних автомобілів із двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ), електромобіль не потребує палива нафтопродуктів і працює за рахунок електричного приводу [14].

Тягові акумуляторні батареї (ТАБ) є одним із ключових елементів електромобіля, оскільки саме вони визначають запас ходу, енергетичну ефективність, динамічні характеристики та експлуатаційну надійність транспортного засобу. Разом із тяговим електроприводом ТАБ формують основу силової установки електромобіля, а їх параметри безпосередньо впливають на вимоги до системи автоматизованого керування.

На відміну від транспортних засобів з двигунами внутрішнього згорання, де акумуляторні батареї виконують переважно допоміжні функції (пуск двигуна, живлення бортової мережі та освітлення), в електромобілях ТАБ є основним джерелом енергії для тягового електропривода. Це обумовлює необхідність переосмислення архітектури транспортного засобу, оскільки за обмежень маси та габаритів автомобіля потрібно забезпечити розміщення енергоємної системи накопичення електроенергії з високими показниками надійності та безпеки.

Однією з принципових особливостей електромобілів є можливість рекуперації енергії під час гальмування. У міських умовах руху, що характеризуються частими зупинками, рекуперація дозволяє суттєво підвищити загальну енергоефективність транспортного засобу. Водночас сучасні ТАБ, зокрема літій-іонні, мають обмежені можливості щодо приймання великих зарядних струмів у короткі проміжки часу. Унаслідок цього частина енергії рекуперації не накопичується в батареї, а розсіюється у вигляді тепла, що

знижує ефективність процесу та підвищує теплове навантаження на елементи ТАБ.

Додатковим проблемним чинником є деградація акумуляторних елементів під впливом високих струмів заряду та розряду, а також підвищених температур. Перегрів ТАБ призводить до зменшення ресурсу батареї та може створювати загрозу безпечній експлуатації електромобіля. У зв'язку з цим особливого значення набувають системи керування тяговими акумуляторними батареями (Battery Management System, BMS), які забезпечують контроль напруги окремих комірок, струмів, температури та стану заряду (SOC), а також обмежують режими роботи, що можуть призвести до передчасного зносу або аварійних ситуацій.

Серед основних напрямів підвищення ефективності ТАБ слід виділити збільшення щільності енергії, яка визначає кількість електроенергії, накопиченої на одиницю маси або об'єму батареї. Відомо, що традиційні свинцево-кислотні батареї характеризуються низькою питомою енергоємністю, тоді як сучасні літій-іонні технології забезпечують значно вищі показники. Подальший розвиток ТАБ пов'язують із удосконаленням електродних матеріалів, оптимізацією конструкції комірок та впровадженням комбінованих систем накопичення енергії. Порівняльні значення питомої (гравіметричної) та об'ємної щільності енергії для основних типів акумуляторних батарей, що застосовуються в транспортних електроенергетичних системах, наведено на рисунку 1.1.

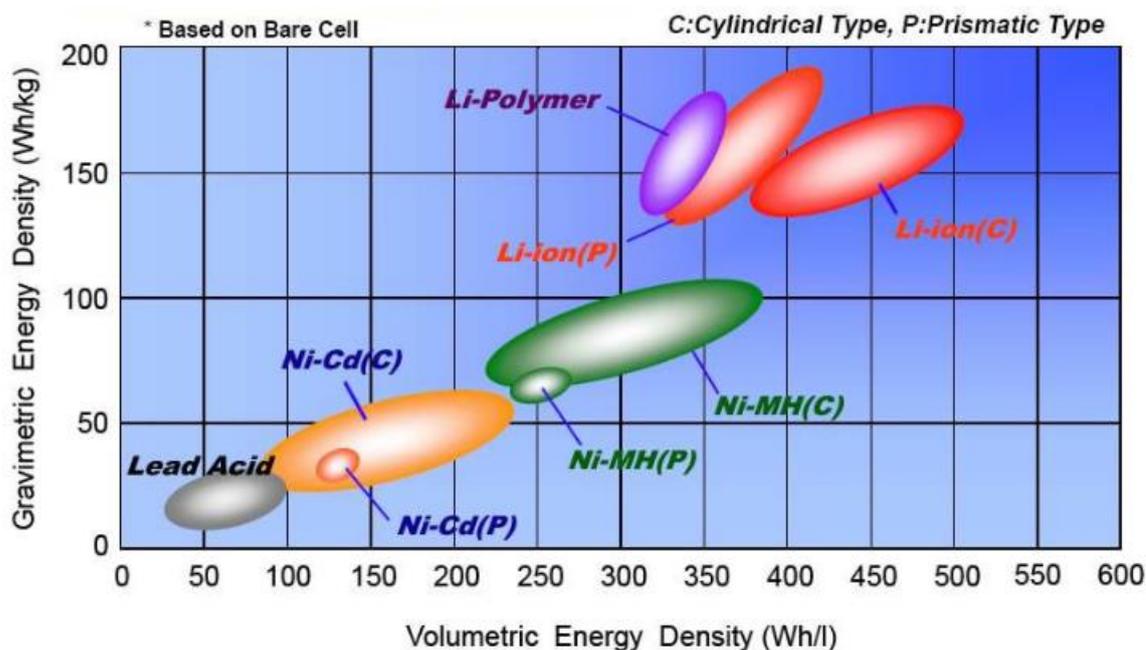


Рисунок 1.1 – Порівняльна щільність енергії (гравіметрична та об’ємна) для різних типів акумуляторних батарей

Перспективним технічним рішенням є використання суперконденсаторів у поєднанні з літій-іонними батареями для приймання пікових імпульсів потужності, зокрема під час рекуперативного гальмування. Такі гібридні системи накопичення дозволяють зменшити струмові навантаження на ТАБ та підвищити загальну ефективність енергетичного обміну. Однак їх широке застосування обмежується підвищеною вартістю та ускладненням конструкції силової установки. Важливою проблемною областю є забезпечення безпечної експлуатації ТАБ. Сучасні акумуляторні батареї оснащуються багаторівневими системами захисту, які включають термозахист, запобіжні та скидні клапани, а також використання сепараторів з властивістю теплового відсікання струму. У разі перевищення допустимого температурного режиму пориста структура сепаратора частково або повністю блокує іонну провідність, що дозволяє обмежити подальше зростання температури. Водночас такі аварійні режими, як правило, призводять до необхідності заміни батарейного блока та пов’язані зі значними економічними витратами. Конструктивна схема сучасної літій-іонної

комірки з основними функціональними елементами та засобами захисту наведена на рисунку 1.2.

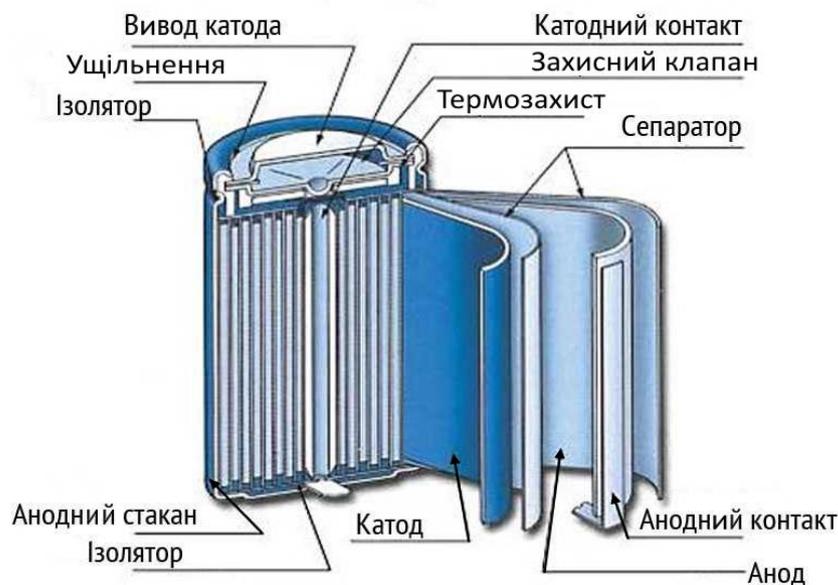


Рисунок 1.2 – Конструктивна схема літій-іонної комірки тягової акумуляторної батареї електромобіля

Для узагальненого порівняння основних експлуатаційних та енергетичних характеристик різних типів тягових акумуляторних батарей у таблиці 1.1 наведено їх питомі показники, ресурс, температурні режими та орієнтовні вартісні параметри.

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики різних типів ТАБ

Тип накопичувача	Акумулятори		
	Кислотні	Лужні	Літій-іонні
Питома енергія, Вт·год/кг	20...40	15...80	80...220
Максимальна питома потужність, Вт/кг	100...300	500...1300	800...3000
Ресурс, цикл	100...400	300...2000	500...2500
Термін служби, років	2...10	2...15	3...10
Робоча температура, °С	-30...45	-40... 60	-30...60
ККД, %	70...85	65...80	80...95
Обслуговування	Потрібно	Потрібно	Немає
Ціна, \$ / кВт · год	50...200	500...1500	1000...2500
Ціна, \$ / кВт (номінальної потужності)	50...120	75...400	400... 670

З точки зору конструктивного виконання ТАБ електромобілів зазвичай формуються з великої кількості окремих комірок, з'єднаних у модулі та батарейні блоки. Комірки можуть мати циліндричну або призматичну форму, а силовий каркас батареї повинен забезпечувати достатню механічну жорсткість за мінімальної маси. Обов'язковим елементом таких систем є BMS, складність якої зростає пропорційно кількості комірок та вимогам до точності контролю параметрів.

Таким чином, сучасний стан розвитку тягових акумуляторних батарей характеризується наявністю низки технічних та експлуатаційних обмежень, пов'язаних зі струмовими, тепловими та ресурсними характеристиками. Ці обмеження безпосередньо формують вимоги до алгоритмів автоматизованого керування тяговим електроприводом електромобіля, особливо у режимах розгону та рекуперативного гальмування, де необхідно забезпечити оптимальний компроміс між енергоефективністю, динамікою та довговічністю ТАБ.

1.3 Тягові електродвигуни та компоновки електроприводу електромобілів

Головним елементом руху є електродвигун, який отримує енергію від акумуляторних батарей або інших електричних джерел (наприклад, суперконденсаторів чи паливних елементів).

Для оптимізації роботи електродвигуна використовуються системи керування, які забезпечують:

- ефективне використання запасу енергії;
- регулювання швидкості та крутного моменту;
- функціонування рекуперативного гальмування, що дозволяє частково відновлювати енергію.

Тяговий електродвигун є одним з ключових елементів електроприводу електромобіля та визначає його динамічні характеристики, енергоефективність

і можливості рекуперативного гальмування. У сучасних електромобілях переважно застосовуються електродвигуни змінного струму, які мають низку переваг порівняно з двигунами постійного струму, зокрема вищий коефіцієнт корисної дії, більшу питому потужність, надійність, кращі умови рекуперації енергії та зменшені витрати на технічне обслуговування [9].



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд тягового електродвигуна

Двигуни постійного струму з колекторно-щітковим вузлом історично використовувалися в перших електромобілях на початку ХХ століття завдяки простоті керування та можливості незалежного регулювання електричних і механічних процесів. Однак наявність щітково-колекторного вузла, підвищена маса, відносно низький ККД та необхідність регулярного обслуговування зумовили поступову відмову від їх використання в тягових системах. З розвитком векторного керування електродвигунами змінного струму двигуни постійного струму практично втратили актуальність у сучасних електромобілях і застосовуються лише в окремих малопотужних або спеціалізованих системах.

Найбільш поширеним типом тягових двигунів змінного струму є асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором. Вони характеризуються високою надійністю, відсутністю колектора і щіток, відносно низькою вартістю та здатністю працювати в складних умовах експлуатації. Застосування векторного керування асинхронними двигунами дозволяє

розв'язати електричні та механічні процеси, розширити діапазон регулювання швидкості за рахунок режимів послаблення магнітного потоку та забезпечити характеристики, близькі до двигунів постійного струму. При живленні від статичного перетворювача частоти асинхронний двигун поєднує простоту конструкції з добрими пусковими та регулювальними властивостями, що робить його привабливим для використання в тягових електроприводах електромобілів.

Разом з тим асинхронні двигуни мають дещо більшу масу та нижчу енергоефективність у порівнянні з синхронними двигунами з постійними магнітами. Однак у контексті електромобіля маса тягового двигуна зазвичай становить лише 2-5 % від загальної маси транспортного засобу та є незначною порівняно з масою тягової акумуляторної батареї. Підвищення ККД сучасних асинхронних тягових двигунів досягається за рахунок оптимізації електромагнітної системи, зменшення повітряного зазору, збільшення коефіцієнта заповнення пазів міддю та застосування сучасних матеріалів активної сталі.

Серйозними конкурентами асинхронних двигунів у системах тяги є синхронні електродвигуни з постійними магнітами. Ці двигуни широко застосовуються у сучасних електромобілях провідних виробників, таких як Toyota, Honda та Nissan. До їх основних переваг належать висока питома потужність, підвищений ККД та ефективніше тепловідведення. Недоліком синхронних двигунів з постійними магнітами є відносно вузька область постійної потужності, однак застосування відповідних алгоритмів керування дозволяє розширити діапазон швидкостей до трьох–чотирьох базових значень. Разом з тим такі двигуни є чутливими до перегріву та можуть втрачати магнітні властивості внаслідок розмагнічування постійних магнітів.

Окрему групу тягових електродвигунів становлять вентильні реактивні двигуни, які привертають увагу завдяки простій та механічно міцній конструкції, відмовостійкості та здатності працювати у широкому діапазоні

швидкостей і навантажень. Водночас їм притаманні підвищений рівень шуму та значні пульсації електромагнітного моменту, що обмежує їх широке застосування в електромобілях [10].

Безколекторні двигуни постійного струму (BLDC) концептуально є різновидом синхронних двигунів з постійними магнітами, які живляться несинусоїдальними струмами. Вони поєднують у собі механічні переваги асинхронних машин (відсутність колектора і щіток) та керованість, характерну для двигунів постійного струму. До основних переваг BLDC-двигунів належать висока ефективність, значний пусковий момент, широкий діапазон регулювання швидкості та мінімальні вимоги до технічного обслуговування [11]. Саме ці властивості зумовлюють їх активне застосування у сервосистемах, побутовій техніці та електромобілях.

Одним із перспективних напрямів розвитку електроприводів електромобілів є застосування мотор-колес, у яких тяговий електродвигун інтегрований безпосередньо в колесо транспортного засобу (рисунок 1.4). Мотор-колесо являє собою комплексну електромеханічну систему, що поєднує в собі колесо з вбудованим електродвигуном, елементи силової передачі та гальмівну систему. Така компоновка дозволяє реалізувати індивідуальний привід кожного колеса та забезпечити незалежне керування крутним моментом.

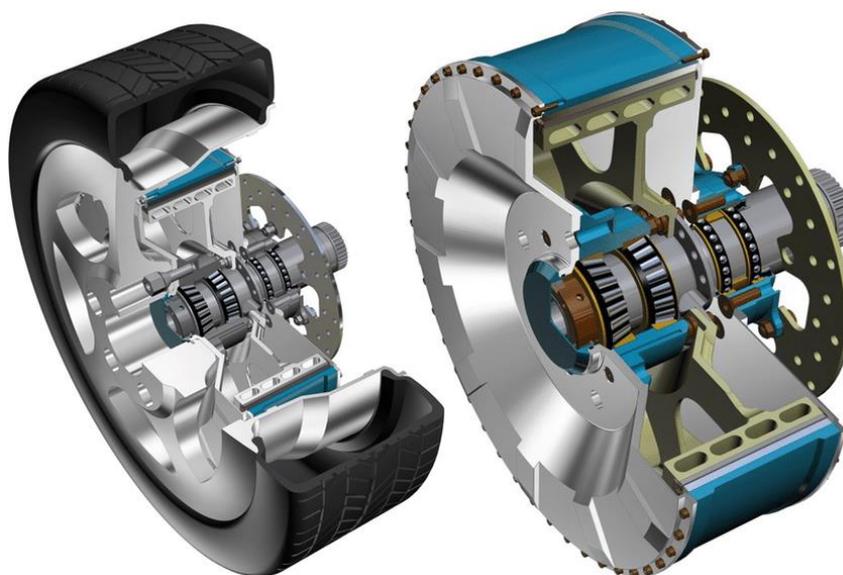


Рисунок 1.4 – Будова мотор-колеса

Застосування мотор-коліс дозволяє відмовитися від традиційних трансмісійних елементів, таких як коробки передач і механічні диференціали, а також спростити реалізацію повного приводу. Водночас збільшення неопореної маси коліс та ускладнення алгоритмів керування є суттєвими недоліками таких систем.

Альтернативною є компоновка з індивідуальними електродвигунами, розташованими всередині кузова електромобіля поблизу приводних коліс (рисунок 1.5). У таких системах тягові двигуни з'єднуються з колесами через півосі або редуктори, що дозволяє зменшити неопорену масу та спростити тепловий режим роботи електродвигунів.

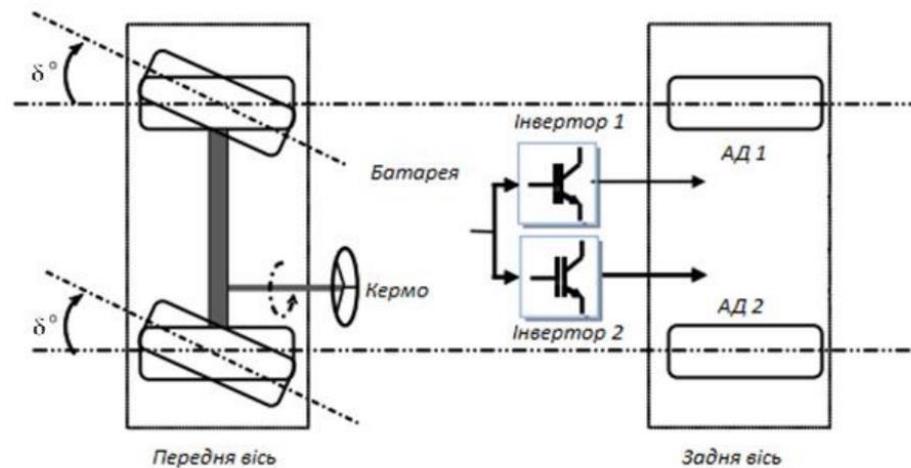


Рисунок 1.5 – Компоновка з індивідуальними електродвигунами

Типовий приклад тягового електродвигуна електромобіля, виконаного у вигляді компактного електромеханічного модуля, наведено на рисунку 1.6.

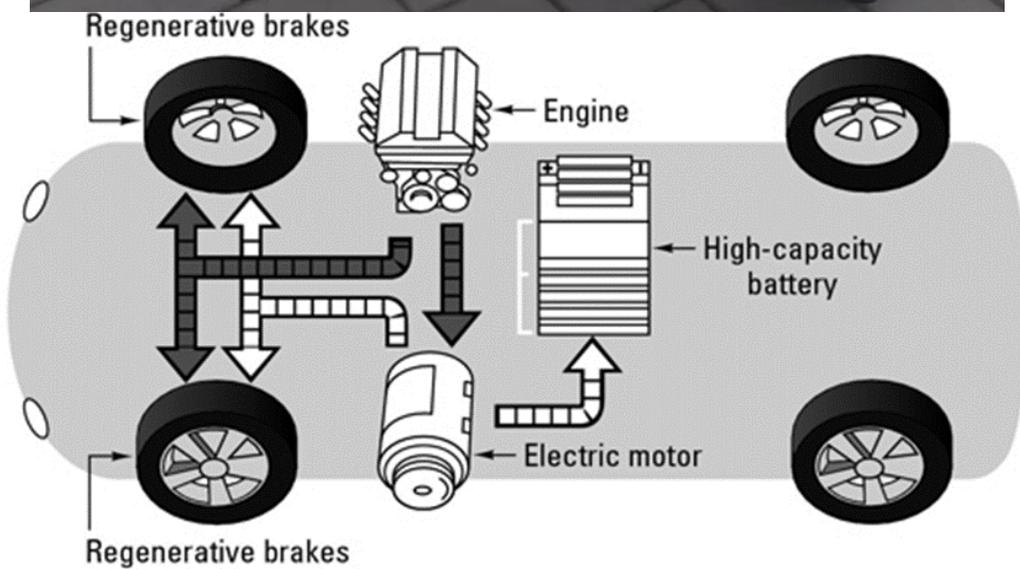


Рисунок 1.6 – Індивідуальний привід з розташуванням двигуна всередині автомобіля

У сучасних електромобілях застосовуються різні типи тягових електродвигунів і схем компоновки електроприводу, вибір яких визначається вимогами до енергоефективності, динамічних характеристик, вартості, надійності та можливостей системи автоматизованого керування. На рисунку 1.7 наведено основні конфігурації електричної тяги електромобілів [4].

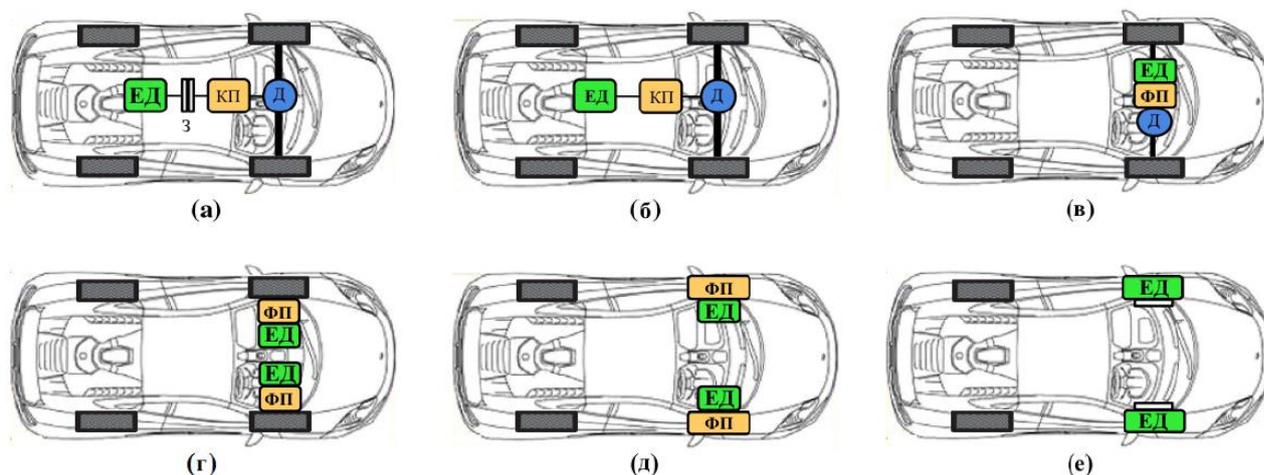


Рисунок 1.7 – Схеми компоновки електроприводу в електромобілях

1.3.1 Аналіз конфігурацій електроприводу та вибір компоновки

Конфігурація (а) – центральне розміщення електродвигуна з коробкою передач і диференціалом (класична задньопривідна схема). Крутний момент від одного потужного електродвигуна передається через коробку передач (КП) і диференціал (Д) на ведучу вісь. Така компоновка історично застосовувалась у перших електромобілях, оскільки зберігала архітектуру транспортних засобів з ДВЗ, включаючи зчеплення (З). Диференціал забезпечує можливість обертання коліс з різними кутовими швидкостями під час руху по криволінійній траєкторії.

Конфігурація (б) характеризується розміщенням електродвигуна з редуктором біля передньої осі, що забезпечує передній привід і дозволяє спростити трансмісію, зменшити втрати та виключити використання зчеплення і багатоступеневої коробки передач..

Конфігурація (в) – інтегрований силовий модуль, що поєднує електродвигун, редуктор і диференціал на одній осі. Компактність такого рішення зменшує масу і габарити приводу та знижує енергетичні втрати в механічній передачі.

Конфігурація (г) – два електродвигуни на одній осі, по одному на кожне колесо. У цій схемі механічний диференціал замінюється електронним, а керування швидкістю обертання кожного двигуна здійснюється незалежно. Це забезпечує покращену керованість і стабільність руху, особливо на поворотах.

Конфігурація (д) – окремі електродвигуни для передньої та задньої осей. Така компоновка дозволяє реалізувати повний привід без механічного зв'язку між осями, забезпечуючи гнучке керування розподілом крутного моменту та рекуперацією енергії.

Конфігурація (е) передбачає використання мотор-коліс, у яких електродвигун інтегрований безпосередньо в ступицю колеса. У такій системі відсутні механічні елементи трансмісії між електродвигуном і колесом, що дозволяє зменшити енергетичні втрати та забезпечити незалежне керування тягловими характеристиками кожного ведучого колеса.

Для подальших розрахунків у роботі обрано конфігурацію (б) (рисунок 1.7), яка передбачає реалізацію переднього приводу з одним тяговим електродвигуном і фіксованою передачею. У даній схемі використовується редуктор з постійним передаточним числом, який передає крутний момент від електродвигуна до диференціала, а далі – на ведучі колеса транспортного засобу.

Обрана компоновка характеризується простотою механічної частини електропривода, зниженими енергетичними втратами в трансмісії, підвищеним коефіцієнтом корисної дії та оптимальними масогабаритними показниками, що робить її доцільною для застосування в міських електромобілях.

1.3.2 Обґрунтування вибору тягового електродвигуна

Узагальнену класифікацію тягових електродвигунів, що застосовуються в електроприводах транспортних засобів, наведено в таблиці 1.2.

Вибір типу тягового електродвигуна та компоновки електроприводу є багатокритеріальною задачею, що залежить від вимог до енергоефективності, динаміки, вартості, надійності та особливостей системи автоматизованого керування електромобілем.

Таблиця 1.2 – Класифікація тягових електродвигунів

Внутрішня комутація		Зовнішня комутація	
З механічною комутацією (колекторний)		АД	СД
Змінного струму	Постійного струму	Змінного струму	Постійного струму
- універсальний; - репульсивний	- КДПС з різними обмотками збудження; - КДПС з ПМ	- БДПС; - ВРД; - СРД з ротором з явними полюсами	- АДКР; - АДФР; - СДОЗ; - СДПМ; - СДВПМ; СДПМП - гібридний - СРД; - СРД-ПМ; - СРД-ПМ реактивно-гістерезисний; - кроковий
проста електроніка	випрямлячі	більш складна електроніка	складна електроніка

У таблиці 1.2 використано такі скорочення: КДПС – колекторний двигун постійного струму; БДПС – безколекторний двигун постійного струму; ВРД – вентильний реактивний двигун; АДКР – асинхронний двигун із короткозамкненим ротором; АДФР – асинхронний двигун із фазним ротором; СДОЗ – синхронний двигун з обмоткою збудження; СДПМ – синхронний двигун з постійними магнітами; СДПМП – синхронний двигун із поверхневим розміщенням постійних магнітів; СДВПМ – синхронний двигун із вбудованими постійними магнітами; СРД – синхронний реактивний двигун; ПМ – з постійними магнітами.

На рисунку 1.8 наведено порівняння механічних характеристик тягових електродвигунів різних типів при обмеженому струмі статора, а також залежність потужності двигуна від швидкості обертання вала.

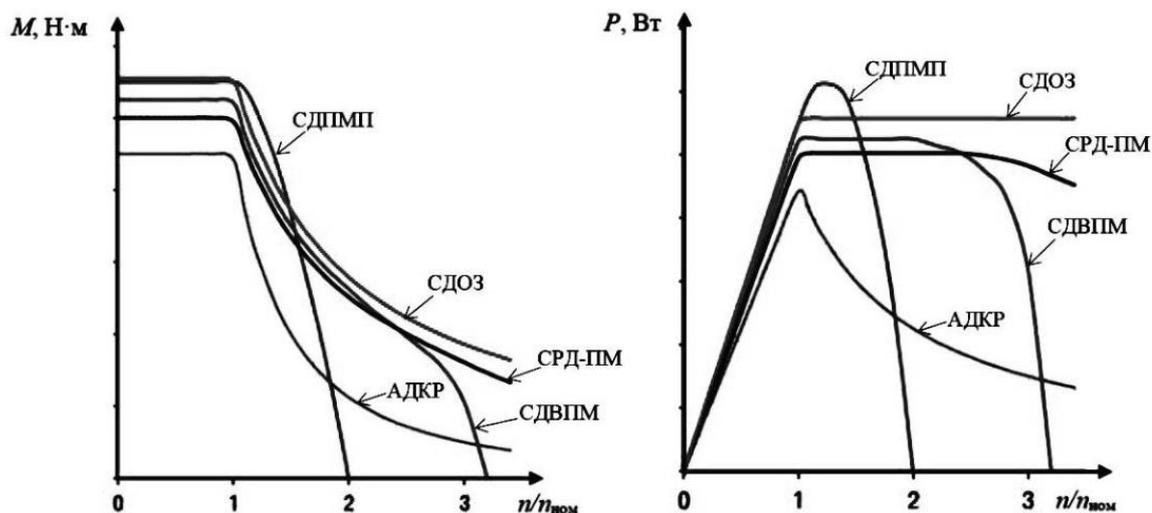


Рисунок 1.8 – Порівняння механічних характеристик тягових електродвигунів різних типів: а – залежність моменту від швидкості; б – залежність потужності від швидкості обертання

1.3.4 Техніко-економічне порівняння

На основі наведених характеристик і класифікації виконано техніко-економічне порівняння різних типів тягових електродвигунів у вигляді експертної оцінки (таблиця 1.3), де 1 – найкращий показник, 3 – найгірший показник.

Таблиця 1.3 – Порівняння показників різних типів електродвигунів

Параметр	АДКР	СДПМП	СДВПМ	СРД-ПМ (гібридний)	СДОЗ
Постійність потужності у всьому діапазоні швидкостей	2	3	2	1	1
Момент до току статора	2	1	1	1	1
Ефективність (ККД) в усьому робочому діапазоні	2	2	2	1	1
Питома потужність, кВт/год,	3	2	1	2	2
Надійність	1	2	3	3	2
Виробництво	1	3	3	3	3
Ціна	1	3	3	3	2
Разом	12	16	15	14	12

Висновок: Аналіз механічних характеристик (рисунок 1.8) показує, що синхронний реактивний двигун з вбудованими постійними магнітами має високі технічні показники з точки зору питомої потужності та ефективності. Проте при комплексній оцінці з урахуванням не лише технічних, а й економічних та експлуатаційних факторів найбільш привабливим варіантом для електроприводу електромобіля виявляється асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Тяговий асинхронний двигун з короткозамкненим ротором характеризується простотою конструкції, високою надійністю та добрими пусковими і регульовальними властивостями. При роботі у скалярному режимі керування він забезпечує задовільні тягові характеристики, а при векторному керуванні стає можливим незалежне регулювання електромагнітного моменту і магнітного потоку, що дозволяє гнучко адаптувати механічну характеристику електроприводу до умов руху транспортного засобу.

З урахуванням наведеного, для подальших розрахунків у даній роботі обрано асинхронний тяговий електродвигун з короткозамкненим ротором.

2 СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

2.1 Загальна характеристика та конфігурація системи тягового електроприводу електромобіля

Існує кілька основних типів електричних транспортних засобів, зокрема: електромобілі з тяговими акумуляторними батареями; гібридні транспортні засоби; транспортні засоби на паливних елементах; гібридні тролейбуси.

Кожен із зазначених типів, залежно від конструктивних особливостей та способу перетворення і передачі енергії, може мати різні підтипи та конфігурації електроприводу. Узагальнену класифікацію електричних транспортних засобів наведено на рисунку 2.1.



Рисунк 2.1– Типи електротранспортних засобів

Тяговий електропривод електромобіля є складною електромеханічною системою, що поєднує в собі тяговий електродвигун, силовий перетворювач електроенергії, систему автоматизованого керування та механічну частину приводу. Саме система автоматизованого керування визначає реалізацію

тягових і гальмівних режимів, ефективність рекуперації енергії, динамічні характеристики транспортного засобу та узгодження роботи електроприводу з тяговою акумуляторною батареєю (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Структурна схема електроприводу транспортного засобу

На відміну від електроприводів промислового призначення, тяговий електропривод електромобіля працює в умовах:

- широкого діапазону швидкостей обертання;
- змінних навантажень;
- частих пусків, зупинок і реверсів;
- інтенсивних режимів рекуперативного гальмування.

Це зумовлює підвищені вимоги до системи керування, яка повинна забезпечувати:

- формування необхідного електромагнітного моменту в усьому робочому діапазоні швидкостей;
- обмеження струмів і напруг з урахуванням допустимих режимів роботи тягової акумуляторної батареї;
- стабільну та ефективну роботу в режимах рекуперації енергії; високий коефіцієнт корисної дії та надійність електроприводу в цілому.

2.2 Структура та функції основних компонентів електроприводу електромобіля

Типова структура електроприводу електромобіля (рисунок 2.2) включає такі основні компоненти:

- тягова акумуляторна батарея (ТАБ) – основне джерело електроенергії, що забезпечує живлення тягового електроприводу;
- силовий перетворювач (інвертор) – перетворює постійну напругу ТАБ у змінну напругу необхідної частоти та амплітуди для живлення електродвигуна;
- тяговий електродвигун – перетворює електричну енергію в механічну та забезпечує створення крутного моменту на ведучих колесах;
- механічна передача (редуктор, диференціал) – передає механічну потужність від електродвигуна до коліс;
- система автоматизованого керування (САК) – формує сигнали керування силовими ключами інвертора на основі команд водія та сигналів зворотного зв'язку.

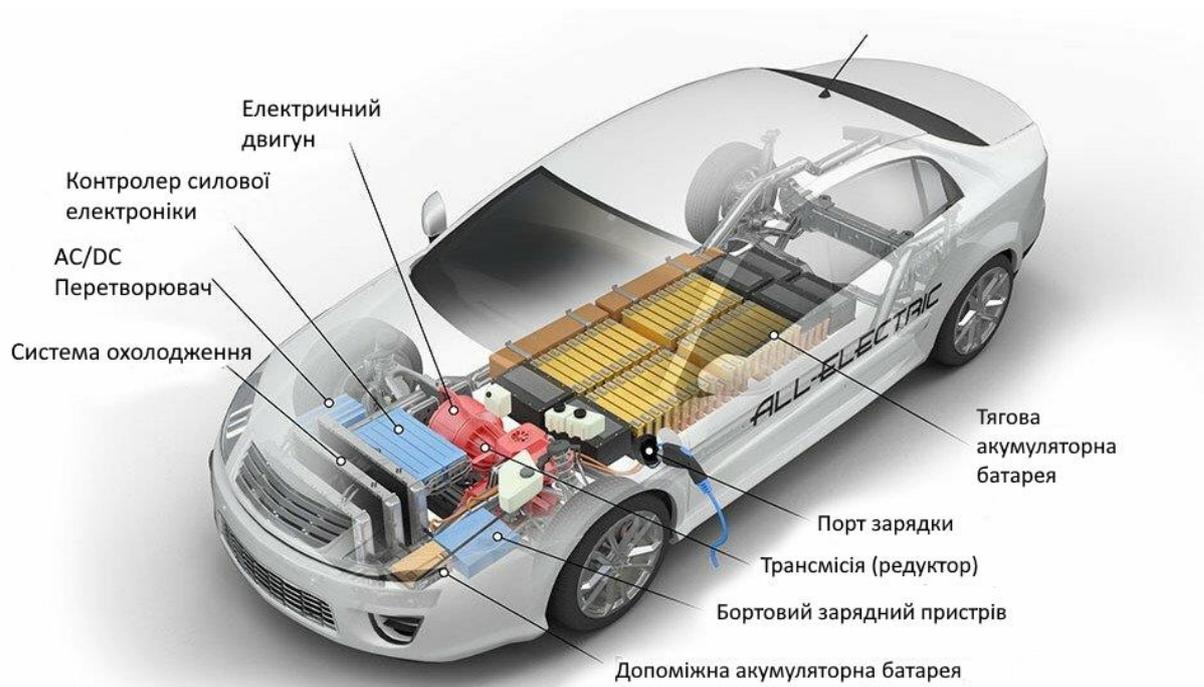


Рисунок 2.2 – Основні компоненти електромобіля

Функціонально система керування реалізує алгоритми регулювання струмів, моменту та швидкості обертання електродвигуна, використовуючи сигнали від датчиків струму, напруги, швидкості обертання і положення ротора, а також сигнали з педалі акселератора і гальмівної системи.

Загальний вигляд тягового асинхронного двигуна електромобіля наведено на рисунку 2.3



Рисунок 2.3 – Тяговий двигун електромобіля

2.3 Загальна конфігурація системи керування електроприводом електромобіля

Сучасні електромобілі, як правило, будуються на основі спеціалізованих платформ, що передбачають інтеграцію електроприводу, джерела енергії та допоміжних систем. Узагальнену конфігурацію системи керування електроприводом електромобіля наведено на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Конфігурація системи керування електроприводом електромобіля

Система керування електроприводом умовно поділяється на три основні підсистеми:

- електроприводну підсистему, до складу якої входять контролер транспортного засобу, силовий електронний перетворювач, електродвигун, механічна трансмісія та ведучі колеса;
- підсистему джерела енергії, що включає тягову акумуляторну батарею, систему керування енергією та бортовий зарядний пристрій;
- допоміжну підсистему, яка забезпечує роботу допоміжних споживачів (система охолодження, клімат-контроль, гідропідсилювач керма, допоміжна акумуляторна батарея).

Для проєктування нового електроприводу електромобіля або модернізації вже існуючого необхідно виконати аналіз характерних режимів руху транспортного засобу в міських умовах. Такий аналіз базується на траєкторії

руху електромобіля, яка зазвичай задається у вигляді залежності швидкості руху від часу.

На рисунку 2.4 наведено типову діаграму руху електромобіля у міському режимі, що відображає зміну швидкості транспортного засобу в часі.

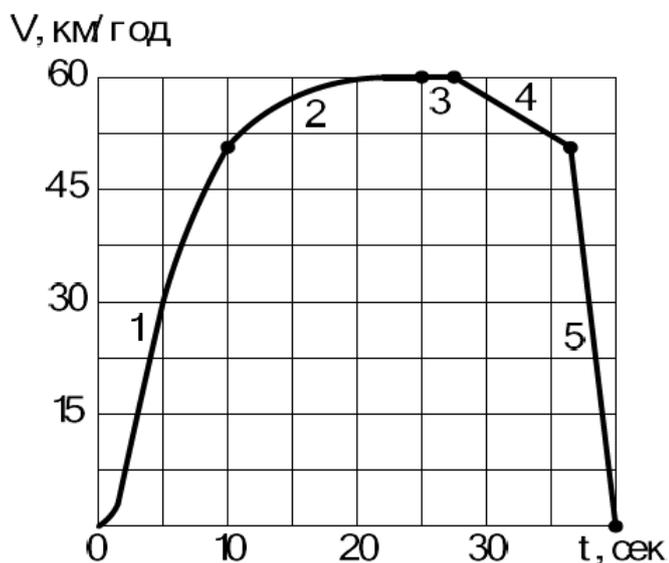


Рисунок 2.4 – Типова діаграма руху електромобіля у міському режимі

Аналіз такої діаграми дозволяє визначити характерні режими роботи тягового електроприводу, величини прискорень і сповільнень, а також тривалість роботи в тяговому та гальмівному режимах. Зазвичай діаграму руху можна поділити на п'ять основних етапів:

1. Пуск і початковий розгін електромобіля, що характеризується значними пусковими струмами та максимальними значеннями електромагнітного моменту тягового електродвигуна.

2. Подальший розгін за автоматичною механічною характеристикою електроприводу, під час якого швидкість зростає при зменшенні тягового моменту.

3. Рух зі сталою швидкістю, при якому електропривод компенсує сили опору руху та працює в усталеному режимі.

4. Рух по інерції, коли тяговий електродвигун не створює активного моменту або працює з мінімальним навантаженням.

5. Гальмування, яке може реалізовуватися як у режимі рекуперації енергії, так і з використанням механічної гальмівної системи.

Висновок. Розглянуті режими руху безпосередньо визначають вимоги до тягового електроприводу, зокрема до максимального крутного моменту, потужності електродвигуна, діапазону регулювання швидкості, а також можливостей системи автоматизованого керування щодо реалізації рекуперативного гальмування.

3 РОЗРАХУНОК ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТА ПЕРЕВІРКА ВИБРАНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

3.1 Кінематична схема тягового механізму електромобіля

Кінематична схема тягового механізму електромобіля, виконаного відповідно до обраної конфігурації електроприводу (передній привід з одним тяговим електродвигуном), наведена на рисунку 3.1.

Тяговий електродвигун (1) передає обертовий момент через вал двигуна (2) на циліндричну ведучу шестерню головної передачі (3), яка зчеплена з веденою шестернею (4). Далі крутний момент передається на диференціал (5), напіввали (6) та ведучі колеса (7).

Кінематичний ланцюг забезпечує передачу та перетворення механічної потужності від вала тягового електродвигуна до ведучих коліс транспортного засобу з урахуванням передаточного числа трансмісії та умов руху.

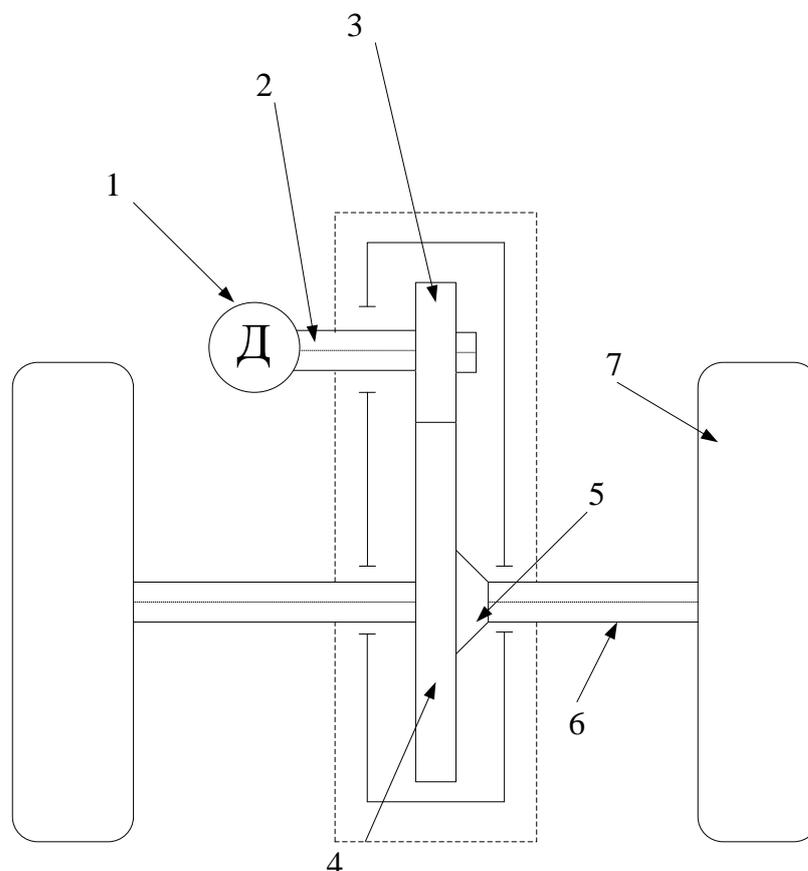


Рисунок 3.1 – Кінематична схема тягового механізму електромобіля

Основні технічні характеристики електромобіля, необхідні для виконання розрахунків, наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні технічні характеристики електромобіля

Загальна вага електромобіля, кг	$m_0 = 1700$
Вага навантаженого автомобіля, кг	$m = 1900$
Радіус валу ходового колеса, м	$r = 0,1405$
Радіус ходового колеса, м	$R_k = 0,4719$
коефіцієнт тертя ковзання в підшипниках кочення	$\mu = 0,015$
Передаточне число ведучого моста	$i = 9,817$
ККД трансмісії	$\eta = 0,9$

3.2 Розрахунок режимів руху та тахограм електромобіля

Для визначення навантажень на тяговий електродвигун та параметрів системи керування необхідно побудувати тахограми швидкості та прискорення, що відповідають характерним режимам міського руху.

Середня швидкість руху в м/с визначається за формулою [6]:

$$v = V \frac{1000}{3600}, \quad (3.1)$$

де V – середня швидкість руху в км/год, ($V = 40$ км/год).

$$v = 40 \frac{1000}{3600} = 11.11 \text{ (м/с)}.$$

Визначаємо середню тривалість руху між зупинками:

$$t_p = \frac{S}{v}, \quad (3.2)$$

де S – дистанція, яку проїзжає ЕТЗ між зупинками [6],

($S = 500$ м).

$$t_p = \frac{500}{11.11} = 45 \text{ (с)}.$$

Обчислимо значення середнього часу циклу:

$$t_u = t_p + t_n, \quad (3.3)$$

де t_n – час, необхідний для висадки та посадки пасажирів, ($t_n = 20$ с).

$$t_{\text{ц}} = 45 + 20 = 65 \text{ (с)}.$$

Розглянемо два експлуатаційних режими:

- рух при максимальному завантаженні пасажирями;
- рух при холостому ході (відсутність пасажирів).

Режим максимального завантаження

Необхідний час для розгону до сталої швидкості:

$$t_{\text{роз1}} = \frac{v}{a_{\text{роз1}}}, \quad (3.4)$$

де $a_{\text{роз1}}$ – значення прискорення при розгоні з максимальним навантаженням, [5] ($a_{\text{роз1}} = 0.6 \text{ м/с}^2$)

$$t_{\text{роз1}} = \frac{11.11}{0.6} = 18.52 \text{ (с)}.$$

У подальших розрахунках приймається припущення про рівність за модулем прискорень розгону та гальмування, що є допустимим для оціночного аналізу тягових режимів електропривода:

$$t_{\text{зал1}} = t_{\text{роз1}}, \quad (3.5)$$

$$t_{\text{зал1}} = 18.52 \text{ (с)}.$$

Час усталеної роботи двигуна:

$$t_{\text{ум1}} = t_p - t_{\text{роз1}} - t_{\text{зал1}}, \quad (3.6)$$

$$t_{\text{оно1}} = 65 - 18.52 - 18.52 = 27.96 \text{ (с)}.$$

Режим холостого ходу

Аналогічно визначаються:

Час розгону до усталеної швидкості:

$$t_{\text{роз2}} = \frac{v}{a_{\text{роз2}}}, \quad (3.7)$$

з урахуванням меншого прискорення $a_{\text{роз2}}$ при зменшеній масі транспортного засобу, ($a_{\text{роз2}} = 0.8 \text{ м/с}^2$).

$$t_{\text{роз2}} = \frac{11.11}{0.8} = 13.8875 \text{ (с)}.$$

Прискорення при розгоні та прискорення під час гальмування однакові, тоді час гальмування до повної зупинки:

$$t_{\text{гал2}} = t_{\text{роз2}} \quad (3.8)$$

$$t_{\text{гал2}} = 13.8875 \text{ (с)}.$$

Час усталеної роботи двигуна:

$$t_{\text{уст2}} = t_p - t_{\text{роз2}} - t_{\text{гал2}} \quad (3.9)$$

$$t_{\text{уст2}} = 65 - 13.8875 - 13.8875 = 37.225 \text{ (с)}.$$

Тахограми швидкості та прискорення двигуна електромобіля, побудовані по обчисленим значенням, приведені на рисунки 3.1 та 3.2.

Зпаспортних даних електромобіля загальне передаточне число трансмісії буде $i = 9,817$. Транспортний засіб (ТЗ) має два колеса на передній осі і два колеса на задній. Тип коліс: 8,25x22,5 дискові з нерозбірним ободом. Оскільки 1 дюйм = 2.54 сантиметра, тоді радіус коліс:

$$R_{\kappa} = 22.5 \cdot 2.54 = 57.15 \text{ (см)}. \quad (3.10)$$

Кутова швидкість обертання колеса [7]:

$$\omega_{\kappa} = \frac{v}{r_{\kappa}}, \quad (3.11)$$

$$\omega_{\kappa} = \frac{11.11}{0.5715} = 19.44 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Кутова швидкість обертання валу приводного двигуна:

$$\omega = \omega_{\kappa} \cdot i, \quad (3.12)$$

$$\omega = 19.44 \cdot 9.817 = 190.8425 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Кутова швидкість обертання валу приводного двигуна під час холостого ходу: $\omega_0 = 0$.

На основі отриманих значень побудовано тахограми кутової швидкості та кутового прискорення тягового електродвигуна (рисунки 3.2 та 3.3).

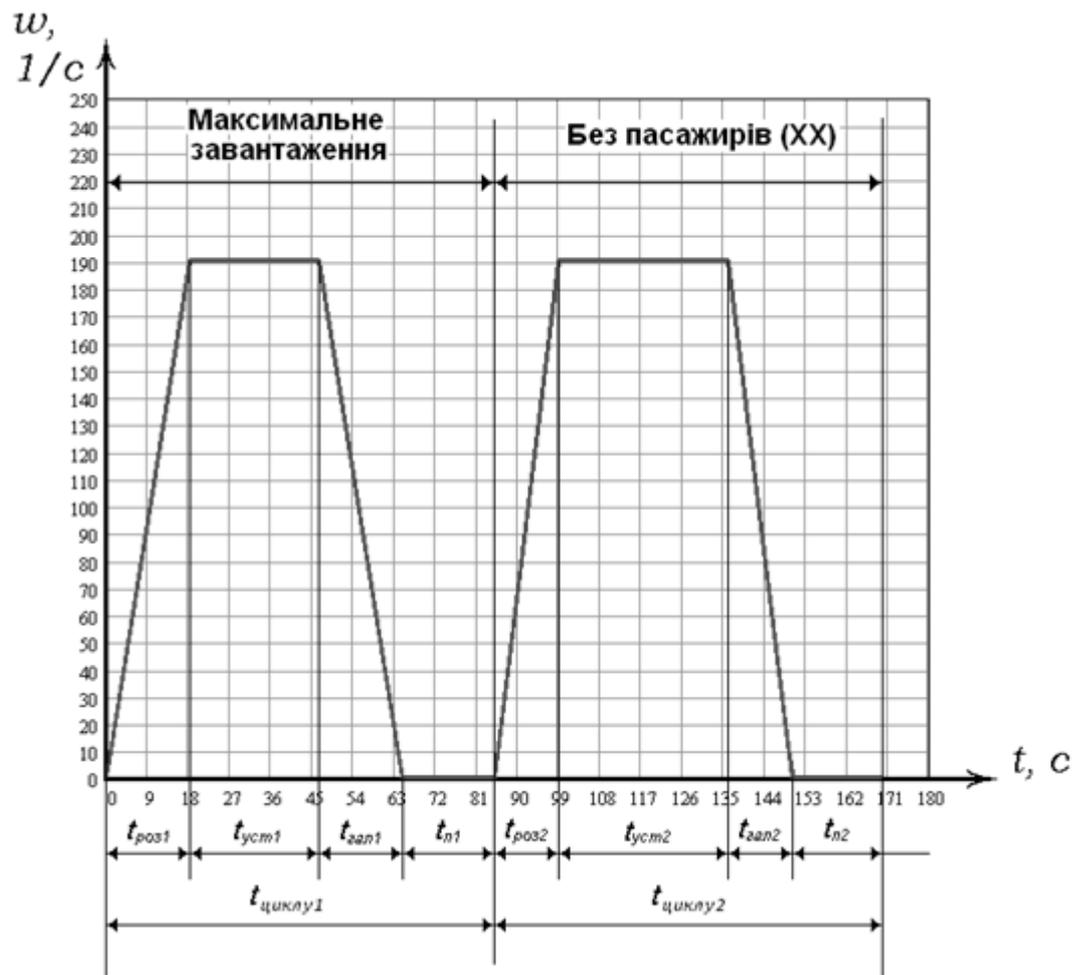


Рисунок 3.2 – Тахограма кутової швидкості ротора електродвигуна

На основі розрахованих значень кутової швидкості визначено відповідні значення кутового прискорення тягового електродвигуна:

$$\varepsilon = \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (3.13)$$

$$\varepsilon = \frac{\omega_{\text{поч}} - \omega_{\text{кін}}}{\Delta t}, \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{0 - 190.8425}{18.52} = -10.31 \text{ (с}^{-2}\text{)},$$

$$\varepsilon_2 = \frac{0 - 190.8425}{13.8875} = -13.742 \text{ (с}^{-2}\text{)},$$

де ε_1 – кутове прискорення при повному завантаженні;

ε_2 – кутове прискорення під час холостого ходу, тобто без пасажирів у салоні.

Графіки тахограми залежності кутового прискорення ε від часу t приведено на рисунку 3.3

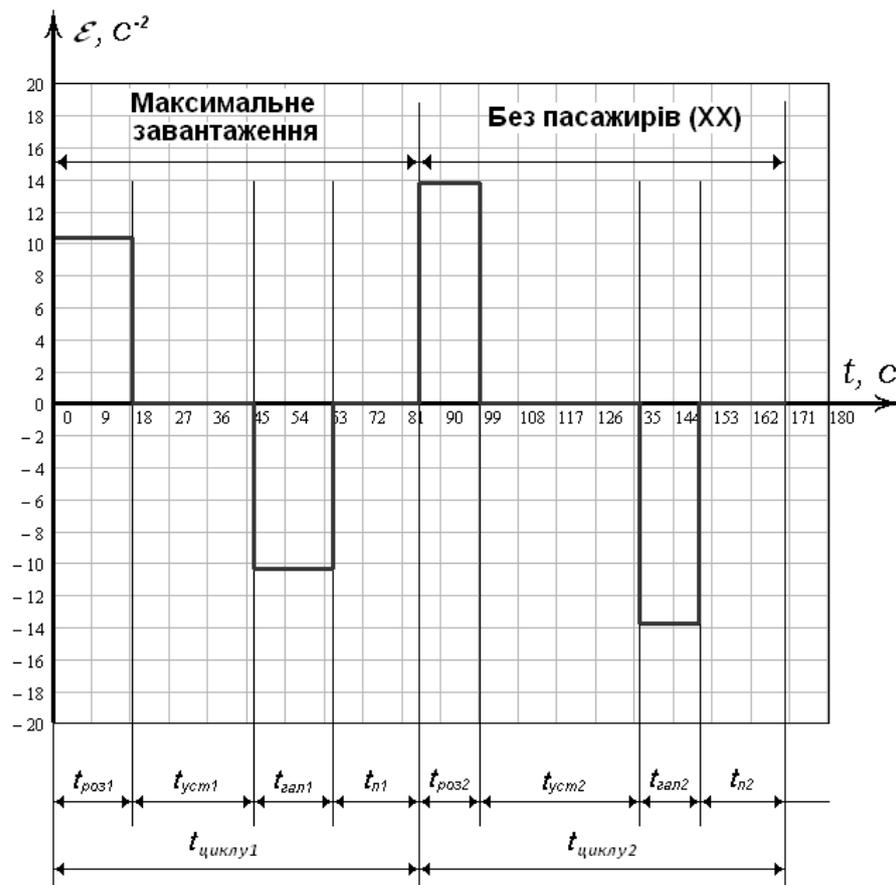


Рисунок 3.3 – Тахограма кутового прискорення ротора електродвигуна

3.3 Розрахунок приведених інерційних мас і моментів інерції

Умовою вибору тягового електродвигуна є забезпечення необхідного максимального моменту:

$$M_{\text{дв.макс}} \geq M_{\text{оп}}, \quad (3.15)$$

де $M_{\text{дв.макс}}$ – максимальний момент двигуна;

$M_{\text{оп}}$ – сумарний момент опору визначається як сума статичної та динамічної складових

$$M_{\text{оп}} = M_{\text{ст.макс}} + M_{\text{дин.макс}}. \quad (3.16)$$

Сили опору які діють на максимально завантажений електромобіль та статичний момент ТЕД приведено на рисунку 3.4

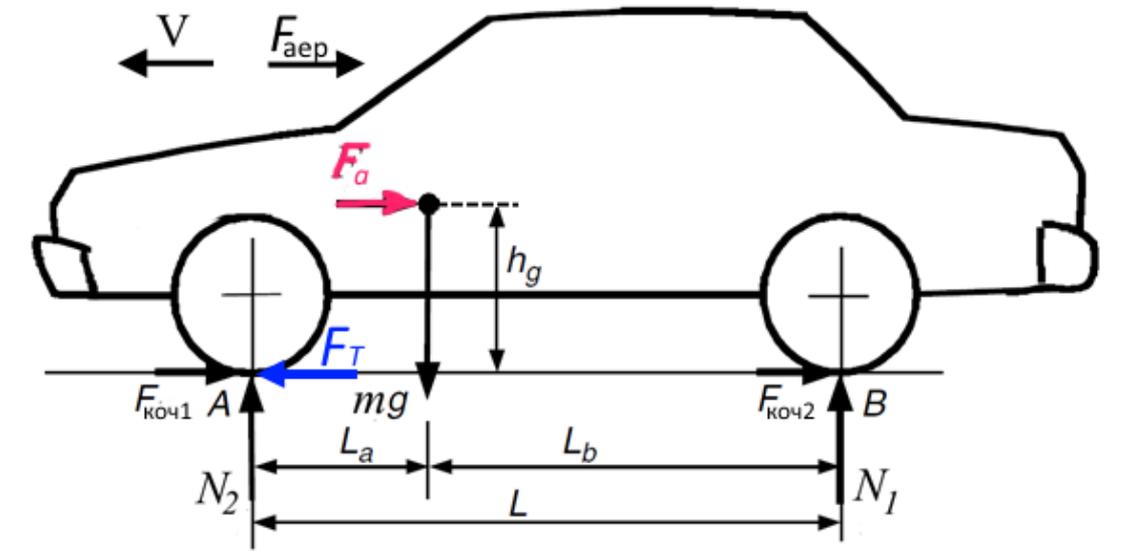


Рисунок 3.4 – Загальне зображення дії кінематичних сил на електромобіль під час його руху

де N – сила реакції опори;

mg – вага ТЗ при граничній місткості;

M_T – момент тяги ведучих коліс задньої вісь;

F_T – сила тяги;

$F_{тр1}$, $F_{тр2}$ – сили тертя, що діють на задню та передню вісь;

$F_{оп}$ – загальна сила опору руху максимально завантаженого ТЗ.

Статичний момент приведений до валу приводного двигуна визначається за формулою:

$$M_{cm.max} = \frac{M_T}{i \cdot \eta_{пер}}, \quad (3.17)$$

де M_T – момент тяги ведучих коліс;

i – загальне передаточне число, ($i = 9,817$);

$\eta_{пер}$ – ККД передачі, ($\eta = 0,97$).

Тяговий момент ведучих коліс:

$$M_T = F_T \cdot R, \quad (3.19)$$

де R – радіус колеса, ($R = 0,5715$ м).

F_T – сила тяги.

Сили, що діють на ТЗ при його русі на підйом приведено на рисунку 3.5:

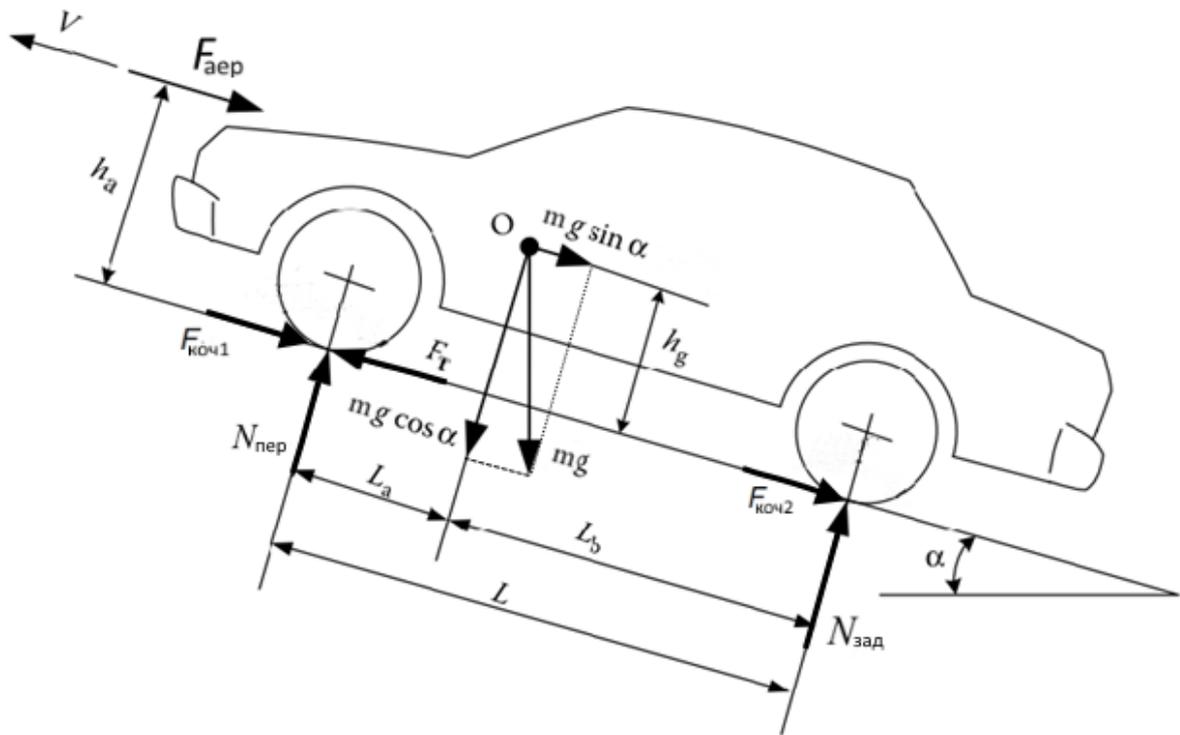


Рисунок 3.6 – Сили, що діють на електромобіль при його русі на підйом

$$\vec{F}_T + \vec{F}_{mp} + \vec{N} + m\vec{g} = m\vec{a} . \quad (3.20)$$

Рівняння руху електромобіля з врахуванням, що вісь OX перпендикулярна до ТЗ та направлена у напрямку руху:

$$F_T - F_{mp} - mg \cdot \sin \alpha = m\mu g , \quad (3.21)$$

де α – максимально можливий кут підйому;

$F_{тр}$ – сила тертя-ковзання;

m_{max} – маса ТЗ при максимальному завантаженні;

g – прискорення вільного падіння, ($g = 9,81 \text{ м/сек}^2$).

Запишемо рівняння відносно осі OY:

$$\begin{aligned} N - mg \cdot \cos \alpha &= 0, \\ N &= mg \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Сила тертя:

$$F_{mp} = \mu N, \quad (3.23)$$

де μ - коефіцієнт тертя-ковзання для асфальтних доріг, ($\mu = 0,02$);

Зробивши відповідні підстановки отримуємо формулу для обчислення сили тяги:

$$F_T = m\mu g + \mu mg \cos \alpha + mg \sin \alpha \quad (3.24)$$

$$F_T = mg(\mu + \mu \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (3.25)$$

Допустима маса транспортного засобу згідно його характеристик складає 2000 кг. Допустиме відхилення маси в більшу сторону – 5 % (2100 кг).

Повна маса ТЗ [6]:

$$m = m_{cn} + m_n(n + k + d) + m_o n, \quad (3.26)$$

де m_{cn} – маса спорядженого електромобіля, ($m_{cn} = 1700$ кг);

m_n – середня маса одного пасажера, ($m_n = 70$ кг);

n – кількість сидячих місць ($n = 4$);

d – кількість водіїв, ($d = 1$);

m_o – маса багажу у одного пасажера, ($m_o = 2$ кг).

$$m = 1700 + 70 \cdot (4 + 1) + 2 \cdot 4 = 2058 \text{ (кг)}.$$

3.4 Визначення максимального моменту та потужності тягового електродвигуна

При визначенні α беремо максимальний підйом, який повинен долати електромобіль 18%. Тобто ТЗ повинен долати підйом висотою у 18 метрів та протяжністю у 100 метрів.

Тангенс α :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{BC}{AC} = \frac{a}{b} = \frac{18}{100} = 0,18 \cdot 100\% = 18\% \quad (3.27)$$

Звідки визначаємо кут α :

$$\alpha = \arctg\left(\frac{a}{b}\right) = 10,2^\circ \quad (3.28)$$

Сила тяги та тяговий момент ведучих коліс:

$$F_T = 2058 \cdot 9,81 \cdot (0,02 + 0,02 \cdot 0,98 + 0,17) = 13271,39 \text{ (Н)}.$$

$$M_T = 13271,39 \cdot 0,5715 = 7584,6 \text{ (Н)}.$$

Статичний момент приведений до валу електродвигуна:

$$M_{ст.маx} = \frac{7584,6}{9,817 \cdot 0,97} = 796,486 \text{ (Н)}.$$

Динамічна складова моменту:

$$M_{дин'.маx} = J_{маx} \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.29)$$

де $J_{маx}$ – загальний момент інерції, приведений до валу електродвигуна при максимальній завантаженості;

$\frac{d\omega}{dt}$ – кутове прискорення під час розгону.

Загальний момент інерції, приведений до валу двигуна при граничному завантаженні:

$$J_{маx} = J_{дв} + \frac{J_z}{i_r^2} + \frac{J_k}{i_r^2 \cdot i_b^2} + m_{маx} \frac{v^2}{\omega_{дв}^2}, \quad (3.30)$$

де $J_{дв}$ - момент інерції ТЕД;

J_r - момент інерції обертових частин головної передачі;

J_k - момент інерції ведучих коліс;

i_r - передаточне число головної передачі;

i_k - передаточне число колісної передачі;

$\omega_{дв}$ - кутова швидкість тягового двигуна;

v - швидкість руху.

З урахуванням того, що моменти інерції обертових частин трансмісії (валів, зубчастих передач і коліс) є значно меншими порівняно з приведеним моментом інерції поступального руху транспортного засобу, у подальших розрахунках ними можна знехтувати. Їх вплив враховано шляхом введення коефіцієнта запасу, що забезпечує необхідну надійність розрахунків.

Значення приведенного до валу двигуна моменту інерції:

$$J_{max} = m_{max} \frac{v^2}{\omega_{ДВ}^2}. \quad (3.31)$$

Кутова швидкість обертання двигуна під час руху з номінальною швидкістю $v = 50$ км/год, враховуючи загальне передаточне число i та радіус колеса R :

$$\omega_{об} = i \cdot \omega_k = i \cdot \frac{v}{R_k} = 9,817 \cdot \frac{50}{0,5715} = 190,84 \text{ (рад / с)}. \quad (3.32)$$

Момент інерції приведений до валу тягового двигуна:

$$J_{max} = 2058 \cdot \frac{50^2}{190,84^2} = 62,6 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}. \quad (3.33)$$

Кутове прискорення двигуна для розгону:

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_p = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega}{t_p} = \frac{190,84}{18,52} = 10,31 \text{ (с}^{-2}\text{)}. \quad (3.34)$$

Динамічний момент під час розгону, для максимального завантаження:

$$M_{дин'.max.} = J_{max} \cdot \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_p = 62,6 \cdot 10,31 = 645,41 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (3.35)$$

Максимальний момент тягового електродвигуна визначається з урахуванням руху електромобіля на максимальний допустимий підйом та режиму розгону при граничному завантаженні:

$$M_{дв.мах} = K_3 \cdot (M_{ст.мах} + M_{дин.мах}), \quad (3.36)$$

де коефіцієнт запасу ($K_3 = 1,1 - 1,3$).

$$M_{дв.мах} = 1,1 \cdot (796,486 + 645,41) = 1586,085 \text{ (Н} \cdot \text{м)}, \quad (3.37)$$

$$M_{дв.мах} = 1,3 \cdot (796,486 + 645,41) = 1680,842 \text{ (Н} \cdot \text{м)}. \quad (3.38)$$

Отримані за формулами (3.37) та (3.38) значення визначають необхідний діапазон регулювання електромагнітного моменту тягового електродвигуна.

Орієнтовне значення максимальної потужності тягового електродвигуна, виходячи з припущення, що двигун асинхронний:

$$P_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{дв.макс}} \cdot n_{\text{дв}}}{9,55}, \quad (3.39)$$

де $n_{\text{дв}}$ – частота обертання магнітного поля статора.

$$n_{\text{дв}} = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (3.40)$$

де f – частота мережі;

p – кількість пар полюсів.

$$n_{\text{дв}} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ (об/хв)}.$$

Орієнтована потужність двигуна:

$$P_{\text{дв}} = \frac{1680,842 \cdot 750}{9,55} = 53200 \text{ (Вт)}.$$

Для попереднього розрахунку потужності приводного двигуна знайдемо силу, яка враховує втрати в трансмісії:

$$F_{\text{вмп}} = F_{\text{мп}} + k_{\text{мп}} v, \quad (3.41)$$

де $F_{\text{дд}}$ – сила тертя в трансмісії при нульовій швидкості, ($F_{\text{мп}} = 102 \text{ Н}$);

$k_{\text{мп}}$ – коефіцієнт врахування впливу швидкості на силу тертя, ($k_{\text{мп}} = 11$).

$$F_{\text{вмп}} = 102 + 11 \cdot 11,11 = 224,21 \text{ (Н)}.$$

Втрати потужності в трансмісії під час вибігу:

$$\Delta P_{\text{мп1}} = F_{\text{вмп}} v, \quad (3.42)$$

$$\Delta P_{\text{мп1}} = 224,21 \cdot 11,11 = 2490,9731 \text{ (Вт)}.$$

Втрати потужності в трансмісії в режимі тяги:

$$\Delta P_{\text{мп2}} = (1 - \eta_{\text{ц}} \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{ш}}) P_{\text{дв}} + \Delta P_{\text{мп1}}, \quad (3.43)$$

де η_u – коефіцієнт корисної дії циліндричної передачі, ($\eta_u = 0.98$);

η_a – коефіцієнт корисної дії гіпоїдної передачі, ($\eta_a = 0.97$);

$\eta_{ш}$ – коефіцієнт корисної дії гіпоїдних шарнірів, ($\eta_{ш} = 0.995$);

$P_{\partial\partial}$ – орієнтовна потужність двигуна, ($P_{\partial\partial} = 53200 \text{ Вт}$).

$$\Delta P_{mp2} = (1 - 0.98 \cdot 0.97 \cdot 0.995) \cdot 53200 + 2490.9731 = 9639.3 \text{ (Вт)}.$$

Коефіцієнт корисної дії трансмісії:

$$\eta_{mp} = \eta_u \cdot \eta_a \cdot \eta_{ш} - \frac{\Delta P_{mp2}}{P_{\partial\partial}}, \quad (3.44)$$

$$\eta_{mp} = 0.98 \cdot 0.97 \cdot 0.995 - \frac{9639.3}{132003} = 0.873.$$

Потужність, яку розвиває електродвигун при граничній завантаженості:

$$P_1 = \frac{V}{\eta_{mp}} (g \cdot m \cdot \psi_{\partial} + k_{нов} A_{нов} V^2), \quad (3.45)$$

де g – прискорення вільного падіння, ($g = 9.81 \text{ м/с}^2$);

ψ_{∂} – коефіцієнт опору дороги, ($\psi_{\partial} = 0.038$);

$k_{нов}$ – коефіцієнт опору повітря, ($k_{нов} = 0.02$);

$A_{нов}$ – площа лобового скла, ($A_{нов} = 8 \text{ м}^2$);

$$P_2 = \frac{V}{\eta_{mp}} (g \cdot m_{сн} \cdot \psi_{\partial} + k_{нов} A_{нов} V^2), \quad (3.46)$$

$$P_2 = \frac{11.11}{0.873} (9.81 \cdot 11500 \cdot 0.038 + 0.02 \cdot 8 \cdot 123,432) = 53.66 \text{ (кВт)}.$$

Враховуючи коефіцієнт запасу потужність тягового двигуна:

$$P = k_{зан} \cdot P_1, \quad (3.47)$$

де $k_{зан}$ – коефіцієнт запасу потужності двигуна ($k_{зан} = 1,3$).

$$P = 1.1 \cdot 53.66 = 69.75 \text{ (кВт)}.$$

На основі виконаних розрахунків для електроприводу обрано асинхронний електродвигун типу 4A250S4У3, основні параметри якого наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2- Параметри тягового двигуна

Тип двигуна	4A250S4Y3
Потужність $P_{\text{ном}}$, кВт	75
ККД, %	94
$\cos\varphi$	0,82
Номинальна напруга, В	220/380
Маса, кг	741
Максимальний момент M_{max} , Н·м	2600
Фазна напруга ротора $U_{2\text{ф}}$, В	248
Струм ротора I_2 , А	154
Струм статора I_1 , А	147
Кількість обертів $n_{\text{ном}}$, об/хв	750
Момент інерції $J_{\text{об}}$, кг·м ²	5,25
Номинальний момент $M_{\text{ном}}$, Н·м	1500,8

3.4 Перевірка вибраного електродвигуна

Перевірка вибраного електродвигуна виконана за такими критеріями:

- допустимий нагрів (метод еквівалентного моменту);
- перевантажувальна здатність;
- умови пуску.

Еквівалентний момент двигуна:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum (M_i^2 \cdot t_i)}{t_{\text{ц}}}}, \quad (3.48)$$

$$M_{\text{екв}} = 516.337 \text{ (Н·м)}.$$

Обчислюємо номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P}{n}, \quad (3.49)$$

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{75000}{750} = 1300,7 \text{ (Н}\cdot\text{м)}.$$

Розрахунок еквівалентного моменту показав, що:

$$M_{\text{ном}} > M_{\text{екв}}, \quad (3.50)$$

$$1300,7 > 516,337 \text{ (Нм)}.$$

тобто умова допустимого нагріву виконується. Перевірка за перевантажувальною здатністю також підтвердила можливість короткочасної роботи двигуна в режимах максимального навантаження.

Перевіримо електродвигун за умовою допустимого перевантаження. Повинна виконуватися умова:

$$\lambda \cdot M_{\text{ном}} > M_{\text{мах}}, \quad (3.51)$$

де $M_{\text{мах}}$ – максимальний статичний момент на валу двигуна, $M_{\text{мах}} = 715,857 \text{ Н}\cdot\text{м}$;

λ – перевантажувальна здатність двигуна, ($\lambda = 2.5$).

$$3501,75 > 1680,482 \text{ (Н}\cdot\text{м)}.$$

За умовою допустимого короткочасного перевантаження двигун вибрано.

3.5 Розрахунок статичних характеристик електроприводу

Для побудови механічної характеристики електродвигуна використано спрощену формулу Клосса, яка дозволяє адекватно описати статичні характеристики потужних асинхронних двигунів.

$$M = \frac{2 \cdot M_{\kappa}}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s}}, \quad (3.52)$$

де M_{κ} - критичний момент двигуна, Н·м;

s -ковзання;

s_{κ} - критичне ковзання.

Всі необхідні параметри знайдемо з паспортних даних електродвигуна.

Номінальний момент двигуна:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}}, \quad (3.53)$$

$$M_{ном} = \frac{110000}{750 \cdot 0,1047} = 1400,83 \text{ (Н·м)}.$$

Перевантаження двигуна по максимальному моменту:

$$\lambda_m = \frac{M_{макс.}}{M_{ном}}, \quad (3.54)$$

$$\lambda_m = \frac{2600}{1400,83} = 1,86.$$

Критичний момент двигуна:

$$M_k = M_{max} = \lambda_m M_{ном}, \quad (3.55)$$

$$M_k = 1,86 \cdot 1400,83 = 2605,5 \text{ (Н·м)}.$$

Критичне ковзання:

$$S_{кр} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (3.56)$$

$$S_{кр} = \frac{0,014}{\sqrt{0,015^2 + 0,13^2}} = 0,07$$

Тоді вираз (3.52) набуває вигляду:

$$M = \frac{5211}{\frac{s}{0,07} + \frac{0,07}{s}} \quad (3.57)$$

На основі паспортних даних двигуна визначено критичний момент та критичне ковзання. Побудована природна механічна характеристика наведена на рисунку 3.7.

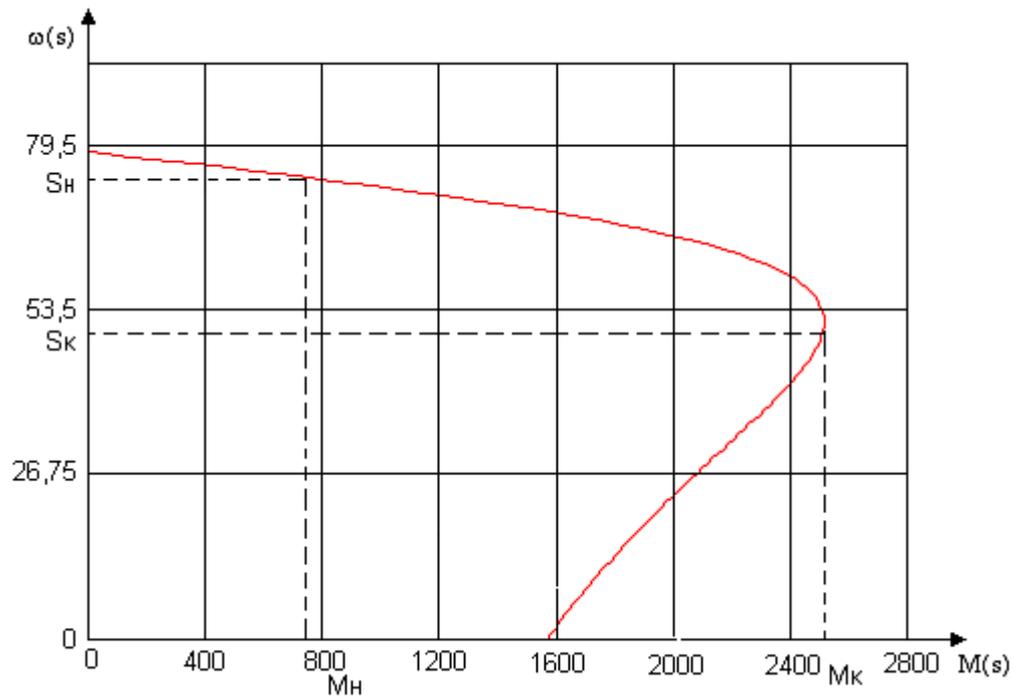


Рисунок 3.7 – Природна механічна характеристика двигуна

3.6 Розрахунок динамічних характеристик системи

Розрахуємо статичні та динамічні моменти навантаження для режимів максимального завантаження та холостого ходу. Побудовані діаграми навантажень (рисунок 3.8-3.10) дозволяють оцінити роботу електроприводу в реальних експлуатаційних умовах.

1. При найбільшому завантаженні.

Статичний момент:

$$M_{cm1} = 9550 \frac{P_1}{n}, \quad (3.58)$$

$$M_{cm1} = 9550 \frac{75}{750} = 1300,67 \text{ (Н·м)}.$$

Динамічний момент обчислено раніше, він рівний 645,41 Н·м.

2. При відсутності пасажирів (холостий хід).

Статичний момент:

$$M_{cm2} = 9550 \frac{P_2}{n}, \quad (3.59)$$

$$M_{cm2} = 9550 \frac{69.338}{750} = 882.9 \text{ (Н·м)}.$$

Динамічний момент:

$$M_{дин2} = J_2 \frac{\omega}{t_{роз2}}, \quad (3.60)$$

$$M_{дин2} = 14.426 \frac{408.407}{17.361} = 339.365 \text{ (Н·м)}.$$

Діаграми моментів та навантаження електродвигуна, побудовані за допомогою Mathcad приведені на рисунках 3.8, 3.9, 3.10.

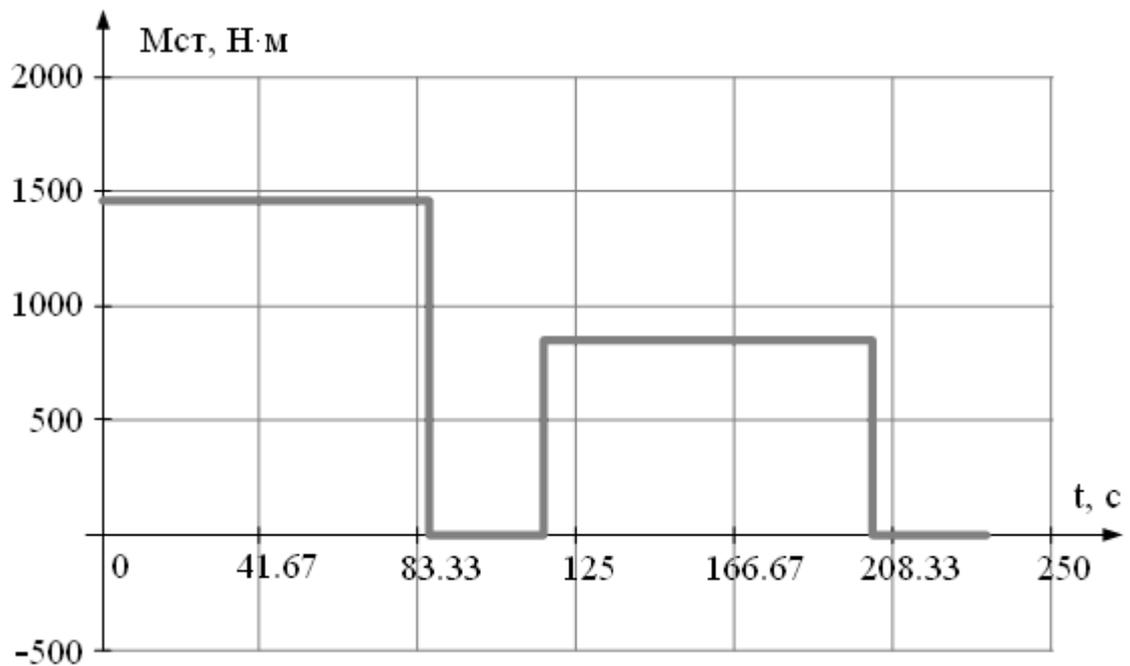


Рисунок 3.8 – Діаграма статичного навантаження двигуна

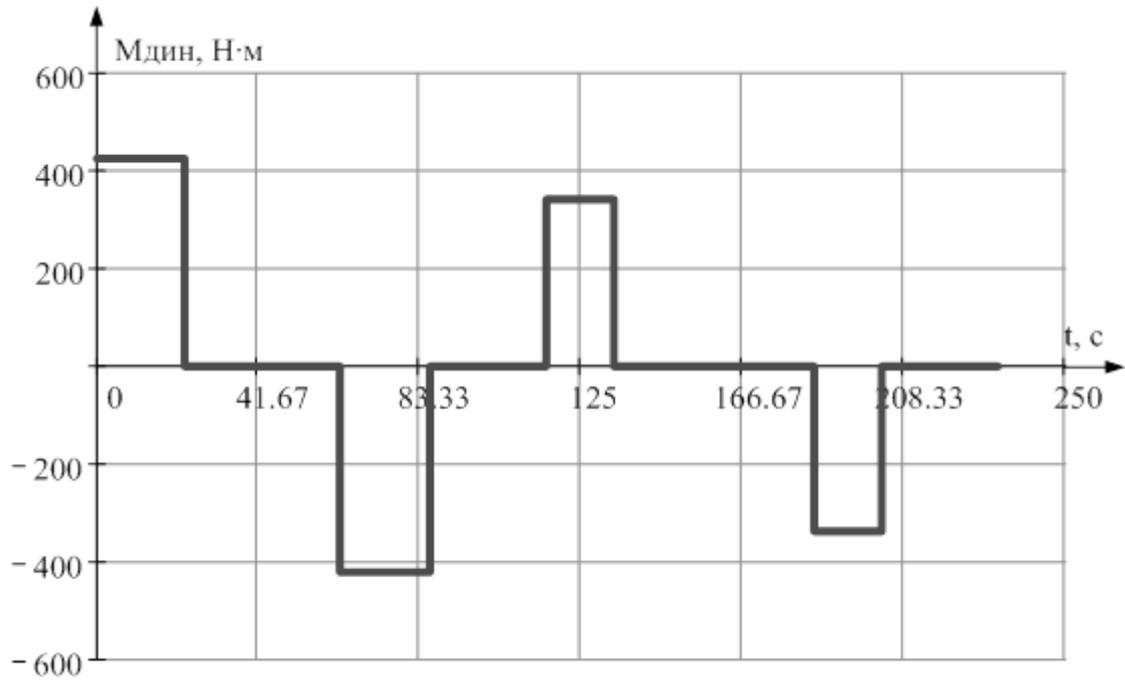


Рисунок 3.9 – Діаграма динамічного навантаження двигуна

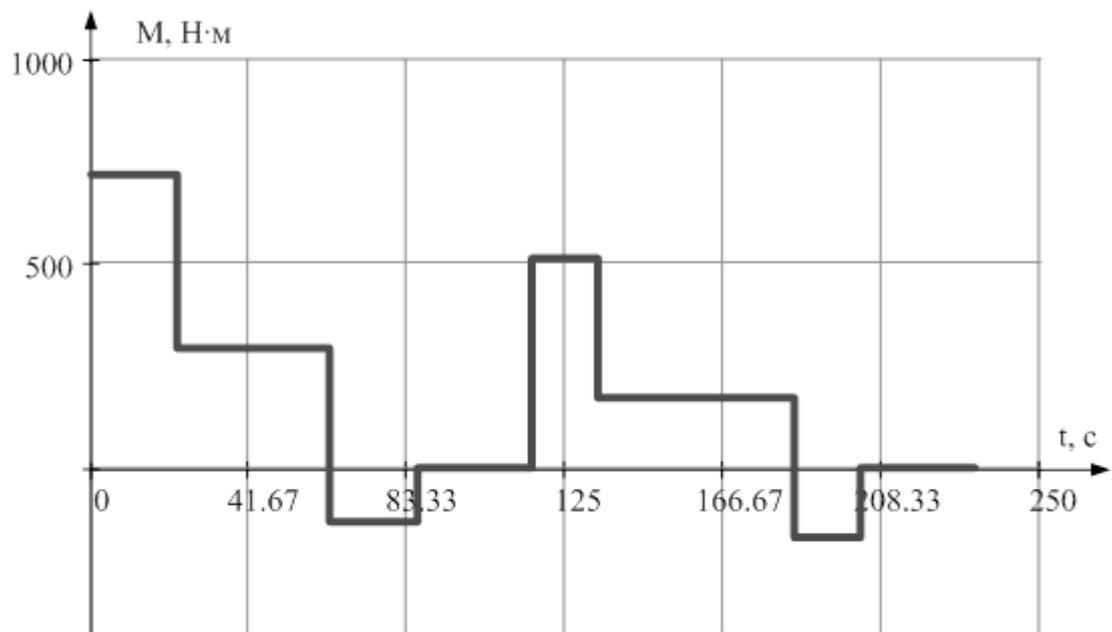


Рисунок 3.10 – Діаграма навантаження двигуна

Висновки. виконано розрахунок тягового електроприводу електромобіля та перевірку вибраного тягового електродвигуна. Побудовано кінематичну

схему тягового механізму та визначено характерні режими руху електромобіля в міському циклі. На основі тахограм швидкості та прискорення розраховано статичні та динамічні навантаження на електродвигун. Виконано розрахунок приведених моментів інерції та визначено максимальні значення електромагнітного моменту і потужності тягового електродвигуна з урахуванням руху на підйом та режимів розгону. За результатами розрахунків обрано асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором типу 4A250S4У3, який відповідає вимогам за потужністю, моментом та діапазоном регулювання. Перевірка вибраного двигуна за умовами нагріву, перевантажувальної здатності та пускових режимів підтвердила коректність його вибору та можливість роботи в умовах міського циклу руху електромобіля. Побудовані статичні та динамічні характеристики електроприводу свідчать про забезпечення необхідних тягових і енергетичних показників. Отримані результати створюють основу для подальшого розгляду та розробки системи автоматизованого керування тяговим електроприводом, що є предметом наступного розділу роботи.

4 СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

4.1 Побудова функціональної схеми системи автоматизованого керування

Система автоматизованого керування (САК) тяговим електроприводом електромобіля побудована на основі принципів векторного керування асинхронним електродвигуном з орієнтацією за вектором потокозчеплення ротора. Такий підхід дозволяє забезпечити незалежне керування моментною та потоковою складовими електромагнітних процесів у двигуні, що є необхідною умовою для досягнення високих динамічних і енергетичних показників електроприводу.

Функціональна схема системи векторного керування асинхронним електродвигуном наведена на рисунку 4.1.

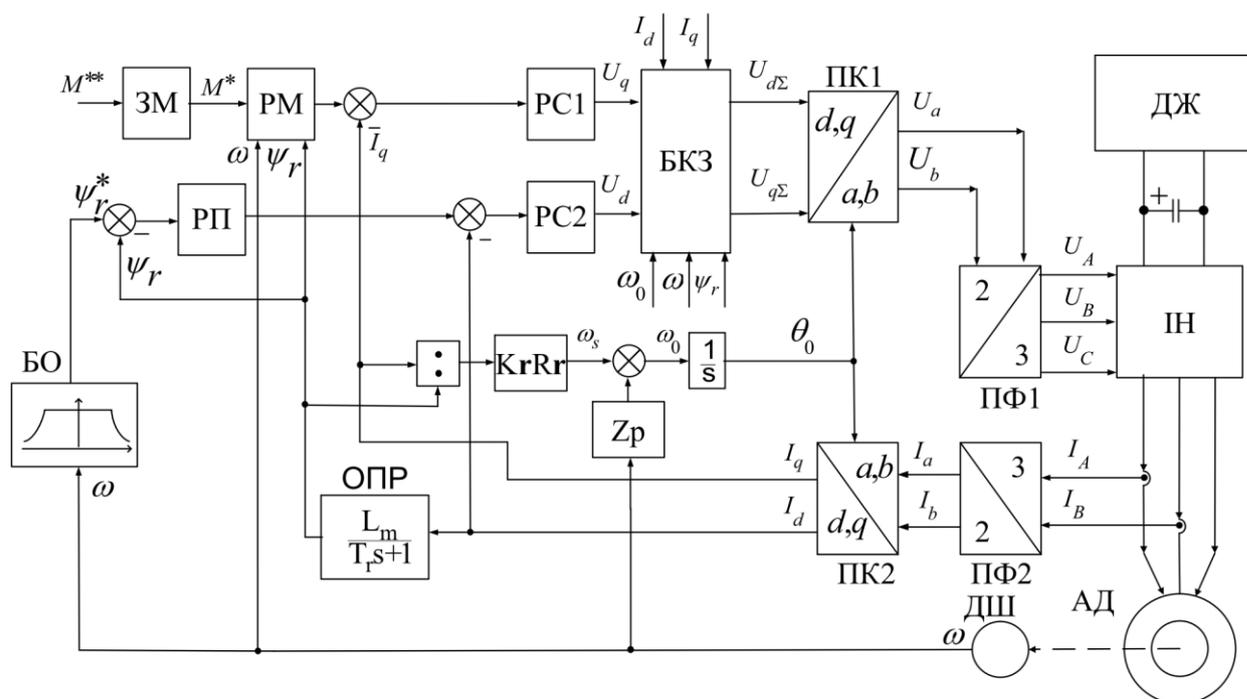


Рисунок 4.1 – Функціональна схема САК асинхронного електродвигуна

Функціонально САК можна умовно поділити на три основні частини:

- частину регулювання, що включає регулятори струму, поточозчеплення та моменту;
- силову частину, до складу якої входять джерело живлення та інвертор напруги;
- частину векторних перетворень, яка забезпечує перехід між різними системами координат.

На схемі прийняті такі позначення:

ЗМ – блок завдання моменту (у випадку електромобіля – сигнал від педалі акселератора);

М* – заданий електромагнітний момент;

РМ – регулятор моменту;

РП – регулятор поточозчеплення ротора;

РС1, РС2 – регулятори струмів відповідно I_q та I_d

БКЗ – блок компенсації зв'язків у математичній моделі асинхронного двигуна;

ПК1, ПК2 – блоки перетворення координат;

ПФ1, ПФ2 – перетворювачі фаз;

ДЖ – джерело живлення (тягові акумуляторні батареї);

ІН – автономний інвертор напруги;

АД – асинхронний електродвигун;

ДШ – датчик швидкості.

Блок компенсації зв'язків виконує компенсацію перехресних членів математичної моделі АД, що дозволяє розглядати контури струмів I_q та I_d , та як незалежні.

4.2 Перетворення координат у системі векторного керування

Для реалізації векторного керування використовується перехід від трифазної системи координат A, B, C до двофазної нерухомої системи α, β до рухомої системи координат d, q , пов'язаної з вектором потокозчеплення ротора.

Перетворення струмів з трифазної у двофазну систему здійснюється за співвідношеннями:

$$I_\alpha = I_A; \quad I_\beta = (I_A + 2I_B)/\sqrt{3}, \quad (4.1)$$

У блоці ПК2 сигнали I_α, I_β перетворюються у складові струму рухомої системи координат:

$$\begin{aligned} I_d &= I_\alpha \cos\theta_0 + I_\beta \sin\theta_0; \\ I_q &= I_\beta \cos\theta_0 - I_\alpha \sin\theta_0, \end{aligned} \quad (4.2)$$

де θ_0 – кут орієнтації вектора потокозчеплення ротора.

Блок БКЗ формує компенсуючі напруги:

$$\begin{aligned} u_{qk} &= \frac{L_1 \omega_0 I_d + K_r z_p \omega \psi_r}{K_u}, \\ u_{dk} &= -\frac{L_1 \omega_0 I_q + K_r \psi_r / T_r}{K_u}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

де K_u – коефіцієнт передачі інвертора.

Сумарні складові напруг у координатах d, q визначаються як:

$$u_{d\Sigma} = u_d + u_{dk}, \quad u_{q\Sigma} = u_q + u_{qk}, \quad (4.4)$$

Далі здійснюється зворотнє перетворення у систему координат α, β :

$$\begin{aligned} u_\alpha &= u_{d\Sigma} \cos\theta_0 - u_{q\Sigma} \sin\theta_0, \\ u_\beta &= u_{d\Sigma} \sin\theta_0 + u_{q\Sigma} \cos\theta_0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Та у трифазну систему напруг:

$$\begin{aligned}
 u_A &= u_\alpha, \\
 u_B &= \frac{-u_\alpha + \sqrt{3}u_\beta}{2}, \\
 u_C &= \frac{-u_\alpha - \sqrt{3}u_\beta}{2}.
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

4.3 Синтез регуляторів системи векторного керування

4.3.1 Синтез регулятора струму

Контур регулювання струму побудований за принципом підпорядкованого регулювання та налаштовується на модульний оптимум. Структурна схема контуру регулювання струму I_d наведена на рисунку 4.2.

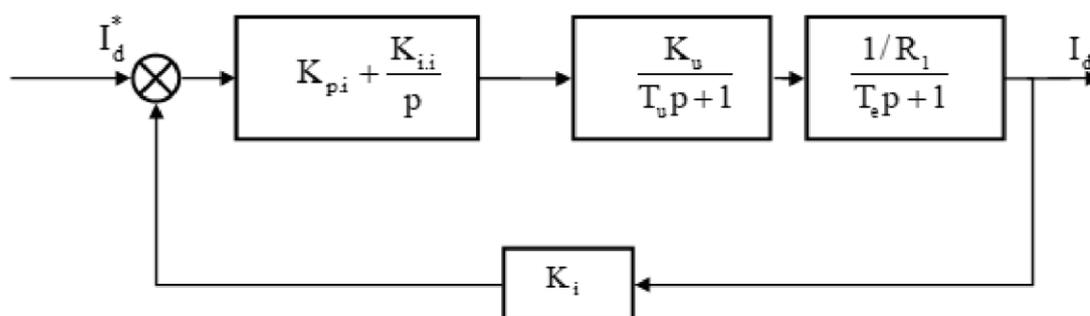


Рисунок 4.2 – Контур регулювання струму

Передаточна функція об'єкта регулювання має вигляд:

$$W_{0.p.c.}(p) = \frac{K_u K_i}{R_l (T_u p + 1)(T_l p + 1)}.
 \tag{4.7}$$

При налаштуванні на модульний оптимум ПІ-регулятор струму описується передаточною функцією:

$$W_{рег.i}(p) = K_{p.i} + \frac{K_{i.i}}{p}.
 \tag{4.8}$$

де коефіцієнти регулятора визначаються за відомими співвідношеннями.

Отримана передаточна функція замкненого контуру має вигляд аперіодичної ланки першого порядку:

$$W_{зам.с}(p) = \frac{1}{2T_u p + 1}. \quad (4.9)$$

Контури регулювання струмів I_d та I_q є ідентичними за структурою та параметрами.

4.3.2 Синтез регулятора потокозчеплення ротора

Контур регулювання потокозчеплення ротора побудований на основі ПІ-регулятора та налаштований на модульний оптимум. Структурна схема контуру наведена на рисунку 4.3.

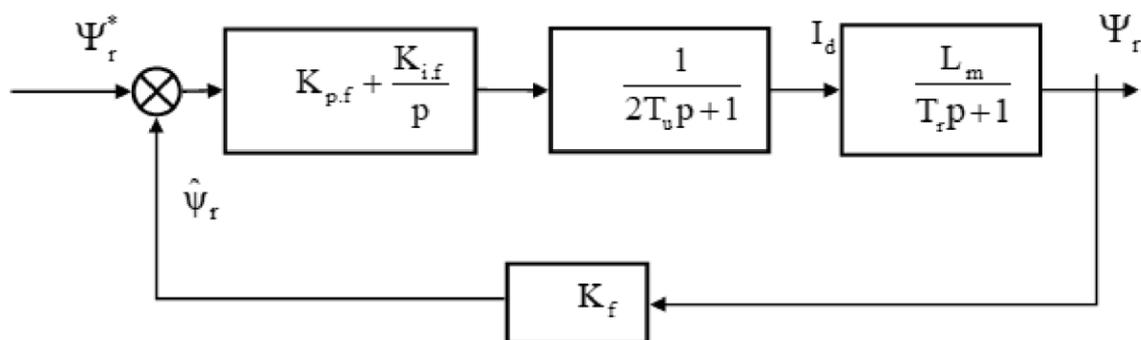


Рисунок 4.3 – Контур регулювання потокозчеплення ротора

Передаточна функція об'єкта:

$$W_{0p.n}(p) = \frac{L_m K_f}{(2T_u p + 1)(T_r p + 1)}. \quad (4.10)$$

ПІ-регулятор потокозчеплення має вигляд:

$$W_{рег.н}(p) = K_{p.f} + \frac{K_{i.f}}{p}. \quad (4.11)$$

4.3.3 Синтез регулятора моменту

Регулятор моменту формує завдання струму I_q^* на основі заданого моменту M^* . Його структурна схема наведена на рисунку 4.4.

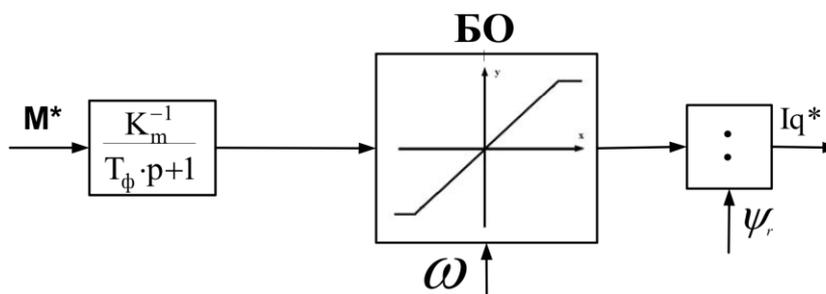


Рисунок 4.4 – Блок регулятора моменту

Регулятор містить обмежувач, який забезпечує обмеження моменту на рівні номінального значення двигуна, а також фільтр першого порядку для згладжування різких змін завдання.

4.4 Побудова енергоощадної системи автоматизованого керування

З метою зменшення втрат потужності в усталених режимах роботи електродвигуна у САК реалізовано енергоощадний алгоритм керування, що мінімізує сумарні втрати в міді та сталі асинхронного двигуна.

Для цього використано T-подібну схему заміщення фази асинхронного двигуна (рисунок 4.5).

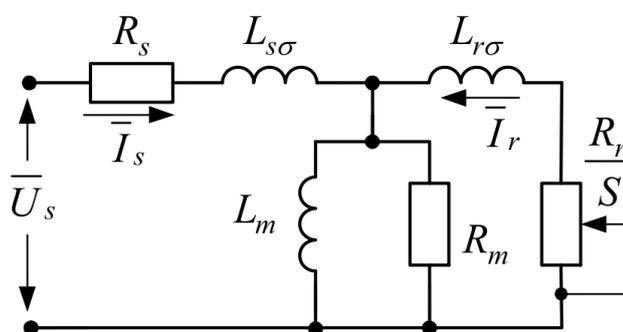


Рисунок 4.5 – T-подібна схема заміщення фази асинхронного двигуна

Оптимальне значення модуля потокозчеплення ротора визначається за критерієм мінімуму втрат:

$$\Psi_r^{opt} = |I_q| \sqrt{\frac{R_s + K_r^2 (R_r + 2K_e R_r^2)}{R_s / L_m^2 + K_h z_p |\omega| + K_e z_p^2 \omega^2}}. \quad (4.12)$$

Модифікована функціональна схема енергоощадної САК наведена на рисунку 4.6.

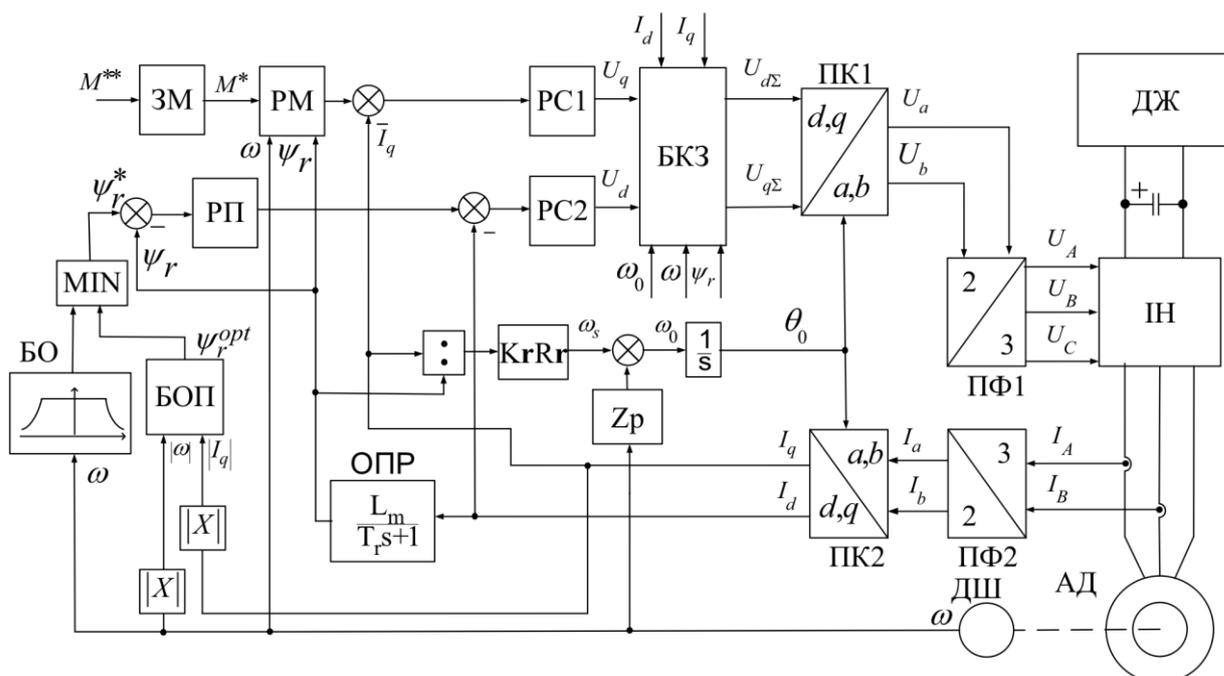


Рисунок 4.6 – Функціональна схема енергоощадної САК асинхронного електроприводу

У порівнянні з існуючою системою векторного керування асинхронним електродвигуном (рисунок 4.1), запропонована енергоощадна система автоматизованого керування (рисунок 4.6) відрізняється наявністю двох додаткових функціональних блоків, а саме: блоку оптимального потокозчеплення (БОП) та блоку мінімального вибору (MIN) сигналів з блоків БО та БОП.

Блок оптимального потокозчеплення (БОП) призначений для визначення оптимального значення модуля вектора потокозчеплення ротора Ψ_r^{opt} відповідно до критерію мінімуму сумарних втрат потужності в асинхронному

електродвигуні. На вхід БОП подаються сигнали модуля швидкості обертання $|\omega|$ та струму моментної складової I_q , на основі яких формується оптимальне значення потокозчеплення згідно з виразом (4.12). Таким чином, у блоці БОП реалізується адаптація рівня збудження електродвигуна до поточного режиму роботи.

Блок MIN виконує функцію вибору мінімального значення між сигналом оптимального потокозчеплення $\Psi_{r_{opt}}$, сформованим у блоці БОП, та сигналом обмеження потокозчеплення, що надходить із блоку обмеження (БО). Це дозволяє забезпечити виконання умов обмеження по максимальному струму та напрузі електродвигуна, а також запобігти перевищенню допустимих теплових і електромагнітних навантажень.

Введення зазначених блоків дозволяє перейти від класичного векторного керування з фіксованим значенням потокозчеплення ротора до *енергоощадного керування з оптимізацією магнітного режиму асинхронного електродвигуна*. У результаті зменшуються втрати в сталі та міді двигуна в усталених режимах, що сприяє підвищенню загальної енергоефективності тягового електроприводу та збільшенню запасу ходу електромобіля.

Спрощену електричну принципову схему тягового електроприводу електромобіля наведено на рисунку 4.7.

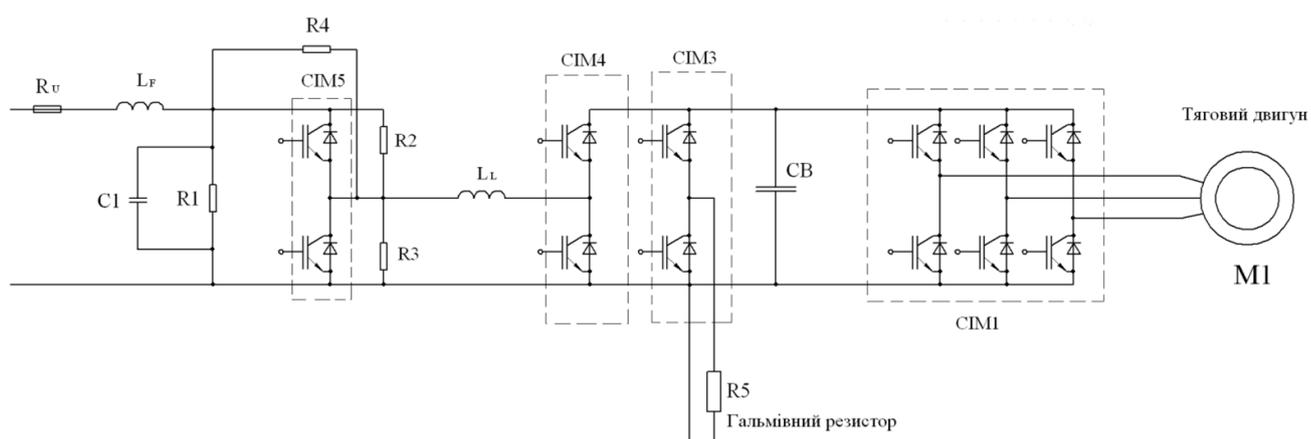


Рисунок 4.7 – Спрощена електрична принципова схема системи електроприводу

На рисунку 4.7 позначено:

M1 – тяговий електродвигун;

M2 – електродвигун вентилятора системи охолодження;

CB – конденсаторна батарея проміжної ланки постійного струму;

SIM1–SIM4 – силові інтелектуальні модулі (IGBT-модулі інвертора та перетворювача);

RU – високовольтний запобіжник;

LF, LL – дроселі вхідного та проміжного фільтрів;

C1 – конденсатор LC-фільтра;

R1–R4 – резистивні елементи схеми;

R5 – гальмівний резистор.

У лівій частині схеми розташовані елементи вхідного фільтра та гальмівного переривача, які забезпечують згладжування пульсацій напруги живлення, обмеження струмових перенавантажень та відведення енергії під час рекуперативного або аварійного гальмування. Центральна частина схеми містить силові інтелектуальні модулі та конденсаторну батарею проміжної ланки постійного струму, а в правій частині розміщено автономний інвертор, що живить тяговий електродвигун.

Висновок. Розроблено та проаналізовано функціональну схему системи автоматизованого керування тяговим асинхронним електроприводом, побудовану на основі принципів векторного керування з орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора. Наведено структуру системи, описано призначення її основних функціональних блоків, а також пояснено принцип формування керуючих сигналів у координатних системах $d - q$, $\alpha - \beta$ та $A - B - C$.

На відміну від класичної системи векторного керування, у роботі запропоновано модифіковану енергоощадну систему автоматизованого керування, функціональну схему якої доповнено блоком оптимального

потокочеплення (БОП) та блоком мінімального вибору (MIN). Введення цих блоків дозволяє реалізувати адаптивне керування рівнем магнітного збудження асинхронного електродвигуна залежно від поточного режиму роботи.

Блок оптимального потокочеплення забезпечує визначення оптимального значення модуля вектора потокочеплення ротора за критерієм мінімуму сумарних втрат потужності в електродвигуні з урахуванням швидкості обертання та струму моментної складової. Блок MIN виконує вибір мінімального значення між оптимальним та обмеженим потокочепленням, що гарантує дотримання допустимих електричних і теплових режимів роботи електропривода.

Застосування запропонованої енергоощадної системи керування дозволяє зменшити магнітні та електричні втрати асинхронного електродвигуна в усталених режимах, підвищити загальну енергоефективність тягового електропривода та створює передумови для збільшення запасу ходу електромобіля. Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленої функціональної схеми в складі сучасних тягових електроприводів транспортних засобів.

5 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

5.1 Побудова моделі САК АД електромобіля

Для дослідження динамічних і статичних режимів роботи системи автоматизованого керування (САК) асинхронним тяговим електродвигуном електромобіля була побудована імітаційна модель у середовищі MATLAB/Simulink.

Модель реалізує структуру системи векторного керування асинхронним двигуном, синтез регуляторів якої був виконаний у попередньому розділі. Схема моделювання наведена на рисунку 5.1.

У моделі реалізовані такі основні блоки:

- два блоки перетворення координат: $b \rightarrow d, q$; $d, q \rightarrow a, b$
- модель асинхронного двигуна;
- модель автономного інвертора напруги;
- регулятор швидкості;
- регулятор потокозчеплення ротора;
- два регулятори струму i_d та i_q
- блок задання траєкторії руху (Signal Builder);
- блоки обчислення витраченої енергії та пройденої відстані.

Дана схема моделі дозволяє досліджувати електромеханічні процеси в тяговому електроприводі електромобіля з урахуванням змін навантаження та режимів руху.

Для аналізу перехідних процесів у системі керування використано фрагмент стандартного міського їздового циклу NEDC-15, який широко застосовується для оцінювання енергоспоживання транспортних засобів у міських умовах.

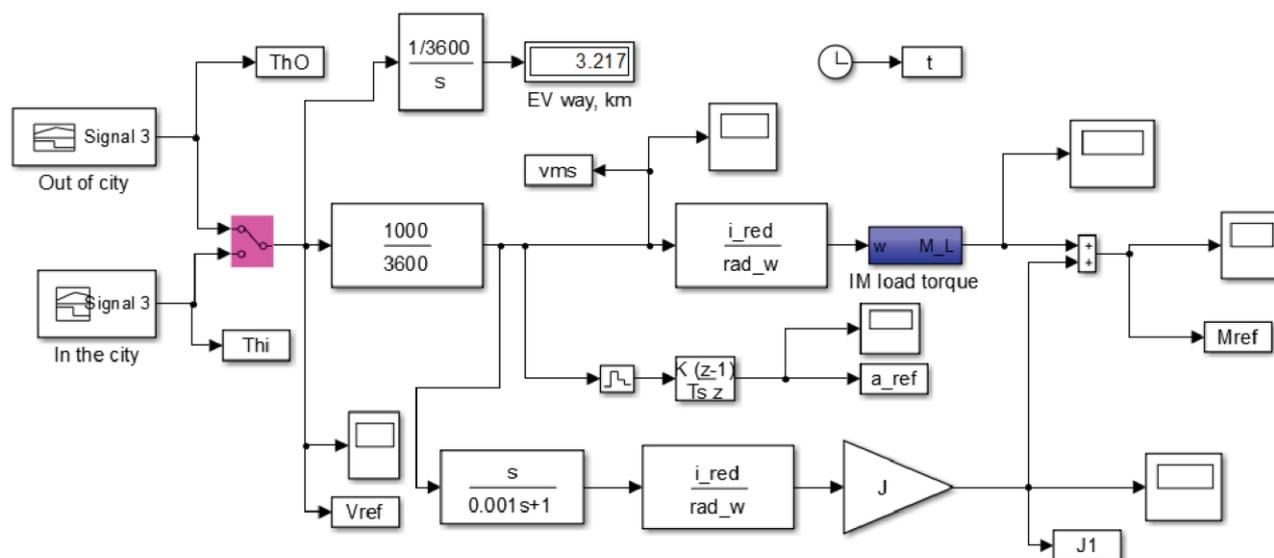


Рисунок 5.1 – Схема моделювання

З метою зменшення часу моделювання та підвищення наочності перехідних процесів було використано модифікований варіант циклу, що відповідає приблизно чверті базового NEDC-15. При цьому: скорочено тривалість пауз; збережено характерні ділянки розгону, руху зі сталою швидкістю, вибігу та гальмування; дослідження проводилось для режиму міського руху з мінімальним завантаженням електромобіля.

Загальна тривалість модельованого циклу становить 200 с.

Траєкторія зміни швидкості електромобіля в часі наведена на рисунку 5.2.

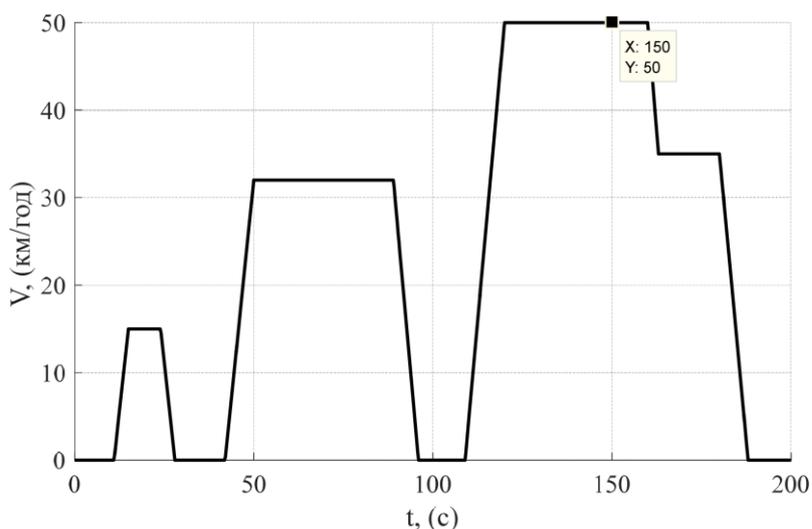


Рисунок 5.1 – Траєкторія зміни швидкості електромобіля в км/год

У процесі моделювання було отримано часові залежності основних електромеханічних величин тягового електроприводу.

На рисунку 5.3 наведено графік перехідного процесу зміни електромагнітного моменту асинхронного двигуна.

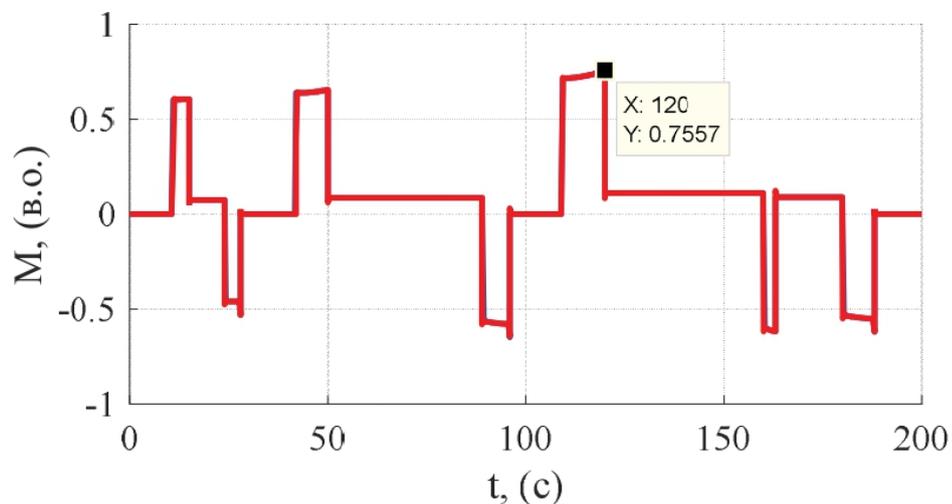


Рисунок 5.3 – Перехідний процес зміни електромагнітного моменту

На рисунку 5.4 показано зміну похибки регулювання моменту.

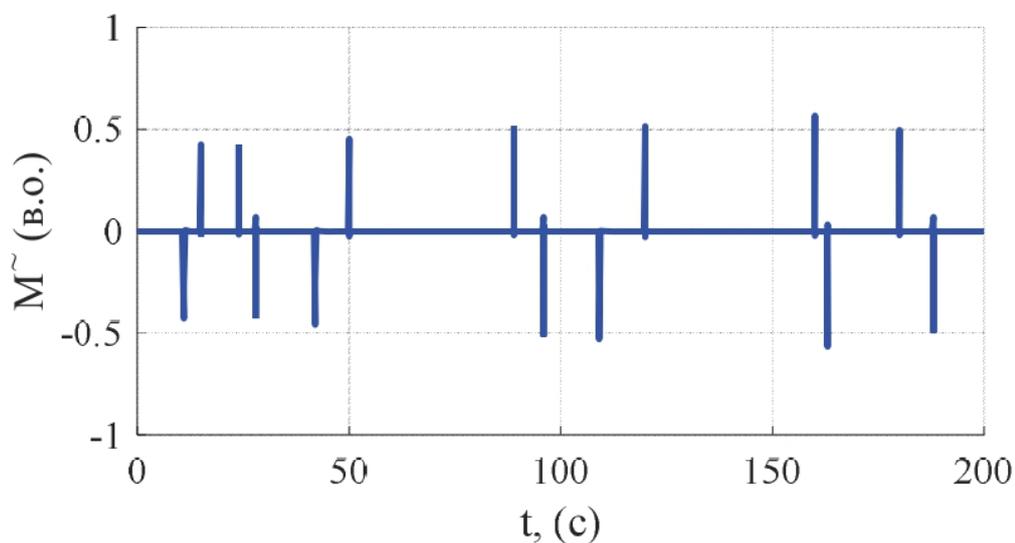


Рисунок 5.4 – Перехідний процес зміни похибки моменту

Перехідний процес зміни кутової швидкості ротора асинхронного двигуна зображений на рисунку 5.5.

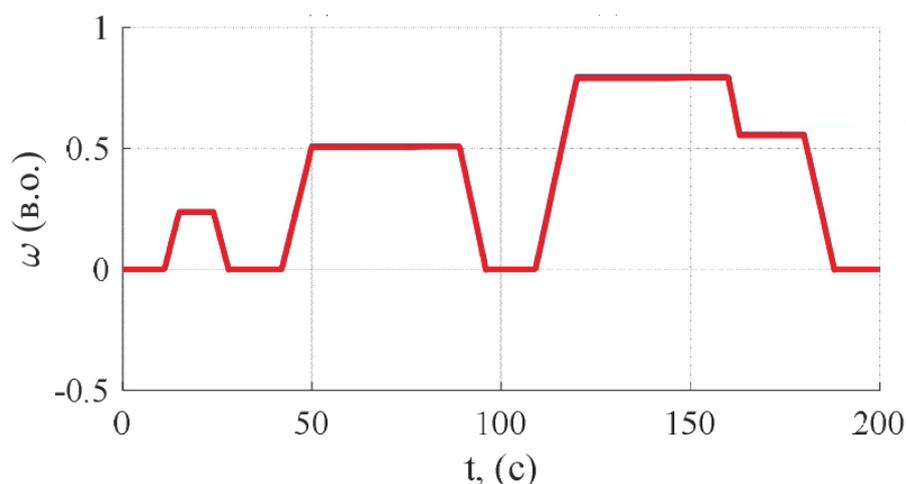


Рисунок 5.5 – Перехідний процес зміни кутової швидкості

На рисунку 5.6 наведено залежність витрат енергії в часі для стандартного та енергоощадного режимів керування.

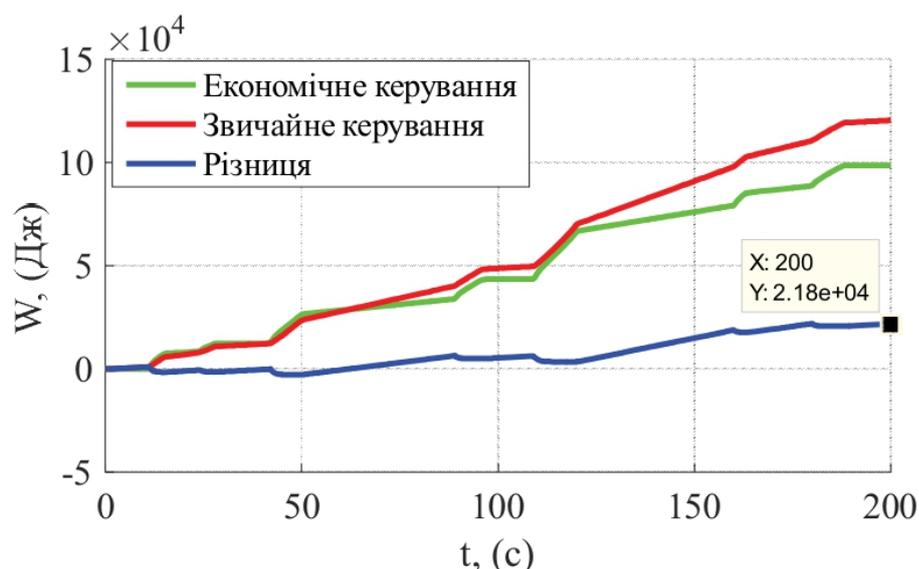


Рисунок 5.6 – Перехідний процес зміни витрат електроенергії

Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що використання енергоощадного алгоритму керування, заснованого на оптимізації потокозчеплення ротора, дозволяє суттєво зменшити енергоспоживання електроприводу в міському циклі руху.

З отриманих графіків видно, що сумарні витрати енергії у режимі енергоощадного керування зменшуються приблизно на 22 кДж у межах

розглянутого модельного циклу, що відповідає зниженню енергоспоживання приблизно на 18 % порівняно зі стандартним режимом векторного керування.

При приведенні результатів до пробігу 100 км очікувана економія електричної енергії становить близько 3 кВт·год / 100 км.

Висновок: Виконано імітаційне моделювання системи автоматизованого керування асинхронним тяговим електродвигуном електромобіля в середовищі MATLAB/Simulink. Побудована модель дозволяє досліджувати динамічні та статичні режими роботи електроприводу з урахуванням реальної траєкторії руху транспортного засобу.

У результаті моделювання встановлено, що застосування енергоощадного алгоритму керування забезпечує зменшення витрат електричної енергії в міському режимі руху приблизно 18 % без погіршення динамічних властивостей системи.

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Удосконалюється тяговий електропривод електромобіля, що в подальшому дозволяє зменшити витрати електроенергії, а також підвищити надійність системи цілому, що призведе до зменшення кількості пристроїв та зменшення затрат на поточні ремонти. Для визначення доцільності застосування даної системи керування проведемо економічний розрахунок двох варіантів із подальшим їх порівнянням.

6.1 Визначення величини затрат запропонованого варіанту

Кошторис на обладнання для базового і нового варіантів приведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Кошторис витрат на електроустаткування базового і нового варіанту.

Найменування електрообладнання	Кількість	Кошторисна вартість			
		Базова		Нова	
		За шт., грн	Всього, грн	За шт., грн	Всього, грн
Напівміст (Half-Bridge) IGBT-модуль	1	1600	1600	-	-
Трифазний інтелектуальний силовий IGBT-модуль	1	42000	42000	-	-
Двигун постійного струму	1	-	-	25000	25000

Продовження таблиці 6.1.

Асинхронний 4 полюсний двигун	1	-	-	25000	25000
Обігрівач	1	120	120	120	120
Вентилятор	1	25	25	25	25
Операційна панель	1	1300	1300	1300	1300
Всього			43445		29645
Транспортні витрати 7%			3041		2075
Всього ціна обладнання			46486		31720
Монтажні роботи 5%			2324		1586
Капітальні витрати			48810		33306

6.2 Розрахунок основного фонду заробітної плати

Оскільки розроблена система живиться напругою 480 В, то згідно ПУЕ обслуговувати дану установку може робітник у якого розряд не нижче четвертого, а група допуску не нижче третього по електробезпеці.

Оскільки, тарифна ставка першого розряду $TC_1 = 47$ грн/год, тарифний коефіцієнт 4 розряду складає 1,54, тому:

$$TC_4 = 1,54 \cdot 47 = 72,5 \text{ (грн/год).}$$

Відповідно тарифна заробітна плата:

$$Z_T = TC_4 \cdot m, \quad (6.1)$$

де m – кількість годин на обслуговування в рік ($m = 220 \cdot 1 = 220$ год).

$$З_T = 72,5 \cdot 220 = 15924 \text{ (грн)}.$$

Оплата праці за професійну та майстерну діяльність:

$$П_{nm} = \frac{З_T \cdot H_{nm}}{100}, \quad (6.2)$$

де H_{nm} – надбавка за професійну діяльність (для працівників з четвертим розрядом становить 10%).

$$П_{nm} = \frac{15924 \cdot 10}{100} = 1592 \text{ (грн)}.$$

Оплата праці за шкідливих умов праці:

$$П_{yn} = \frac{З_T \cdot H_{yn}}{100}, \quad (6.3)$$

де H_{yn} – надбавка за умови праці, що для четвертого розряду складає 17%.

$$П_{yn} = \frac{15924 \cdot 17}{100} = 2707 \text{ (грн)}.$$

Всього постійна заробітна плата складає:

$$З_{пост} = З_T + П_{nm} + П_{yn}, \quad (6.4)$$

$$З_{пост} = 15924 + 1592 + 2707 = 20223 \text{ (грн)}.$$

Оплата премій:

$$П_{ПР} = \frac{З_{пост} \cdot K}{100}, \quad (6.5)$$

де K – коефіцієнт премії ($K = 20\%$).

Тому оплата премій дорівнює:

$$P_{\text{пр}} = \frac{20223 \cdot 20}{100} = 4044 \text{ (грн)}.$$

Всього основна заробітна плата становить:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{посг}} + P_{\text{пр}}, \quad (6.6)$$

$$Z_{\text{осн}} = 20223 + 4044 = 3520,4 \text{ (грн)}.$$

Додаткова заробітна плата:

$$Z_{\text{дод}} = 0,1 \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (6.7)$$

$$Z_{\text{дод}} = 0,1 \cdot 3520,4 = 352,4 \text{ (грн)}.$$

Загальний фонд заробітної плати складає:

$$Z_{\text{заг}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{дод}}, \quad (6.8)$$

$$Z_{\text{заг}} = 3520,4 + 352,04 = 24267 \text{ (грн)}.$$

6.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів

Величина капіталовкладень для базового і нового варіантів:

$$K_{\text{б}} = 48810 \text{ (грн)},$$

$$K_{\text{н}} = 33306 \text{ (грн)}.$$

При встановленні системи з асинхронним двигуном та векторної широтно-імпульсної модуляції для керування призвело до зменшення витрат на електроенергію на 10%, завдяки методу, що дозволяє обчислювати моменти включення обмоток, для досягнення більш ідеальних характеристик якості приводу на базі електродвигуна, наприклад, для збільшення ККД. Тому при регулюванні швидкості обертання двигуна зменшується і кількість енергії, яку споживає двигун:

$$Z_{\text{енб}} = P \cdot \Phi \cdot m_o \cdot K, \quad (6.9)$$

де P – потужність двигуна ($P = 110$ кВт);

Φ – кількість робочих годин в день ($\Phi = 1$ год);

m_0 – кількість робочих днів в рік ($m_0 = 251$ день);

K – вартість електроенергії ($K = 4,32$ грн/кВт · год).

$$Z_{\text{енб}} = 110 \cdot 1 \cdot 251 \cdot 4,32 = 8283 \text{ (грн)}.$$

$$Z_{\text{енн}} = Z_{\text{енб}} - 0,1 \cdot Z_{\text{енб}}, \quad (6.10)$$

$$Z_{\text{енн}} = 8283 - 0,1 \cdot 8283 = 9111,3 \text{ (грн)}.$$

Витрати на поточний ремонт обладнання. При використанні векторної ШІМ зменшуються пускові струми, втрати в кабелях, збільшує надійність всієї установки, тобто кількість поломок зменшується, а отже надійність системи електропривода зростає. Заплановані витрати на поточний ремонт і обслуговування при базовому варіанті становить 5%, а при новому 3,5%.

$$Z_{\text{рб}} = 0,05 \cdot K_{\text{б}}, \quad (6.11)$$

$$Z_{\text{рб}} = 0,05 \cdot 48810 = 2440,5 \text{ (грн)}.$$

$$Z_{\text{рн}} = 0,035 \cdot K_{\text{н}}, \quad (6.12)$$

$$Z_{\text{рн}} = 0,035 \cdot 33306 = 1165,71 \text{ (грн)}.$$

Амортизаційні відрахування:

$$Z_{\text{А}} = \sum N_{\text{А}} K_i, \quad (6.13)$$

де $N_{\text{А}}$ - норма амортизаційних відрахувань ($N_{\text{А}} = 10\%$).

$$Z_{\text{Аб}} = 0,1 \cdot 48810 = 4881 \text{ (грн)},$$

$$Z_{\text{Ан}} = 0,1 \cdot 33306 = 3330,6 \text{ (грн)}.$$

Витрати на допоміжні матеріали для ремонту обслуговуючого ремонту при базовому варіанті 20%, а при новому 5% від фонду оплати праці:

$$Z_{\text{мб}} = 0,2 \cdot Z_{\text{заг}}, \quad (6.14)$$

$$Z_{\text{мб}} = 0,2 \cdot 24267 = 4853 \text{ (грн)}.$$

$$Z_{MH} = 0,05 \cdot Z_{zag}, \quad (6.15)$$

$$Z_{MH} = 0,05 \cdot 24267 = 1213 \text{ (грн)}.$$

Повні експлуатаційні затрати:

$$Z_{e6} = Z_{en6} + Z_{pb} + Z_{Ab} + Z_{Mb} + Z_{zag}, \quad (6.16)$$

$$Z_{e6} = 8283 + 2440,5 + 4881 + 4853 + 24267 = 44724,5 \text{ (грн)}.$$

$$Z_{en} = Z_{enn} + Z_{pn} + Z_{An} + Z_{MH} + Z_{zag}, \quad (6.17)$$

$$Z_{en} = 9111,3 + 1165,71 + 3330,6 + 1213 + 24267 = 39087,61 \text{ (грн)}.$$

6.4 Розрахунок економічної ефективності

Оскільки, $K'_o > K'_n$, додаткові капіталовкладення не здійснюються.

Розраховуємо річний економічний ефект за експлуатаційними витратами:

$$EE = Z_{e6} - Z_{en}, \quad (6.18)$$

$$EE = 44724,5 - 39087,61 = 5636,89 \text{ (грн)}.$$

Висновок

Як видно за результатами обчислень, запропонована система електропривода ефективніша базової. Зниження експлуатаційних витрат пояснюється тим, що нова система більш надійна і потребує меншої кількості ремонтів та затрат на матеріали.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ

В даній роботі здійснюється модернізація системи керування тягового електропривода електромобіля. Шкідливі виробничі фактори, які впливають на електротехнічний оперативно-ремонтний персонал підприємства [25, 26]:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил); фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

Електромобіль – транспорт для перевезення людей, і це положення з врахуванням вимогам до підвищення якості обслуговування пасажирів сприяє проявленню особливої уваги до питання вибору системи електроспоживання і засобів захисту, що забезпечують надійність її роботи і безпеку людини при контакті з системою як при нормальному режимі роботи, так і при відхиленні від них.

До числа важливих показників, що характеризують якість транспортного обслуговування, відноситься безпека перевозок, безпечне обслуговування засобів транспорту і систем електропостачання, а також безперебійність роботи транспорту.

7.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації електромобіля

Технічні рішення з безпечної організації робочих місць під час оперативного обслуговування ТЗ.

Електропроводка електромобіля виконана по двопровідній схемі і розділяється на високовольтну і низьковольтну. Високовольтна проводка з'єднує апарати і електричні машини, які живляться від контактної мережі постійної напруги 550 В. Відповідно з ГОСТ 12.1.013-78 умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у робочому приміщенні є струмопровідною.

Згідно із ГОСТ 12.1.030-81, в якості захисту від ураження людей електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ - спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

Загальні вимога безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003-74, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення.

В установках напругою до 1 кВ огороження роблять суцільними. Безпечні відстані між огороженнями і не ізольованими струмоведучими частинами регламентується ПУЕ і в установках до 1 кВ із суцільними огороженнями - 5см. Висота розміщення не огорожених струмоведучих частин залежить від значення напруги і рівня підготовки людей, що працюють з електроустановками. Струмоведучі частини напругою до 1 кВ у місцях, де працюють люди, висота розміщення повинна бути не менше 3,5 м. Постійний контроль за ізоляцією, тому

що протягом часу відбувається старіння ізоляції, що може привести до пробою і створити небезпеку при дотику людини до ізольованих проводів. Використовують наступні кольори для маркування ізоляції: чорна - для силових ланцюгів; червона - для ланцюгів керування.

На ключах керування і приводах роз'єднувачів віддільників і вимикачів навантаження, а також на підставках запобіжників, за допомогою яких може бути подана напруга до місця робіт, вивішують плакат: "Не включати - працюють люди". На вентилях, що закривають доступ повітря в пневматичні приводи таких апаратів, вивішується плакат: "Не відкривати - працюють люди".

Приміщення в якому розташований електромобіль техогляду повинно бути сухим, світлим і теплим а також забезпечене роздягальною з вішалками для одягу.

Площа робочих приміщень повинна бути така, щоб на одного працюючого припадало не менше 4,5 м².

Стіни робочих приміщень мають бути світлих відтінків, а стеля повинна бути пофарбована в білий колір.

Не правильне поводження з електрообладнанням і джерелами електричної енергії може призвести до враження електричним струмом і виходу приборів електромобіля з ладу, тому:

- не проводити будь-яких втручань, як відкриття руками, так і за допомогою інструмента і сторонніх предметів в електрообладнання при встановлених на контактний провід струмоприймачів. Це стосується не лише електрообладнання 550 В, але і електрообладнання 24 В;

- не допускати струми витоку більше 0,003 А. Контроль струмів витоку проводять щодня міліамперметром або спеціальним пристроєм для вимірювання стану електроізоляції;

- ретельно слідкувати, щоб не виникали обриви проводів і інші порушення цілісності електричних кіл;

- суворо дотримуватися Правил техніки безпеки на міському транспорті.

Основні Правила безпечної експлуатації електромобіля:

- експлуатувати електромобіль тільки на дорогах I та II категорій з покриттям капітального типу і нахилами 0,08;

- не допускати роботу з перенавантаженням пасажирями. Експлуатація з перенавантаженням може призвести до поломки агрегатів автомеханічного і електричного обладнання, а також кузова електромобіля;

- не перевищувати найбільшу допустиму швидкість;

- не розпочинати руху, якщо тиск у повітря в пневмосистемі гальм і підвіски нижче $4,5 \text{ кгс/см}^3$, а також допускати зниження тиску в ній під час руху менше заданого;

- не допускати довготривалої роботи з не справним гідро підсилювачем рульового управління, а також довготривалого буксирування не справного електромобіля, так як при цьому сильно навантажується механізм рульового управління;

- у всіх випадках буксирування ТЗ слід застосовувати лише буксирне пристосування;

- конденсат з повітряних балонів необхідно зливати при тиску повітря в пневмосистемі вище атмосферного;

- підтримувати акумулятори в робочому стані;

- особливу увагу приділяти шинам, так як довговічність, а також нормальна робота підвіски, легкість управління ТЗ в великій мірі залежить від підтримання в них нормального тиску;

- для гальмування ТЗ на зупинках слід користуватися ручним гальмом; при русі ним користуватися заборонено;

- розбір і збір рульового механізму і насосу повинні виконувати тільки кваліфіковані механіки в умовах повної чистоти і тільки у випадку необхідності;

- електрообладнання повинно бути чистим і сухим, деталі, що зношуються не повинні мати граничних зносів. Регулювання системи управління, захисту і інших систем повинно суворо відповідати технічним даним;

- водій ТЗ зобов'язаний систематично слідкувати за станом електрообладнання и вимагати від ремонтного персоналу дотримання всіх технічних правил, що забезпечують належний стан електричних машин і апаратів;

- при русі на лінії водій повинен вести ТЗ на перегоні так, щоб з ввімкненим тяговим двигуном їзда складала приблизно 50% загального часу, 50% – на вибігу, тобто з вимкненим двигуном;

- з нормальним навантаженням їзда на ТЗ допускається без обмежень на підйомах до 35‰, будь-якої протяжності;

- експлуатація ТЗ на підйомах більше 80‰ не допускається. Забороняється рух назад зі швидкістю більше 15 км/год, а також при тиску повітря в пневмосистемі менше 4 кгс/см².

При експлуатації ТЗ необхідно підтримувати в справному стані і суворо дотримуватися порядку і строків технічного догляду. Надійна робота ТЗ забезпечується своєчасним і кваліфікованим його обслуговуванням.

Електробезпека.

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам під час виконання робіт:

1) Для запобігання електротравм від контакту зі струмопровідними елементами електроустаткування потрібно: розміщувати неізольовані 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 в закритих конструкціях підлоги.

2) При живленні однофазних споживачів струму 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.

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.

7.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

Мікроклімат. Категорія робіт, що виконується оперативним персоналом – Па – пов'язано з постійною ходою і перенесенням невеликих вантажів масою до 1 кг [26].

За ступенем впливу на тепловий стан людини мікрокліматичні умови визначаємо як допустимі (таблиця 7.1).

Таблиця 7.1 – Допустимі параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	Середньої важкості: Іа	17-23	75	не > 0,3
Теплий	Середньої важкості: Іа	18-27	65 при 26 °С	0,2-0,4

Необхідно, щоб в приміщеннях була постійна циркуляція повітря або встановлений кондиціонер [27].

Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [26].

Таблиця 7.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб. м		Клас небезпеки
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Вуглецю оксид (СО)	3	1	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу товщиною в 1/8" на будь-якій ділянці вказує на необхідність у вживанні заходів з її очищення. Необхідно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (зернистість), тим вище небезпека.

Виробниче освітлення. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [27], роботи в депо потребують освітлення, яке характеризується розрядом зорової роботи ІІІ, підрозряд «в». Нормовані значення штучного, природного та суміщеного освітлення наведені в таблиці 7.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне

очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 7.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Високої точності	Від 0,3 до 0,5 включно	III	в	малий середній великий	світлий середній темний	600	200	-	3,0

Виробничий шум. Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях мають відповідати вимогам СН 3223-85, ГОСТ 12.1.003-85, ГР 2411-81 [28] і наведені в табл. 7.4.

Устаткування, що є джерелом шуму (вентилятори, електроінструмент, технологічне обладнання), слід використовувати поза межами приміщень.

Для забезпечення допустимих рівнів шуму на робочих місцях слід застосовувати засоби звукопоглинання, вибір яких має обґрунтовуватись спеціальними інженерно-акустичними розрахунками.

Таблиця 7.4 – Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні

звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудової діяльності, робочі місця	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Виконання усіх видів робіт на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Акустична обробка приміщень – це облицювання частини внутрішніх поверхонь огорожень звукопоглинаючими матеріалами, а також розміщення в приміщенні штучних звукопоглиначів, які представляють собою вільно підвішені об'ємні поглинаючі тіла довільної форми. Найбільший ефект при акустичній обробці можливо отримати в точках, які розташовані в зоні відбитого звуку; в зоні прямого звуку акустичний ефект від застосування облицювання набагато менший. Звукопоглинаючі облицювання розміщують на стелі і в верхніх частинах стін при висоті приміщення не більше 6-8 м таким чином, щоб акустично оброблена поверхня складала не менше 60 % від загальної площі обмежуючих приміщення поверхонь. У вузьких і дуже високих приміщеннях доцільно облицювання розміщувати на стінах, залишаючи нижні частини стін (до 2 м висотою) не облицьованими, або проектувати конструкцію звукопоглинаючої підвісної стелі.

Виробнича вібрація.

Норми виробничої вібрації на постійних робочих місцях в приміщеннях підприємства, визначені за [26], наведено в таблиці 7.5.

Таблиця 7.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні полоси з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	32	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	1,3* 108	0,45 99	0,22 93	0,2 92	0,2 92	0,2 92	-	-	-	-

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, $\text{м/с}^* 10''$, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

1. Створення амортизаторів в яких використовують пружини, гуму та інші пружні матеріали.
2. Розміщення будівельних конструкцій на масивних фундаментах.
3. Встановлення додаткових реактивних опорів.

Також серед технічних заходів уникнення шкідливого впливу вібрації – створення нових конструкцій інструментів і машин, вібрація яких не може виходити за безпечні для людини межі, а зусилля не повинні перевищувати 15- 20 кг. Усі деталі машин та агрегатів, що рухаються, повинні ретельно врівноважуватися, а для зменшення динамічних сил, які спричинюють вібрації, слід застосовувати змащування та ін.

7.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують «Правила пожежної безпеки в Україні» та інші правила пожежної безпеки для промислових підприємств і окремих об'єктів [27, 28]. Визначення пожежо-вибухонебезпечності речовин і матеріалів здійснюється за рекомендаціями [25], а, відповідно, категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок, де вони використовуються, зберігаються тощо, за [24].

Пожежо-вибухонебезпечність речовин і матеріалів – сукупність властивостей, що характеризують їхню здатність до виникнення і поширення горіння. Наслідком горіння, залежно від його швидкості та умов протікання, можуть бути пожежа або вибух. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначають показниками, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу), та умов їхнього застосування.

Отже, приміщення, де здійснюється оперативне обслуговування, за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відносяться до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В; а також, частково, категорії В, в яких знаходяться та будуть знаходитися (зберігатися) легкозаймисті, горючі і/або важко горючі рідини, а також речовини і/або матеріали, як здатні вибухати та горіти або тільки горіти під час взаємодії з водою, киснем повітря і/або один з одним; тверді горючі і/або важко горючі речовини та матеріали (включно горючий пил і/або волокна), за умови, що питома пожежна навантага для твердих і рідких легко-займистих, горючих та важко горючих речовин і/або матеріалів на окремих ділянках площею не менше 10 м^2 кожна може перевищити $180 \text{ МДж} \cdot \text{м}^2$.

Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується III ступенем вогнестійкості. До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості

будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [26] наведено в таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекрыття між поверхів (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	самонесучі	зовнішні несучі	внутрішні несучі (перегородки)				плити, настели, прогони	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	EI 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [25] наведено в таблиці 7.7.

Таблиця 7.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбуршлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекрыття	2	REI 60	2	1

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 7.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні

відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 7.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 7.8 (знаменник).

Таблиця 7.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

На території депо встановлено 54 порошкових (ВП) та водо-пінних (ВВП) вогнегасників ємністю 5 та 9 л.

Висновок: розроблено рекомендації з охорони праці та технічні рішення з правил безпечної експлуатації.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі на тему «Система автоматизованого керування тяговим електроприводом транспортного засобу» розглянуто та вирішено актуальну науково-технічну задачу, пов'язану з підвищенням енергоефективності тягового електропривода електромобіля шляхом удосконалення системи автоматизованого керування асинхронним електродвигуном.

Проаналізовано сучасний стан розвитку електромобільного транспорту та систем тягового електропривода. Показано, що асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором є доцільним вибором для електромобілів завдяки їхній надійності, простоті конструкції та прийнятним масогабаритним і вартісним показникам. Водночас встановлено, що класичні алгоритми векторного керування не завжди забезпечують дотримання оптимальних енергетичних режимів у міському циклі руху.

На основі аналізу умов експлуатації електромобіля виконано розрахунок параметрів тягового електропривода, визначено необхідні значення моменту, потужності та діапазону регулювання швидкості електродвигуна. Обґрунтовано вибір асинхронного тягового електродвигуна та підтверджено його працездатність за умовами навантаження, нагріву та динамічних режимів.

Розроблено систему автоматизованого керування тяговим електроприводом на основі принципів векторного керування з орієнтацією за потокозчепленням ротора. Запропоновано модифіковану енергоощадну структуру системи керування, що відрізняється наявністю блоку оптимального потокозчеплення та блоку мінімального вибору, які забезпечують адаптивне регулювання магнітного режиму асинхронного електродвигуна залежно від умов руху.

Побудовано математичну та імітаційну модель тягового електропривода електромобіля в середовищі MATLAB/Simulink і проведено дослідження

динамічних та енергетичних характеристик системи в умовах міського їздового циклу. За результатами моделювання встановлено, що застосування енергоощадного алгоритму керування дозволяє зменшити енергоспоживання приблизно на 18 %, що при приведенні до пробігу 100 км відповідає економії близько 3 кВт·год електричної енергії.

Виконано економічний розрахунок, котрий підтвердив доцільність впровадження розробленої системи автоматизованого керування. Очікуваний річний економічний ефект досягається за рахунок зменшення витрат електричної енергії в процесі експлуатації електромобіля та становить близько 5637 грн, що свідчить про економічну ефективність запропонованого технічного рішення.

Розроблено питання з охорони праці та техніки безпеки. Запропоновано заходи з безпечної експлуатації електропривода та системи автоматизованого керування, які забезпечують відповідність розробки вимогам чинних нормативно-правових актів і стандартів безпеки.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих технічних рішень і свідчать про доцільність їх використання у складі тягових електроприводів сучасних електромобілів. Матеріали роботи можуть бути використані як у практиці проектування тягового електроприводу, так і в навчальному процесі при підготовці фахівців з електромеханічних систем автоматизації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Україна: транспорт. [Електронний ресурс] / Велика українська енциклопедія. – Режим доступу: <https://vue.gov.ua/> Україна: _транспорт
2. Транспортна мережа Вінниці. [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://city1.vin.com.ua › ua/main/p_trans.html
3. I. Shchur, I. Havdo, Y. Biletskyi. Modeling of two-motor front-wheel drive control for electric vehicle with electronic differential based on energetic macroscopic representation. Energy Engineering and Control Systems, 2020, Vol. 6, No. 1, pp. 51 – 60.
4. Ehsani M., Gao Y., Longo S., та ін. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: CRC press, Taylor & Francis Group, 2018. 58 сСучасний тролейбус. Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://naukatehnika.com/sovremennyijtrollejbus.html>
6. ЗАТ «Львівський автомобільний завод», Тролейбус Е183 та його модифікації: Керівництво з експлуатації. – Львів, 2006. – 147 с.
7. Технічна експлуатація міського електричного транспорту: Навч.посібник. / В.Х.Далека, В.Б.Будниченко, Е.І.Карпушин, В.І.Коваленко. Харків: ХНАМГ, 2007.- 286 с.
8. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина : навч. посібник / В. Х. Далєка, М. В. Хворост, В. І. Скуріхін, Д. І. Скуріхін. ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекєтова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекєтова, 2018. – 388 с.
9. Крамаренко Р. М. Стан та основні напрямки удосконалення роботи міського електричного транспорту в сучасних умовах // Збірка доповідей міжнар. конф. «Міський електротранспорт. Забезпечення сталого функціонування і розвитку». – Ялта, 2008.
10. Двигуни. Каталог. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.a-a-a.ru/>
11. Двигуни. Каталог. . [Електронний ресурс] / Режим доступу:

http://ventilator.kiev.ua/production/electric_motors/index.html

11. Левковець П.Р., Зеркалов Д.В., Мельниченко О.І., Казаченко О.Г. Управління автомобільним транспортом: Навч. посібник / За ред. Д.В. Зеркалова. – К.: Арістей, 2006.- 416 с..

12. Вимірювальні системи сучасних електромеханічних комплексів. Навчальний посібник / І.В. Касаткіна, С.М. Бойко, О.А. Жуков – Кривий Ріг, 2022. – 161 с.

12. Грабко В.В., Розводюк М.П., Грабенко І.В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму: Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 86 с.

13. Розрахунок і проектування трифазного силового масляного трансформатора. Курсове проектування: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання / Розводюк М. П., Проценко Д. П., Бомбик В. С., Жуков О. А. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 149 с.

14. Жуков О. А., Гурківський В. С. Електромеханічна система автоматизації процесу пастеризації молочних продуктів // Перспективи електричного транспорту : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 22-24 жовт. 2025 р. / ХНУМГ ім. О. М. Бекетова та ін. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – С. 119–120.

14. Басов Г. Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу: навчальний посібник, / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. – Харків : «Апекс+», 2005. – 248 с.

15. Тролейбус Т19101 «Електрон» [Електронний ресурс] / Режим доступу : https://uk.wikipedia.org/wiki/Електрон_T19.

16. IGBT-модулі. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.igbt.ru>

17. Інтелектуальні силові модулі. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://electronics.org.ua>

18. Широотно-імпульсна модуляція. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://club.shelek.ru/viewart.php?id=163>
20. Тітяєв Д. К., Мірошник Д.Н., Порівняльний аналіз векторної і традиційної широтно-імпульсної модуляції. - Донецьк: ДНТУ, 2008. – 59 с.
21. Грабко В. В., Кучерук В. Ю., Возняк О. М. Мікропроцесорні системи керування електроприводами. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2009. – 146 с.
22. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода. Київ, «Кондор», 2003. – 408 с.
23. Жуков О.А., Доценко В.М. До питання впровадження джерел розосередженої генерації в системи електропостачання об'єктів інфраструктури електротранспорту. Всеукраїнська науково-практична конференція «Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті». Харків, 2023. С. 175.
24. Жуков О. А., Гурківський В. С. Електромеханічна система автоматизації процесу пастеризації молочних продуктів // Перспективи електричного транспорту : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 22-24 жовт. 2025 р. / ХНУМГ ім. О. М. Бекетова та ін. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – С. 119–120.
25. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
26. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва.
27. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
28. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до

захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

28. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.

29. Жуков О. А., Бойко С. М., Гурківський В. С. Моделювання електроприводу електромобіля з урахуванням динамічних втрат // Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025) : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (22–23 жовтня 2025 р.) : збірник наукових праць. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – С. 144–146. – ISBN 978-617-8163-64-8

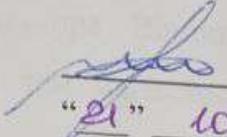
Додаток А

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

« 21 » 10 20__ р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ**

08-24.МКР.002.00.000 ТЗ

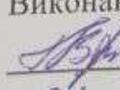
Керівник роботи

к.т.н., доц.

 Олексій ЖУКОВ

« 21 » 10 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-24м

 ГУРКІВСЬКИЙ Віктор

« 26 » 10 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Система автоматизованого керування тяговим електроприводом транспортного засобу».

Скорочене найменування розробки – «Електропривода електромобіля».

Замовник – Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Електромобіль призначений для пасажирських перевезень в містах України та за кордоном. Використовуватиметься на автомобільних дорогах міста.

4 Вимоги до розробки

Електропривод електромобіля повинен забезпечувати надійну роботу в повторно-короткочасному режимі при великій частоті включень. Експлуатація здійснюється в нормальних умовах.

5 Технічні характеристики

Діаметр ходового колеса – 0,5715 м;

Габаритні розміри електромобіля визначаються в залежності від потрібної компоновки машини.

6 Комплектація розробки

Електромобіль має суцільно-металевий кузов вагонної компоновки з трьома бічними дверима, колісну формулу 2x2. Приводиться в рух від електричного двигуна.

7 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

8 Конструктивне виконання

Складові електроприводу виготовляються окремими блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки.

9 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.

10 Показники технологічності

Електропривод електромобіля – двигун, апаратура керування, провідники, кабелі і т.п. виконується на сучасній елементній базі.

12 Живлення електропривода

Живлення електромобіля відбувається від акумуляторної батареї постійного струму напругою.

13 Порядок контролю та прийняття

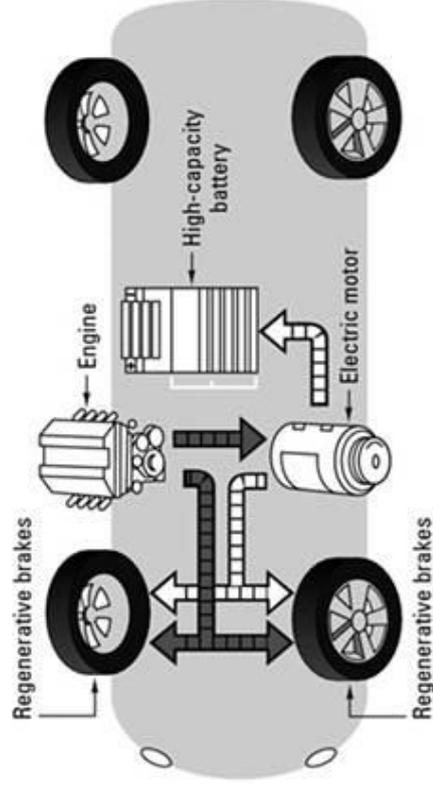
Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б
(обов'язковий)

ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Система автоматизованого керування тяговим електроприводом транспортного засобу



ст. гр. ЕПА-24м, Гурківський В.С.

Керівник: к.т.н., доцент Жуков О.А.

Актуальність. Найбільш поширеними в тягових електроприводах електромобілів є асинхронні електродвигуни, які характеризуються високою надійністю, простою конструкції та відносно невисокою вартістю. Проте класичні системи векторного керування асинхронними двигунами, як правило, реалізують роботу з фіксованим значенням поточкозчеплення ротора, що не завжди є оптимальним з точки зору мінімізації енергетичних втрат. Актуальною є задача підвищення енергоефективності тягових електроприводів електромобілів за рахунок удосконалення алгоритмів автоматизованого керування, зокрема шляхом адаптивного регулювання магнітного режиму асинхронного електродвигуна залежно від умов руху.

Мета роботи: Підвищення енергоефективності тягового електропривода електромобіля шляхом розробки системи автоматизованого керування, що реалізує енергоощадний алгоритм регулювання з адаптивною оптимізацією залежно від режимів руху.

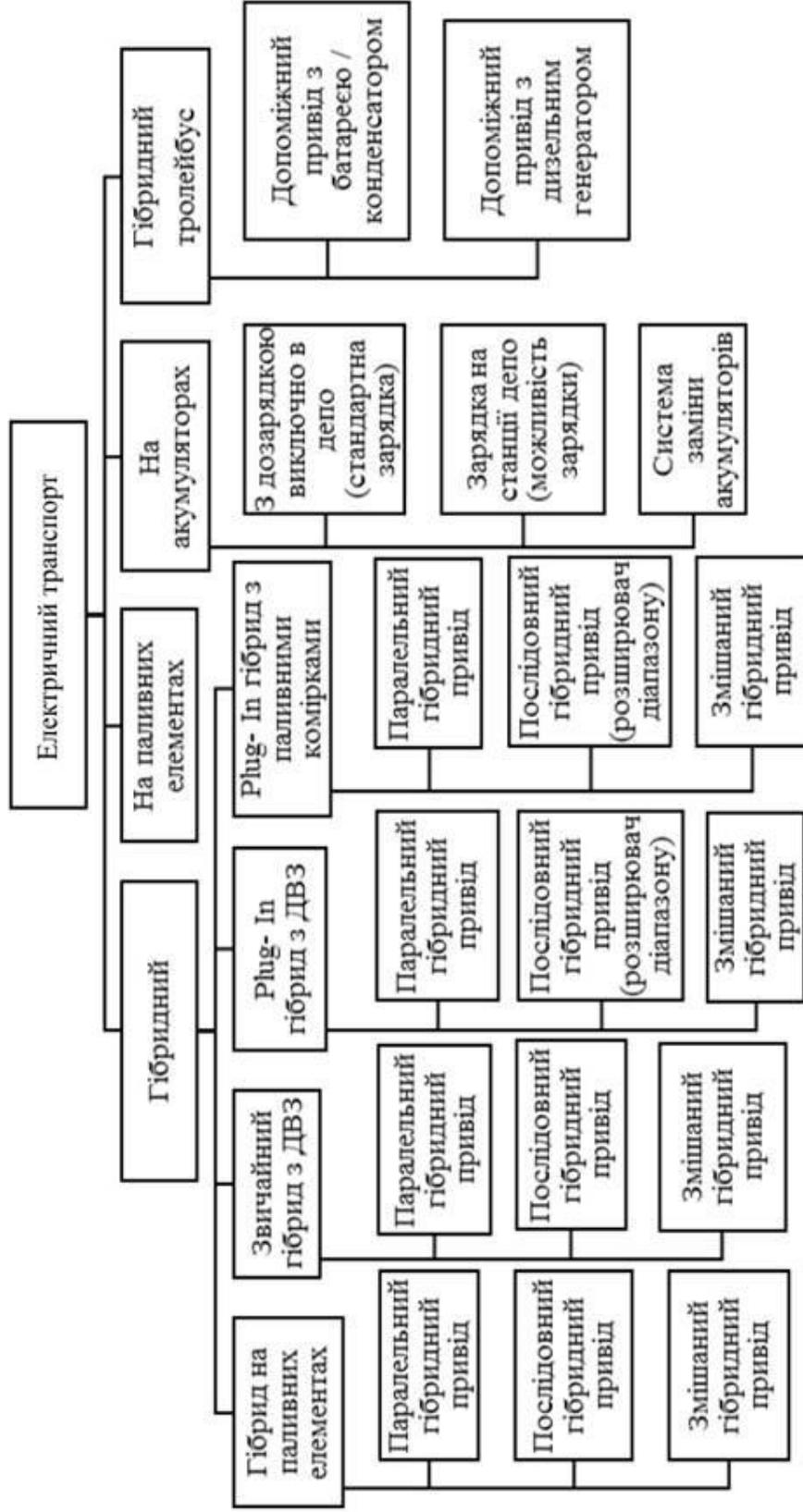
Мета досягається шляхом вирішення наступних задач:

- аналіз літературних джерел по темі роботи;
- визначення основних параметрів механізму тягового приводу електромобіля, від яких залежить вибір типу двигуна та системи керування;
- моделювання роботи системи електропривода з урахуванням динамічних режимів роботи.

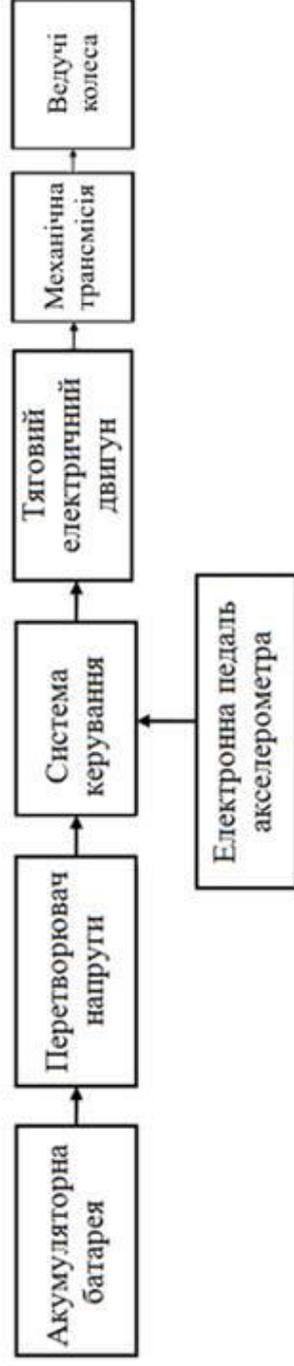
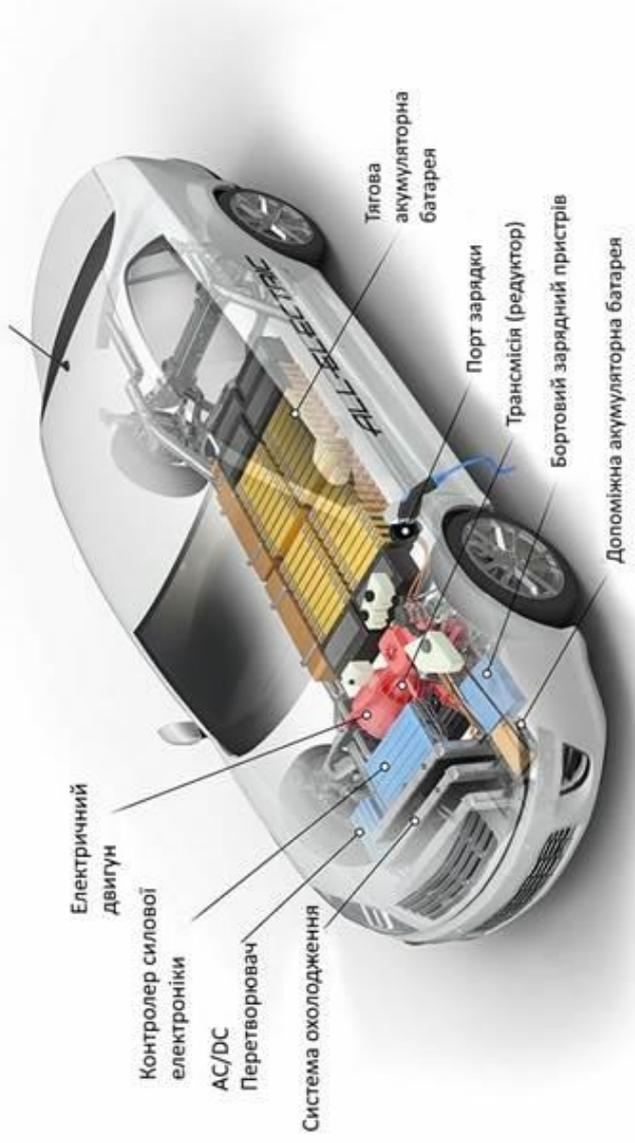
Об'єкт дослідження – електромеханічні процеси автоматизованого керування тягового асинхронного електродвигуна.

Предмет дослідження – тяговий електропривод електромобіля на основі асинхронного електродвигуна у складі транспортного засобу.

Класифікація електричних транспортних засобів

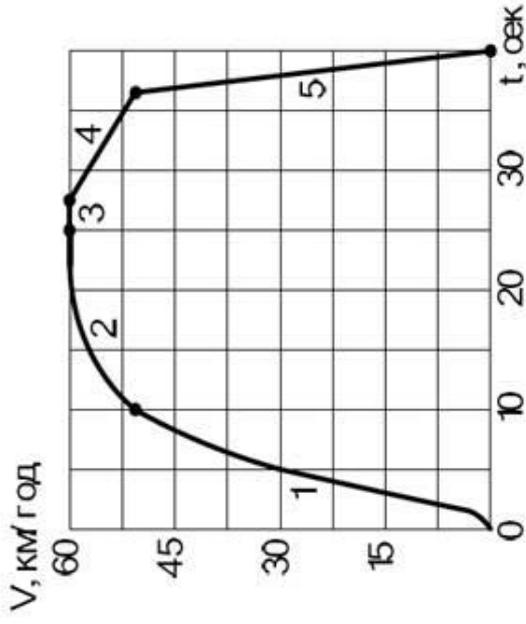


Зовнішній вигляд та основні компоненти електроприводу електромобіля



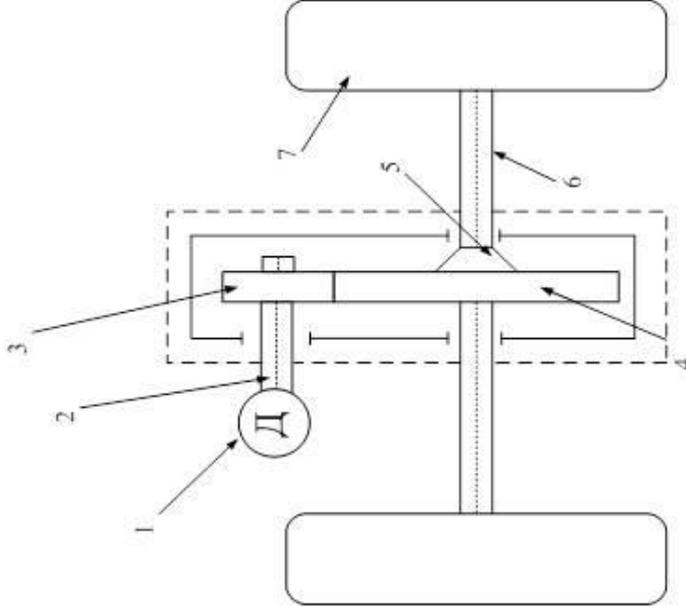
Структурна схема електроприводу транспортного засобу

Діаграма руху транспортного засобу



Ділянки діаграми:

1. Розгін на пускових позиціях;
2. Розгін за автоматичною характеристикою;
3. Рух зі сталою швидкістю;
4. Рух за інерцією (вибіг);
5. Гальмування



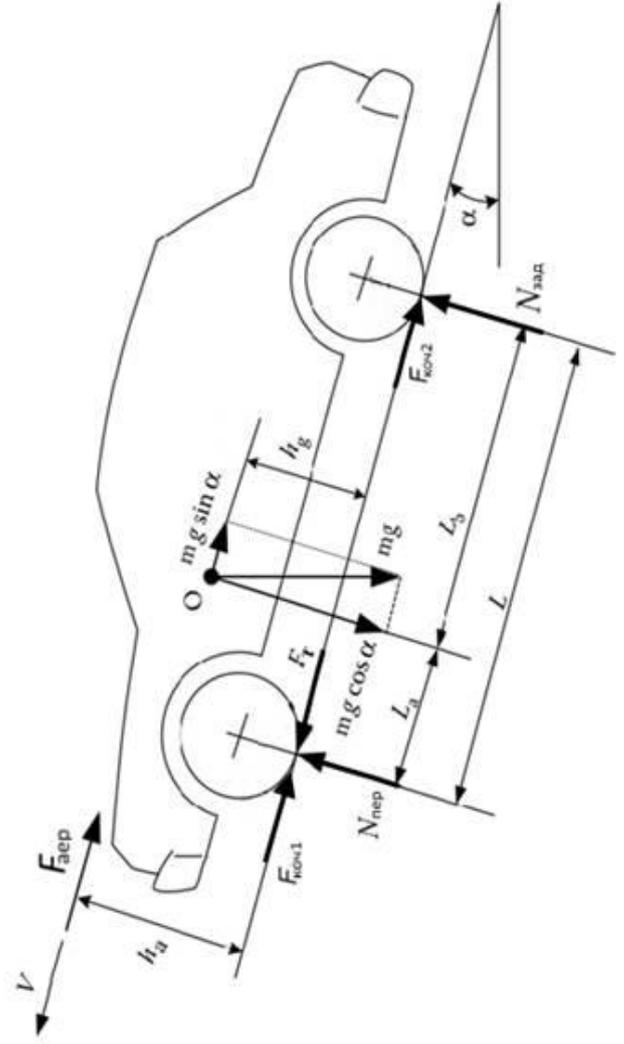
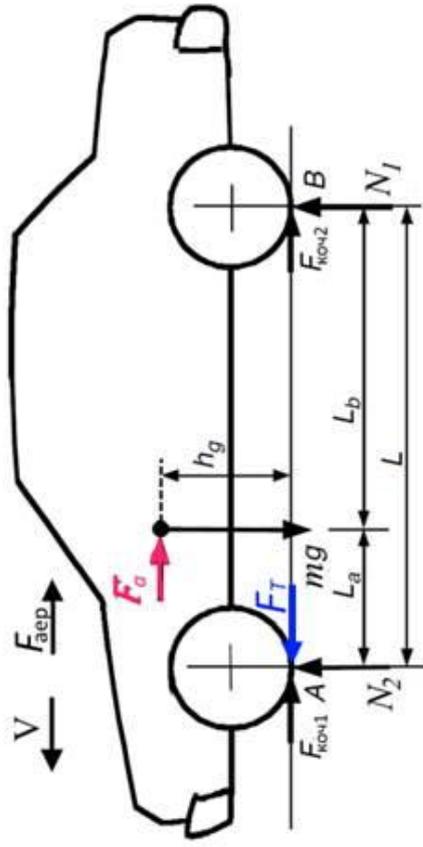
Кінематична схема механізму

- 1 – тяговий двигун; 2 – вал двигуна; 3 – циліндрична ведуча шестерня головної передачі; 4 – циліндрична ведена шестерня головної передачі; 5 – диференціал; 6 – напіввал; 7 – ведучі колеса

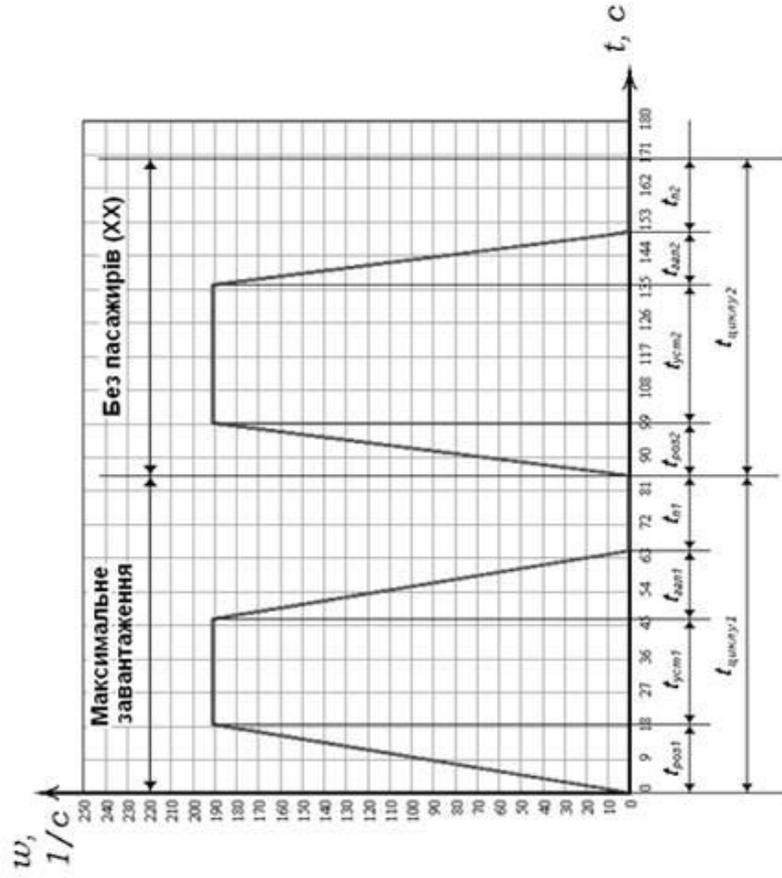
Основні технічні характеристики електромобіля

Загальна вага електромобіля, кг	$m_0 = 1700$
Вага навантаженого автомобіля, кг	$m = 1900$
Радіус валу ходового колеса, м	$r = 0,1405$
Радіус ходового колеса, м	$R_k = 0,4719$
коефіцієнт тертя ковзання в підшипниках кочення	$\mu = 0,015$
Передаточне число ведучого моста	$i = 9,817$
ККД трансмісії	$\eta = 0,9$

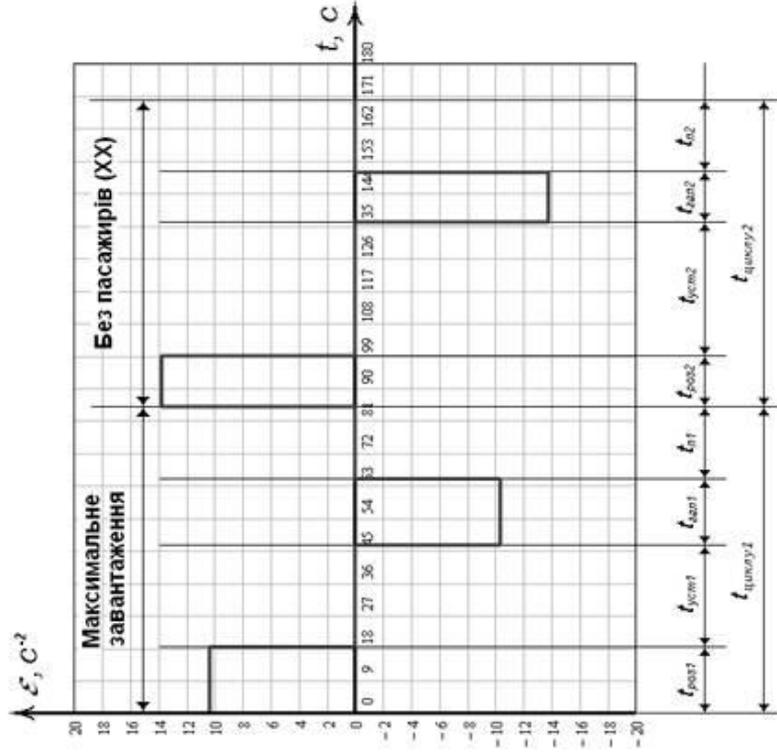
Сили, що діють на електромобіль на горизонтальній ділянці та при русі на підйом



Тахограми швидкості та діаграми навантаження



Тахограма залежності кутової швидкості обертання ротора ω від часу t



Тахограма залежності кутового прискорення ϵ від часу t

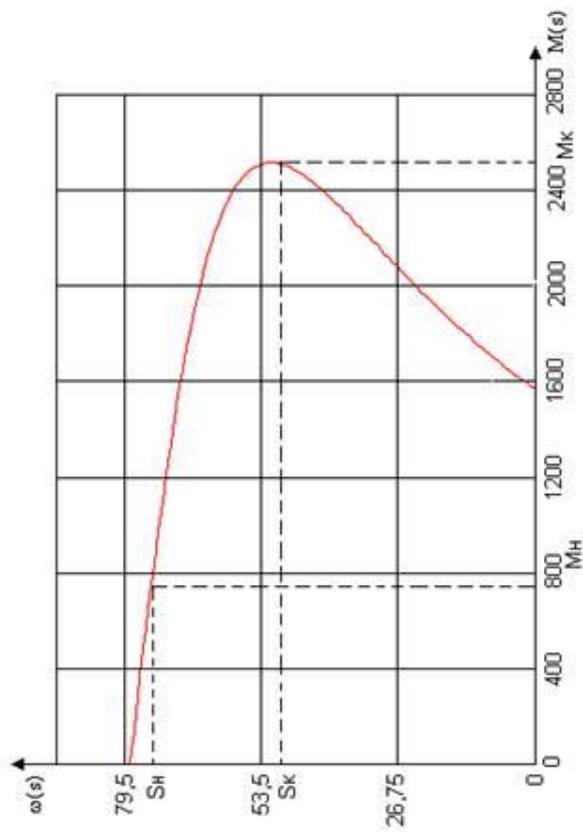
Техніко-економічне порівняння показників різних типів двигунів у вигляді експертної оцінки електродвигунів

Параметр	АДКР	СДПМП	СДВПМ	СРД-ПМ (гібридний)	СДЮЗ
Постійність потужності у всьому діапазоні швидкостей	2	3	2	1	1
Момент до току статора	2	1	1	1	1
Ефективність (ККД) в усьому робочому діапазоні	2	2	2	1	1
Питома потужність, кВт/год.	3	2	1	2	2
Надійність	1	2	3	3	2
Виробництво	1	3	3	3	3
Ціна	1	3	3	3	2
Разом	12	16	15	14	12

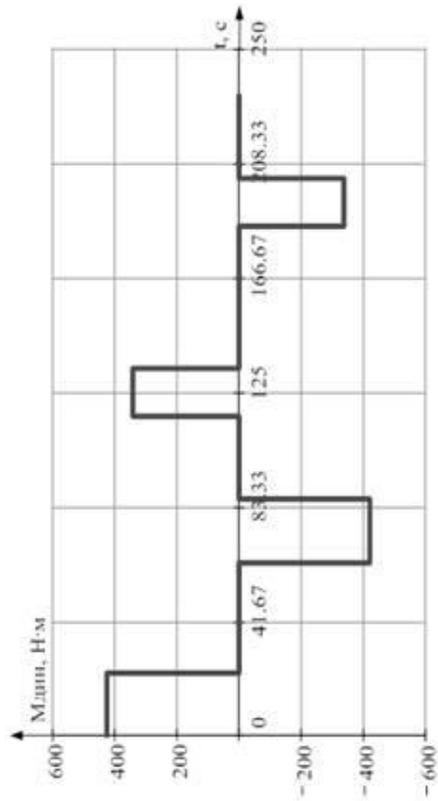
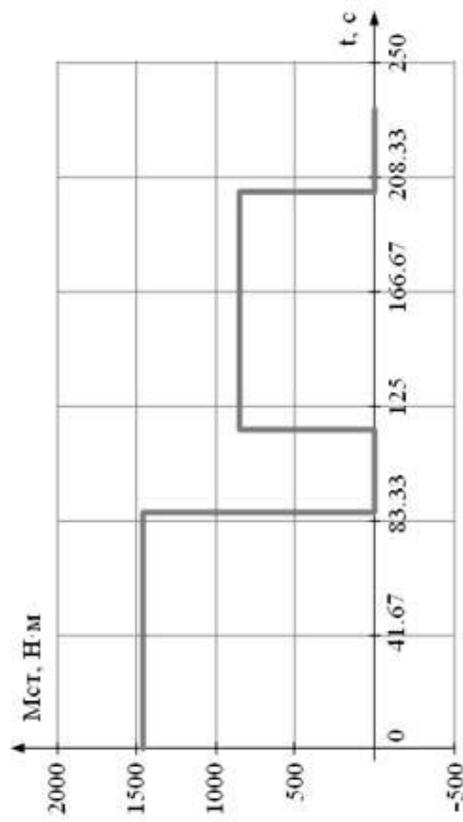
1 – найкращий показник, 3 – найгірший показник.

Параметри вибраного двигуна та його механічна характеристика

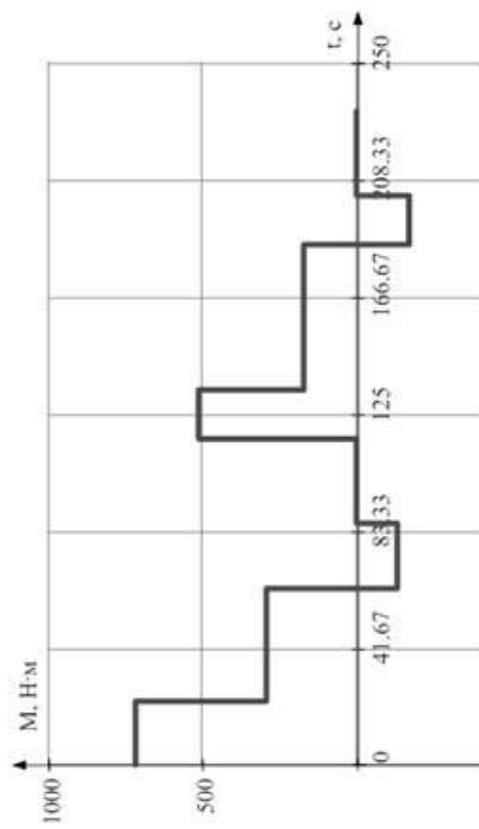
Тип двигуна	4A250S4Y3
Потужність $P_{\text{ном}}$, кВт	75
ККД, %	94
$\cos\varphi$	0,82
Номінальна напруга, В	220/380
Маса, кг	741
Максимальний момент $M_{\text{макс}}$, Н·м	2600
Фазна напруга ротора $U_{2\text{ф}}$, В	248
Струм ротора I_2 , А	154
Струм статора I_1 , А	147
Кількість обертів $n_{\text{ном}}$, об/хв	750
Момент інерції $J_{\text{об}}$, кг·м ²	5,25
Номінальний момент $M_{\text{ном}}$, Н·м	1500,8



Діаграми навантаження двигуна



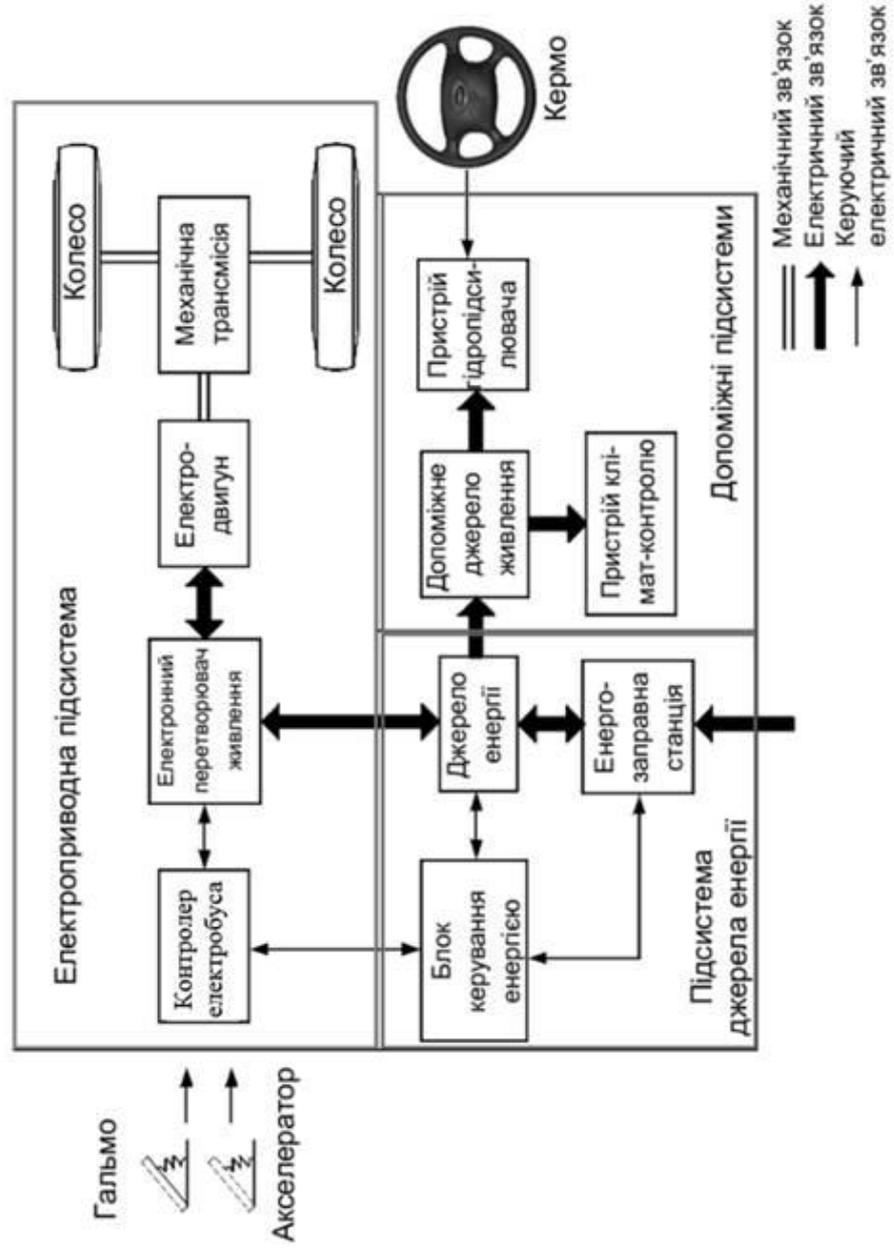
Діаграма статичного навантаження



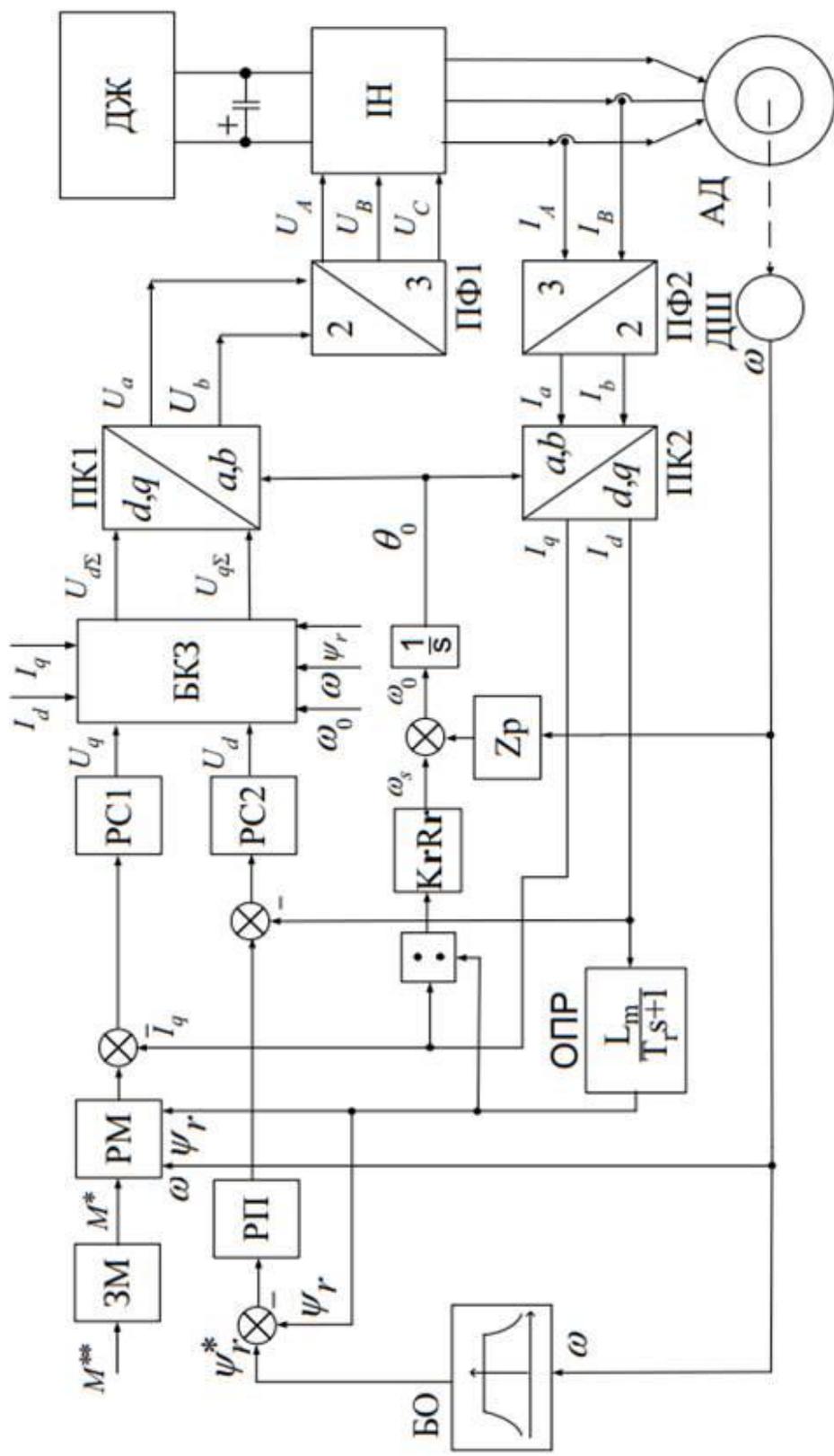
Діаграма динамічного навантаження

Діаграма сумарного навантаження

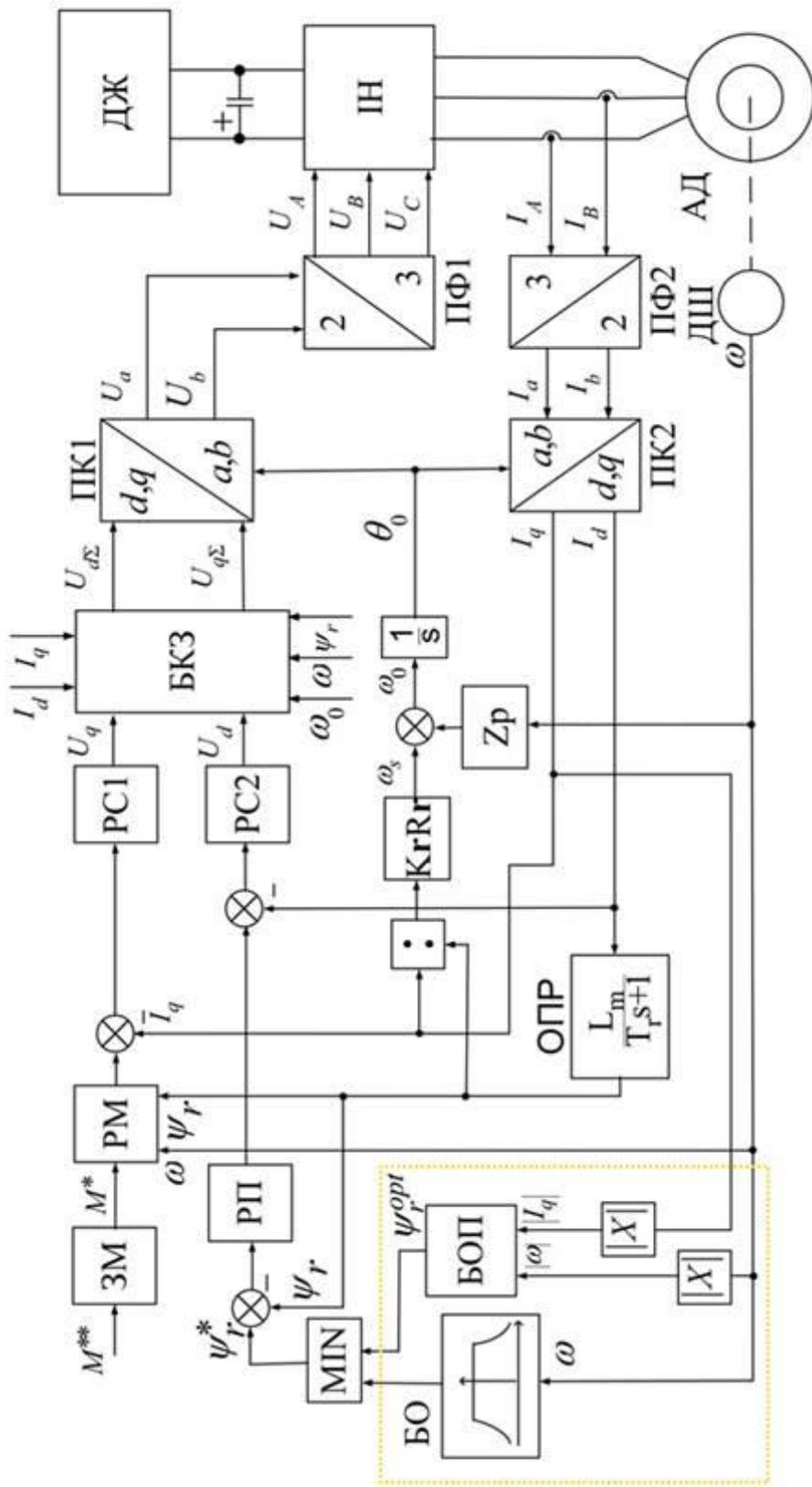
Структурна схема системи електропривода



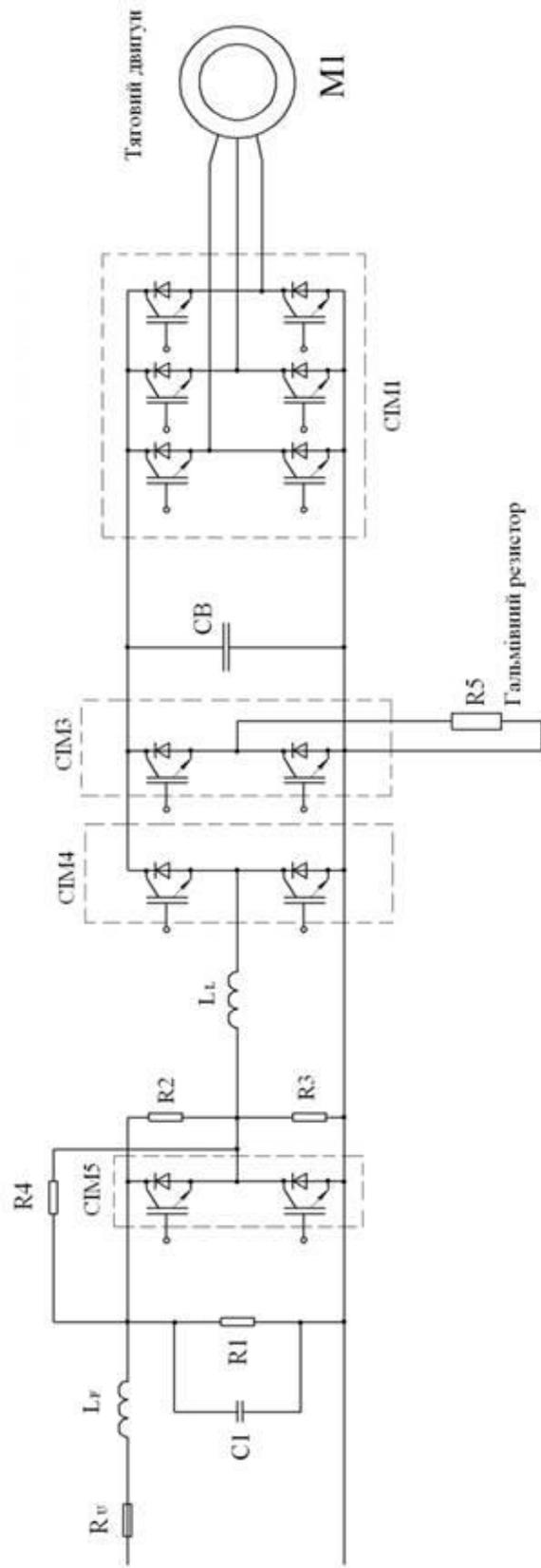
Базова функціональна схема САК асинхронного електродвигуна



Модернізована функціональна схема енергощадної САК

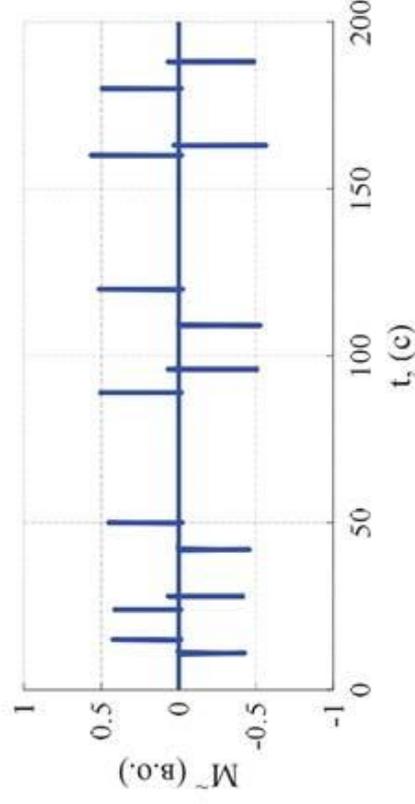
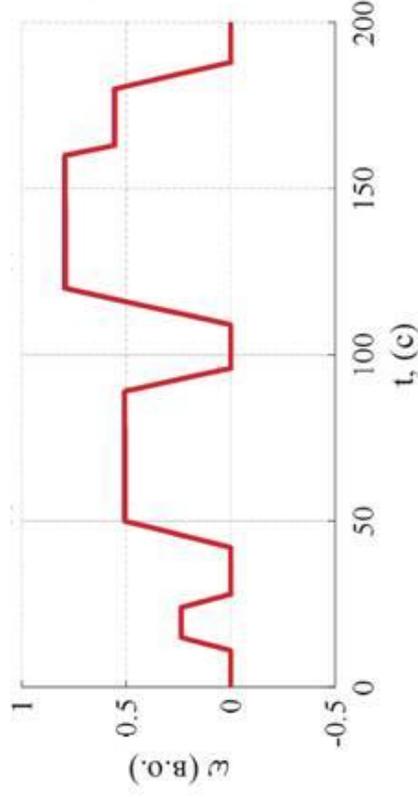


Спрощена принципова електрична схема системи електроприводу

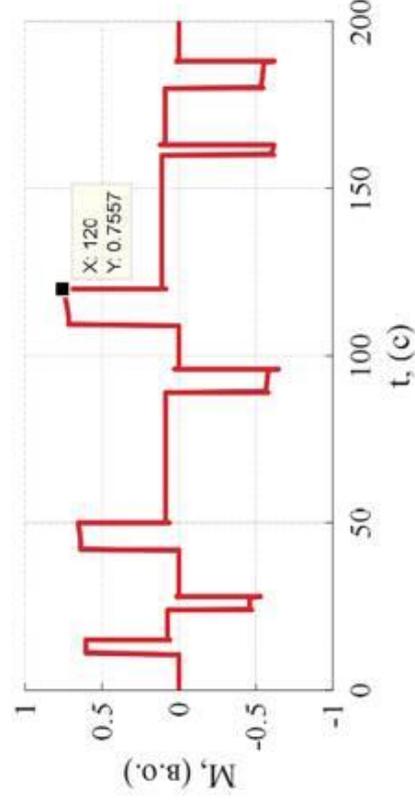


Результати моделювання

16

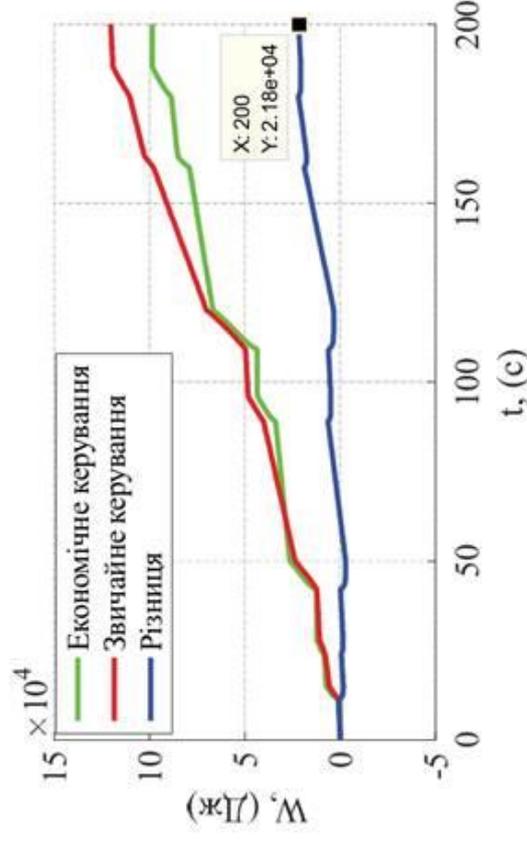


Перехідний процес зміни кутової швидкості



Перехідний процес зміни моменту

Зміна похибки регулювання моменту



Перехідний процес зміни витрат електроенергії

- Проаналізовано сучасний стан розвитку електромобільного транспорту та систем тягового електропривода.
- Обґрунтовано вибір асинхронного тягового електродвигуна з короткозамкненим ротором для електромобіля.
- Виконано розрахунок параметрів тягового електропривода та підтверджено працездатність обраного електродвигуна.
- Розроблено систему автоматизованого керування на основі векторного керування з адаптивною оптимізацією потокозчеплення ротора.
- Побудовано математичну та імітаційну модель електропривода в середовищі MATLAB/Simulink і проведено дослідження його характеристик.
- Встановлено, що застосування енергоощадного алгоритму дозволяє зменшити енергоспоживання приблизно на 18 % (≈ 3 кВт·год / 100 км)
- Підтверджено економічну доцільність впровадження розробленої системи

Опубліковано тези доповіді за результатами міжнародних конференцій

- Моделювання електроприводу електромобіля з урахуванням динамічних витрат // Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025) : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (22–23 жовтня 2025 р.) : збірник наукових праць. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – С. 144–146. – ISBN 978-617-8163-64-8.
- Електромеханічна система автоматизації процесу пастеризації молочних продуктів // Перспективи електричного транспорту : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 22-24 жовт. 2025 р. / ХНУМГ ім. О. М. Бекетова та ін. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – С. 119–120

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Система автоматизованого керування тяговим електроприводом транспортного засобу
Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота
Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-24м

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 15,37 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП Проценко Д.П.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Жуков О.А.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Гурківський В.С.

(прізвище, ініціали)

08-24.МКР.002.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив:		Гурківський В.С.	<i>[Signature]</i>	21.11			
Перевірів		Жуков О.А.	<i>[Signature]</i>	21.11			
Т. контр.							
Норм. кон.		<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	24.11			
Затверд.		Мошноріз М.М.	<i>[Signature]</i>	25.11			

Система автоматизованого керування тяговим електроприводом транспортного засобу

Аркуш Аркушів

ВНТУ, гр. ЕПА-24м