МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Кафедра електромеханічних та комп'ютерних систем

До захисту допущено
Завідувач кафедри
_____ Інна НЕФЬОДОВА
(підпис) (ім'я, прізвище)
«___» _____ 2025 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

тема «Електромеханічна система частотного векторного керування швидкістю синхронного двигуна із постійними магнітами»

Виконав(ла)

здобувач(ка) групи БЗ-Е21
(шифр групи)

Олександр ЛОЗОВИЙ _____
(ім'я, прізвище) (підпис)

Керівник роботи
д.т.н., проф. Тетяна НІКІТІНА _____
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище) (підпис)

Рецензент роботи
д.т.н., проф. Борис КУЗНЕЦОВ _____
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище) (підпис)

Консультант

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

Засвідчую, що у цій роботі немає цитат та вилучень з праць інших авторів без відповідних посилань
здобувач (ка)_____
(підпис)

Харків – 2025

ЗМІСТ

	ВСТУП	7
1	АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ	8
2	СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ	18
3	РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ	26
4	РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ	35
5	ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ	42
	Висновки	54
	Список використаних джерел	57
	Додатки	60

ВСТУП

Стрімкий розвиток обчислювальної техніки та програмного забезпечення відкрив широкі можливості для впровадження інтелектуальних алгоритмів керування в електромеханічні системи нового покоління. Зокрема, у системах частотного векторного керування швидкістю синхронних електродвигунів з постійними магнітами дедалі частіше застосовуються сучасні підходи, засновані на теорії нечітких множин, штучних нейронних мережах, а також інших методах обчислювального інтелекту.

Серед різноманітних конфігурацій електромеханічних приводів, реалізованих на основі синхронних машин із векторним керуванням, особливий інтерес становлять ті, що поєднують високоточне регулювання динаміки з адаптивними властивостями до змін навантаження та умов експлуатації.

Основною метою виконання даного дипломного проєкту є всебічне дослідження конструктивних та функціональних особливостей електромеханічної системи, що реалізує частотне векторне керування швидкістю синхронного двигуна з постійними магнітами. У межах проєкту передбачено розробку електричних та функціональних схем, а також створення імітаційної моделі для аналізу перехідних процесів, що виникають при роботі виконавчого механізму типу ролера. Отримані результати дозволять оцінити ефективність обраної системи управління з точки зору її динамічних характеристик, точності та стійкості у реальних умовах роботи.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Історичні джерела свідчать, що електричні транспортні засоби з’явилися ще до того, як масове виробництво та застосування отримали автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння. У той період електромобілі працювали завдяки акумуляторним батареям, виготовленим на основі свинцево-кислотних елементів, які відзначалися суттєвими обмеженнями щодо ємності енергії та значною вагою. Щоб забезпечити безперебійну роботу такого транспортного засобу протягом орієнтовно однієї години руху, було необхідно використовувати акумуляторні батареї, маса яких сягала приблизно одну тонну. Така вага суттєво ускладнювала конструкцію автомобіля, знижувала його вантажність, а також негативно впливала на економічну доцільність застосування електротранспорту. Через ці фактори електричні автомобілі на початкових етапах розвитку залишалися малопопулярними і нерентабельними в порівнянні зі своїми бензиновими чи дизельними аналогами. З огляду на цей історичний контекст, можна привести приклад, що перші електромобілі, які з’явилися наприкінці XIX століття, мали надто важкі акумулятори, що значно обмежувало їх дальність ходу і швидкість. На відміну від них, автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння швидко здобували популярність завдяки більш легкій конструкції та можливості швидкого поповнення пального, що зробило їх більш конкурентоздатними. Лише з розвитком електроніки, нових матеріалів, удосконаленням конструкції акумуляторів і появою сучасних систем управління стало можливим суттєве підвищення ефективності електротранспорту. Зокрема, прогрес у сфері літій-іонних батарей та інтелектуальних систем керування дозволив зменшити вагу елементів живлення, збільшити запас ходу і покращити динамічні характеристики електромобілів, що сприяло їх широкому поширенню у XXI столітті. Таким чином, історія розвитку електротранспорту чітко демонструє, що

початкові технічні обмеження, зумовлені масивністю і низькою ємністю свинцевих акумуляторів, були основною перепоною на шляху до широкого впровадження цих екологічно чистих технологій. Проте подальші науково-технічні досягнення створили передумови для їхнього стрімкого розвитку та популяризації у сучасному світі [2].

Починаючи з середини XX століття, а саме з 1960-х років, в технічній науці та промисловості відбувся якісний стрибок, пов’язаний із стрімким розвитком електронних компонентів і систем. Особливий прорив стався в галузі напівпровідникових технологій, що дозволило створювати високоефективні перетворювачі енергії, які забезпечують стабільну та точну роботу електромеханічних пристроїв. Паралельно з цим значного розвитку набули комп’ютерні технології, що дали змогу реалізувати складні алгоритми управління, а також методи програмування, які суттєво розширили функціональні можливості автоматизованих систем. Значний внесок у цей процес зробили інтелектуальні методи керування, такі як адаптивні системи, нечітка логіка і нейронні мережі, які здатні ефективно обробляти інформацію про стан об’єктів управління та приймати оптимальні рішення в реальному часі. Завдяки цьому з’явилась можливість створювати системи з високим рівнем автоматизації та гнучкості, що здатні забезпечувати надійну та ефективну роботу в широкому спектрі технологічних процесів. Окрім цього, у сфері напівпровідникової електроніки відбулися значні поліпшення динамічних параметрів пристроїв. Зокрема, зросла швидкодія електронних компонентів, що дало змогу суттєво підвищити швидкість реакції систем управління, покращити точність регулювання та адаптивність до змінних умов експлуатації. Ці вдосконалення призвели до появи високопродуктивних електроприводів, що ефективно застосовуються в сучасних промислових і транспортних системах. Таким чином, розвиток електроніки, комп’ютерних технологій та інтелектуальних методів керування з 1960-х років заклав фундамент для широкомасштабного впровадження автоматизованих систем, які здатні

забезпечити стабільну, ефективну і гнучку роботу складних технічних об’єктів у реальному часі [3].

У сучасних умовах, коли екологічна ситуація в містах погіршується, а потреби у мобільності зростають, двоколісний електротранспорт стає одним із найперспективніших засобів пересування. Його популярність серед широкого кола користувачів постійно збільшується, що обумовлено низкою суттєвих переваг. По-перше, компактність конструкції та невелика вага таких транспортних засобів забезпечують їм високий рівень зручності в умовах щільної міської забудови, де питання паркувальних місць та маневреності набувають першочергового значення. Така мобільність дозволяє користувачам швидко та без зайвих труднощів пересуватися навіть у найскладніших дорожніх умовах [2].

По-друге, електричний привід значно знижує загальні експлуатаційні витрати порівняно з класичними транспортними засобами, оснащеними двигунами внутрішнього згоряння. Відсутність необхідності у витратах на паливо, суттєво менша потреба у регулярному технічному обслуговуванні, а також виключення шкідливих викидів роблять двоколісний електротранспорт не лише економічно вигідним, а й екологічно безпечним вибором.

Третім вагомим фактором є екологічна безпека, що виявляється в нульових викидах шкідливих речовин, зниженні рівня шуму та сприянні покращенню якості повітря у густонаселених районах. Це, у свою чергу, позитивно позначається на здоров’ї мешканців міст і створює більш комфортні умови для життя [4].

Четверта перевага полягає у високій маневреності та мобільності, які дають змогу уникати заторів, прискорюючи час у дорозі. Завдяки компактним розмірам та іноді складній конструкції, такі транспортні засоби легко транспортуються і зберігаються навіть у обмеженому просторі [3].

Крім того, важливо відзначити економічну доцільність двоколісного електротранспорту в довгостроковій перспективі. Зниження витрат на експлуатацію супроводжується більш тривалим строком служби акумуляторів і

електронних компонентів, що позитивно впливає на загальну вартість володіння та обслуговування.

Отже, завдяки поєднанню ергономічності, екологічності, економічної вигідності та високої функціональності, двоколісний електротранспорт є надзвичайно перспективним і зручним засобом пересування для сучасних жителів міських агломерацій, які цінують свій час і дбають про навколишнє середовище [4].

Проведемо детальний аналіз основних характеристик та ключових особливостей систем електроприводу, які використовуються у двоколісних транспортних засобах. Зосередимо увагу на функціональній структурі, технічних параметрах та особливостях експлуатації таких приводів, що безпосередньо впливають на ефективність і надійність роботи електротранспорту. Розглянемо, як саме електричні двигуни, контролери та енергозберігаючі компоненти формують основу сучасних систем руху двоколісних пристроїв, а також визначимо основні критерії вибору та оптимізації їхньої роботи в умовах міського середовища [5].

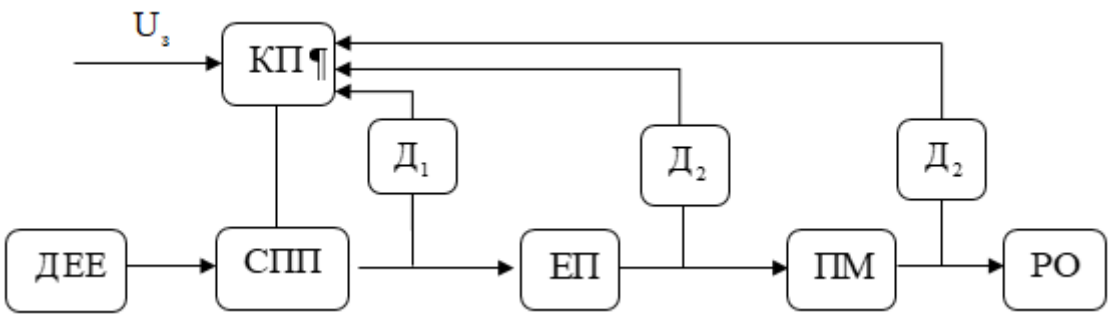

Рисунок 1.1 –система електроприводу

Створення електроприводної системи, а також всебічне дослідження її поведінки у різних режимах роботи — як у динамічних, так і в сталих — разом із проєктуванням системи керування, що здатна гарантувати задані точні характеристики регулювання, вимагає глибокого і всебічного розуміння

фізичних і математичних властивостей навантаження. Не менш важливим аспектом є врахування обмежень джерела електричної енергії, зокрема його потужності та динамічних параметрів, які суттєво впливають на ефективність роботи всієї системи електроприводу. Через це у практичних інженерних підходах електропривод розглядається не як ізольований пристрій, а як цілісна інтегрована електромеханічна система, що включає в себе комплекс взаємопов'язаних елементів: силову частину, механічний привод, датчики, а також високорозвинуті системи керування, які у взаємодії забезпечують надійне та точне функціонування електроприводу в реальних умовах експлуатації. [3].

Центральною складовою конструкції двоколісного електричного транспорту, зокрема електроролерів, є тяговий електродвигун, спеціально спроєктований для ефективної роботи на низьких швидкісних режимах із забезпеченням високого значення обертового моменту. Такий технічний параметр є критично важливим, оскільки саме крутний момент визначає здатність транспортного засобу швидко та без ривків рушати з місця, а також долати ділянки з підвищеним механічним опором — наприклад, підйоми, нерівності дорожнього покриття чи ділянки з підвищеним навантаженням [4].

Завдяки високому крутному моменту електродвигун здатен забезпечити не лише динамічний старт, але й стабільну роботу під час руху в умовах змінного навантаження, що особливо важливо для міського середовища, де часті зупинки і старти є типовими. Таке рішення забезпечує покращену плавність ходу, знижує вібрації та сприяє підвищенню загального рівня безпеки і зручності для користувача. Крім того, наявність високого моменту на низьких обертах позитивно впливає на довговічність компонентів трансмісії та зменшує зношення механічних частин електротранспорту [6].

Таким чином, правильно підібрана конструкція електродвигуна для електроролера є запорукою надійної експлуатації в умовах інтенсивного міського руху, забезпечуючи одночасно комфорт, енергоефективність та стійкість до зовнішніх навантажень.

Попри стрімкий розвиток технологій акумуляторних систем, одним із ключових технічних обмежень сучасних двоколісних електротранспортних засобів, зокрема електричних ролерів, залишається недостатньо висока енергоємність акумуляторних батарей. Цей фактор істотно впливає на запас ходу транспортного засобу та обмежує його функціональність у тривалих поїздках або при експлуатації в умовах підвищених навантажень [5].

Хоча в суспільстві поширене уявлення про високу енергоефективність електричного транспорту в порівнянні з традиційними автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння, на практиці ситуація є значно складнішою. Сумарна ефективність перетворення хімічної енергії викопного палива, спочатку у вигляді електричної енергії на електростанціях, а потім у кінетичну енергію руху через систему енергопостачання, становить лише близько 10–15% [4].

Цей низький показник пояснюється сукупністю енергетичних втрат на кожному етапі: втрати в лініях електропередачі через опір провідників, втрати у трансформаторах при зниженні та підвищенні напруги, в інверторах і перетворювачах напруги, в системах заряджання акумуляторів, у самих акумуляторних батареях через внутрішній опір, а також втрати в електродвигунах, які працюють в якості як тяглових машин, так і генераторів у режимі рекуперації. Окрему проблему становлять втрати при гальмуванні, коли рекуперація енергії неможлива або обмежена через недосконаліть електронних систем гальмування [4].

Для порівняння, дизельний двигун у режимі максимальної ефективності здатен перетворювати до 40% хімічної енергії палива в механічну роботу, що майже втричі перевищує загальну ефективність електротранспортної системи, яка працює через централізоване електропостачання.

Таким чином, хоча електричні ролери є екологічно більш чистими засобами пересування, їх енергетична ефективність суттєво залежить від якості всієї енергетичної інфраструктури та ступеня втрат у кожному з елементів енергетичного ланцюга. Подолання цієї проблеми можливе завдяки

впровадженню альтернативних джерел енергії, зокрема паливних елементів або автономних сонячних систем, що дозволяє мінімізувати втрати та підвищити рівень автономності електротранспорту.

Слід зазначити, що з погляду енергетичної ефективності традиційні дизельні двигуни, які функціонують у межах оптимального робочого діапазону, демонструють досить високий коефіцієнт корисної дії — приблизно 40% хімічної енергії пального перетворюється в механічну енергію, що використовується безпосередньо для здійснення корисної роботи. Цей показник істотно перевищує сумарну ефективність повного енергетичного ланцюга електротранспорту, особливо коли останній залежить від централізованого енергопостачання [4].

У контексті глобального переходу на електричні транспортні засоби виникає серйозний виклик — забезпечення належного обсягу електроенергії для стабільного функціонування нових транспортних систем. Уявімо ситуацію, за якої велика частина автопарку в світі переходить на електротягу: у такому разі загальна встановлена потужність електродвигунів, що використовуються в автомобілях, мотоциклах, громадському транспорті тощо, може істотно перевищити поточну генерувальну спроможність усіх електростанцій світу.

Це створює додаткове навантаження на існуючу енергетичну інфраструктуру та зумовлює потребу в докорінній її модернізації. Зростаючий попит на електроенергію вимагає не лише збільшення кількості генеруючих потужностей, а й розширення мережі передавання, впровадження інтелектуальних систем управління енергоспоживанням, а також розвитку технологій накопичення електроенергії. Без комплексного підходу до вирішення цих питань повномасштабна електрифікація транспорту може виявитися технічно та економічно обмеженою [5].

Одним із стратегічно важливих напрямів вирішення проблеми енергозабезпечення електротранспорту, зокрема в умовах обмеженої пропускної здатності централізованих електричних мереж, є впровадження автономних джерел живлення, здатних генерувати електроенергію безпосередньо шляхом

перетворення хімічної енергії палива. Особливу увагу в цьому контексті привертають паливні елементи — високотехнологічні пристрої, в яких електрична енергія утворюється внаслідок електрохімічної реакції взаємодії водню з киснем [2].

Значною перевагою такого підходу є доступність кисню як одного з реагентів, оскільки він у достатній кількості міститься в атмосферному повітрі. Водень, у свою чергу, може накопичуватися у спеціальних ємностях у стиснутому чи зрідженому вигляді, що дозволяє реалізувати компактні системи зберігання палива та організувати тривалу автономну роботу електротранспортного засобу без необхідності частого дозаряджання [4].

Застосування паливних елементів не лише сприяє підвищенню рівня енергетичної незалежності транспортної системи, а й забезпечує високу екологічну ефективність, оскільки продуктом реакції є звичайна вода, а шкідливі викиди відсутні. Така технологія відкриває нові перспективи для створення сталого транспорту, знижує залежність від традиційних джерел енергії та зменшує вуглецевий слід [6].

Таким чином, паливні елементи можна розглядати як один із ключових компонентів майбутніх енергетично автономних електромобілів, що поєднують в собі високу ефективність, екологічність і гнучкість у використанні — особливо в регіонах з недостатньо розвиненою інфраструктурою зарядних станцій.

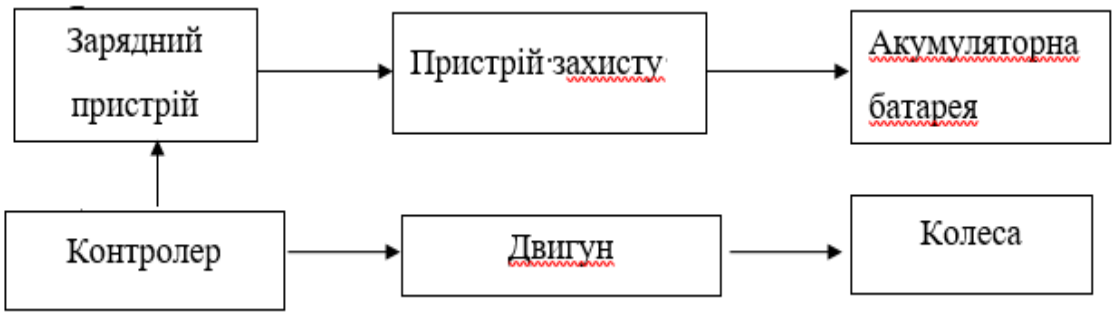

Рисунок 1.2 –Принцип управління [4]

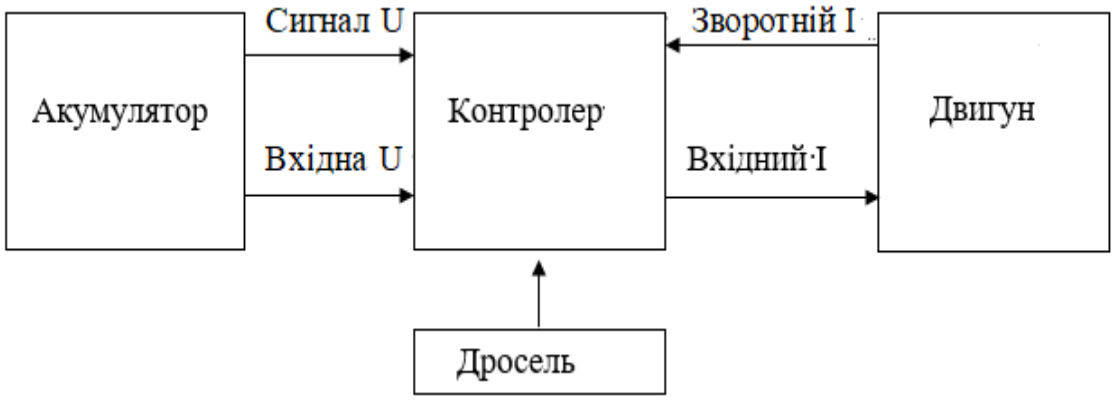

Рисунок 1.3 – Схема модульна [4]

Висновок

У даному розділі здійснено комплексний аналітичний огляд конструктивних і функціональних особливостей двоколісних електричних транспортних засобів, зокрема електроролерів. У ході аналізу було детально розглянуто складові елементи, що формують електромеханічну структуру типового електроролера, серед яких ключову роль відіграють три основні компоненти: електродвигун, контролер системи керування та акумуляторна батарея як джерело живлення.

Особливу увагу було приділено перевагам, які забезпечують електроролери у порівнянні з традиційними транспортними засобами. До таких переваг, зокрема, належать: високий коефіцієнт корисної дії електричних двигунів, що сприяє ефективному використанню енергії; підвищена експлуатаційна надійність та тривалий ресурс роботи основного силового агрегата — електродвигуна; а також наявність функції електродинамічного гальмування, що забезпечує додаткову безпеку під час руху та сприяє частковій рекуперації енергії.

Крім того, було виконано огляд спрощеної схеми силової частини електроролера, що включає акумуляторну батарею, електронний контролер та сам електродвигун. У рамках аналізу визначено базові функціональні завдання кожного з компонентів, а також наведено узагальнене розуміння їх взаємодії в межах єдиної системи електроприводу.

Загалом, отримані результати огляду дозволяють сформувати цілісне уявлення про будову та функціонування двоколісного електротранспорту, а також обґрунтувати доцільність його подальшого дослідження та вдосконалення з точки зору підвищення енергоефективності, надійності й експлуатаційної зручності.

2 СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Побудова математичної моделі процесів електромеханічного перетворення енергії, що відбуваються в електричних машинах, є одним із ключових етапів при формуванні структур і принципів дії систем автоматизованого керування електроприводами. Такий підхід забезпечує можливість глибокого аналізу фізичних закономірностей, що лежать в основі взаємозв’язку між електричними сигналами та механічними рухами, а також дозволяє точно моделювати поведінку системи у широкому діапазоні режимів — як сталих, так і перехідних. Завдяки цьому вдається не лише передбачити реакцію електромеханічної системи на змінні зовнішні впливи, а й оптимізувати алгоритми керування для забезпечення необхідної точності, швидкодії та енергоефективності функціонування електроприводу [7].

Процес взаємного перетворення енергії між електричною та механічною формами у складових електромеханічних систем, зокрема в електричних машинах, ґрунтується на фундаментальних законах класичної електродинаміки та механіки твердого тіла. Ключовою зоною, де безпосередньо відбувається електромагнітна взаємодія, є повітряний проміжок між ротором і статором, який виконує функцію активного середовища для створення і взаємодії магнітних полів. Ці поля формуються в результаті протікання електричного струму через обмотки, розташовані уздовж осьової геометрії машини [7].

У загальноприйнятій теорії аналізу електричних машин вважається, що силові лінії магнітного поля в повітряному зазорі орієнтовані перпендикулярно до контактних поверхонь статора та ротора. Така геометрія поля створює найбільш сприятливі умови для реалізації максимальної електромагнітної сили взаємодії між обмотками, що, в свою чергу, забезпечує ефективну передачу енергії та стабільну роботу електропривода в різних режимах навантаження. Цей

принцип лежить в основі математичного моделювання електромагнітних процесів і дозволяє точно розрахувати електромагнітний момент, який є основним вихідним параметром електричної частини системи та одночасно виконує роль вхідного впливу на її механічну складову [9].

У межах побудови математичної моделі електромеханічної системи типу електропривода ключовим параметром, що визначає динаміку переходу між електричною та механічною підсистемами, є електромагнітний момент. Цей момент виникає в результаті взаємодії магнітних полів, створених обмотками статора і ротора, і являє собою основний вихідний результат роботи електричної частини приводу. Саме електромагнітний момент виконує роль збуджуючої дії для механічної підсистеми, яка описує кінематичні та динамічні характеристики обертального руху ротора.

Механічна частина моделі включає в себе аналіз моменту інерції рухомих мас, зовнішніх навантажень, а також враховує динамічні впливи, пов’язані з тертям, еластичністю передач або дисбалансом. Таким чином, реалізується причинно-наслідковий зв’язок між електричними величинами (наприклад, струмами або напругами в обмотках) та механічними результатами (кутова швидкість, прискорення, обертальний момент).

З огляду на це, електропривод доцільно трактувати не як окремі електричну і механічну підсистеми, а як єдиний електромеханічний об’єкт, у якому відбувається безперервна взаємодія двох фізичних середовищ — електромагнітного та механічного. Такий підхід вимагає застосування інтегрованих методів моделювання, що поєднують засоби теорії електричних ланцюгів, рівнянь електромагнітного поля та рівнянь руху, що базуються на законах класичної механіки. Це дозволяє побудувати адекватну математичну модель, здатну відображати реальні процеси в електроприводі під час його функціонування у змінних режимах навантаження [9].

$$\dot{\theta} = \omega;$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c), \text{ де } M = k_m \cdot i_{lq};$$

$$\dot{i}_{ld} = -\frac{R_1}{L_1} \cdot i_{ld} + p_n \cdot \omega \cdot i_{lq} + \frac{1}{L_1} \cdot u_{ld};$$

$$\dot{i}_{lq} = -\frac{R_1}{L_1} \cdot i_{lq} - p_n \cdot \omega \cdot i_{ld} - \frac{k_u}{L_1}\omega + \frac{1}{L_1} \cdot u_{lq},$$

$$\tilde{i}_d = i_d - i_d^*;$$

$$\tilde{i}_q = i_q - i_q^*,$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\dot{\tilde{i}}_q = -\left(\frac{R_1}{L_1} + k_{iq1}\right)\tilde{i}_q - x_q,$$

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

$$\dot{\tilde{\omega}} = \frac{1}{J}\left(K_M i_q^* + K_M\tilde{i}_q\right) - \hat{M}_c - \tilde{M}_c - \dot{\omega}^*,$$

$$\tilde{M}_c = \frac{M_c}{J} - \hat{M}_c.$$

$$i_q^* = \frac{J}{K_M}\left(\hat{M}_c - k_\omega\tilde{\omega} + \dot{\omega}^*\right),$$

$$\dot{\hat{M}}_c = -\dot{\tilde{M}}_c = -k_{\omega i}\tilde{\omega},$$

$$i_q^* = \frac{J}{K_M}\left(-k_{\omega i}\tilde{\omega} - k_\omega\dot{\tilde{\omega}} + \ddot{\omega}^*\right),$$

$$\dot{\tilde{\omega}} = \frac{1}{J}K_M\tilde{i}_q - \tilde{M}_c - k_\omega\tilde{\omega};$$

$$\dot{\tilde{M}} = k_{\omega i}\tilde{\omega};$$

$$\begin{pmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{pmatrix} = e^{-Jp_n\omega} \begin{pmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix} = e^{-Jp_n\omega} \begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix}$$

Для подальшого аналізу й синтезу системи керування електроприводом доцільно трансформувати рівняння, що описують динаміку зміни координат системи, у більш зручну для моделювання та обчислень форму. З урахуванням взаємозв'язку між вхідними та вихідними змінними, а також з метою точного відображення динамічної поведінки системи, рівняння динамічного відпрацювання координат переформулюємо у такому вигляді:

$$\dot{\tilde{M}} = k_{\omega i}\tilde{\omega};$$

$$\dot{\tilde{\omega}} = -k_{\omega i}\tilde{\omega} - \tilde{M}_c + \mu \cdot \tilde{i}_q, \text{де } \mu = \frac{k_m}{J};$$

$$\dot{x}_q = k_{iq} \cdot \tilde{i}_q;$$

$$\dot{\tilde{i}}_q = -k_{iq} \cdot \tilde{i}_q - x_q - \frac{k_\omega}{\mu} \cdot \tilde{M}_c,$$

$$\dot{x}_1 = A_{11} \cdot x_1,$$

$$A_{11} = \begin{vmatrix} 0 & -k_{\omega i} & 0 & 0 \\ -1 & -k_{\omega i} & 0 & \mu \\ 0 & 0 & 0 & \mu \\ -\frac{k_\omega}{\mu} & 0 & -1 & -k_{iq} \end{vmatrix}$$

Матриця, представлена у відповідному рівнянні, володіє рядом важливих структурних і функціональних характеристик, які мають істотне значення для побудови ефективної системи автоматичного керування електроприводом. Її структура умовно поділяється на два основні блоки, кожен з яких виконує окрему, проте взаємопов’язану функцію в загальній схемі регулювання [7].

Верхня частина матриці відповідає за моделювання динамічної поведінки зовнішнього регулятора швидкості. Саме цей блок формує алгоритм відслідковування та підтримання заданої швидкості обертання виконавчого органу, враховуючи зміну навантаження або зовнішніх умов. Його функціонування є критичним для забезпечення стабільної динаміки руху електромеханічної системи [8].

Нижній блок матриці описує внутрішню підсистему регулювання струму — це так званий швидкодіючий контур, який реагує на зміну електричних параметрів з мінімальним часовим запізненням. Завдяки високій чутливості й швидкості реагування ця підсистема виконує функцію миттєвої компенсації динамічних збурень, що виникають у системі, тим самим забезпечуючи не лише точність струмового регулювання, але й загальну стійкість усієї електропривідної установки.

Таким чином, розглянута матрична структура є ключовим елементом у формалізації та аналізі взаємодії між основними рівнями регулювання в сучасних системах електроприводу, поєднуючи в собі точність зовнішнього управління з високою швидкодією внутрішніх компенсуючих механізмів.

$$p^2 + k_p \cdot p + k_i = 0,$$

$$k_i = \frac{k_p^{\,2}}{4}$$

У системах автоматичного керування електроприводами загальноприйнятою є практика ієрархічної організації контурів регулювання з урахуванням їх динамічних характеристик. Зокрема, типовим є встановлення такої динамічної взаємозалежності між контурами, за якої кожен зовнішній контур має приблизно удвічі нижчу швидкодію порівняно з безпосередньо підпорядкованим йому внутрішнім контуром. Такий принцип забезпечує узгоджену роботу системи та запобігає виникненню небажаних коливальних процесів чи зворотного впливу з повільнішого рівня регулювання на швидший.

Це співвідношення реалізується шляхом відповідного налаштування власних частот кожного з контурів регулювання, які розглядаються в ізольованому вигляді, тобто за відсутності зворотного зв’язку з вищими або нижчими рівнями. Власні частоти контурів обираються таким чином, щоб кожен наступний контур мав вищу частоту недемпфованих (власних) коливань, тим самим забезпечуючи необхідну ієрархію швидкодії та стабільну взаємодію між рівнями керування [8].

Висновок

У цьому розділі було здійснено синтез системи векторного керування швидкістю синхронного двигуна з постійними магнітами на роторі, яка побудована на основі лінійної структури із застосуванням контурів регулювання струму та швидкості. Розроблена система відзначається стабільністю в сенсі асимптотичної стійкості положення рівноваги — тобто з часом усі відхилення стану від бажаного значення згасають, що гарантує надійність функціонування електропривода в різноманітних динамічних режимах.

Часова поведінка контурів керування визначається за допомогою відповідного підбору параметрів — зокрема, коефіцієнтів підсилення в регуляторах струму та швидкості. Для досягнення бажаного розподілу динамічних характеристик системи у часі, а також забезпечення належного ступеня ієрархії між внутрішніми та зовнішніми контурами, застосовується

принцип співвідношення власних частот. Такий підхід дозволяє налаштувати контури так, щоб система загалом мала узгоджену, швидкодіючу та стійку відповідь на зовнішні збурення та зміни навантаження.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

З метою точного визначення потужності, яку повинен розвивати електродвигун, встановлений у конструкції електричного ролера, необхідно здійснити комплексний аналіз усіх чинників, що протидіють руху транспортного засобу. Основними джерелами сил опору, які суттєво впливають на динаміку пересування, є:

- Сила кочення — виникає внаслідок деформацій еластичних елементів шин та контакту з дорожнім покриттям, і є однією з базових складових втрат енергії при русі;
- Аеродинамічний опір — формується під впливом потоку повітря, що чинить протидію переміщенню корпусу транспортного засобу та пропорційний квадрату швидкості руху;
- Сила опору підйому — діє при русі по нахиленій поверхні й обумовлена проєкцією ваги транспортного засобу на напрямок руху в залежності від кута підйому;
- Сила інерційного прискорення (розгону) — відображає динамічну складову, яка визначає зусилля, необхідне для досягнення певного прискорення, згідно з другим законом Ньютона.

Кожен із зазначених компонентів чинить безпосередній вплив на загальне навантаження, яке мусить долати електропривод у реальних умовах експлуатації. Проведення обчислень для цих сил дозволяє не лише оцінити потребу, але й точно визначити необхідний момент, який є критичним параметром для ефективного функціонування двигуна [7].

На основі отриманих значень виконується розрахунок потужності, яку має забезпечити електропривід для підтримки стабільного руху або здійснення розгону. Отримані результати слугують основою для подальшого вибору типу

електродвигуна, його конструктивних параметрів і режимів роботи, що відповідають конкретним умовам експлуатації та технічним вимогам до мобільного електротранспорту [8].

Для того щоб забезпечити початок руху електричного ролера, необхідно досягти такої умови, за якої величина тягової сили, що реалізується на ведучому колесі транспортного засобу, перевищує сумарну величину всіх наявних сил опору, що протидіють поступальному переміщенню. Інакше кажучи, рушійна сила, яка виникає в результаті дії обертового моменту електродвигуна, повинна бути більшою за агрегатну силу опору кочення, аеродинамічного опору, опору ухилу та інерційної сили розгону, що виникає при зміні швидкості руху [9].

Тягове зусилля, що прикладається до дорожнього полотна через контактну площину ведучого колеса, утворюється внаслідок передачі моменту, який генерується електричною машиною. Цей момент передається через кінематичні елементи силової трансмісії, що, як правило, включає в себе редуктори, муфти, вали та підшипники. У процесі такої передачі неминуче виникають втрати енергії, зумовлені силами тертя, пружними деформаціями та іншими механічними чинниками. Відповідно, фактична величина сили тяги, яка доступна на ведучому колесі, визначається з урахуванням цих втрат за допомогою наступного співвідношення [10]:

$$F_{тяж.} = \frac{\eta_{тр.} \cdot M_e}{R_к} ,$$

Для отримання максимально точних результатів у визначенні сили опору коченню необхідно враховувати комплекс взаємопов’язаних факторів, що суттєво впливають на цей процес. Основними серед них є деформаційні зміни покришки транспортного засобу, які виникають у момент її контакту з дорожньою поверхнею, а також подібні зміни у структурі самого дорожнього покриття. Окрім цього, значну роль відіграє сила тертя, що формується між

шиною та поверхнею дороги під час руху транспортного засобу. З огляду на складність і багатофакторність цього явища, що включає нелінійні залежності і численні змінні параметри, проведення точних аналітичних розрахунків є досить складним і трудомістким процесом. Саме тому, для спрощення інженерних розрахунків та підвищення їх практичної застосовності, у більшості випадків використовують емпірично визначений коефіцієнт тертя кочення, отриманий у результаті лабораторних або польових експериментів. Цей коефіцієнт виступає основою для подальшого моделювання і прогнозування поведінки транспортного засобу в умовах реального руху.Цей коефіцієнт, отриманий шляхом експериментальних досліджень, значно спрощує розрахунок сили опору коченню і є основою для подальшого моделювання динаміки руху транспортного засобу [7].

$$F_{коч.} = f \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha$$

$$F_{під.} = 140 \cdot 9.8 \cdot 0.087 = 119.36 \text{ Н}$$

$$F_{оп.пов..} = \frac{C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v^2}{2}$$

$$F_{оп.пов..} = \frac{0.7 \cdot 0.5 \cdot 1.226 \cdot 11.11^2}{2} = 26.48 \text{ Н}$$

$$F_{ін.} = m \cdot a \cdot \sigma_{об.}$$

$$F_{ін.} = 140 \cdot \frac{11.11}{10} \cdot 0.35 = 54.39 \text{ Н},$$

$$M_e = \frac{(F_{коч.} + F_{оп.пов.} + F_{під.} + F_{ін.}) \cdot R_к}{\eta}$$

$$M_e = \frac{(24.59 + 119.36 + 26.48 + 54.39) \cdot 0.18}{0.87} = 36.17 \text{ Нм}$$

$$v = \omega \cdot R_к \Rightarrow \omega = \frac{v}{R_к} = \frac{11.11}{0.18} = 61.72 \text{ рад / с}$$

$$P = M_e \cdot \omega = 36.177 \cdot 61.22 = 2.214 \text{ кВт}$$

Виконаємо коректний перерахунок коефіцієнта моменту з урахуванням того, що наданий коефіцієнт розрахований для амплітудного значення струму. Для подальших точних розрахунків необхідно привести цей коефіцієнт до значення, яке відповідає діючому (ефективному) значенню струму статора, оскільки саме це значення є фізично релевантним для аналізу робочих режимів електричного двигуна. Такий перерахунок забезпечить більш адекватне відображення реальних умов роботи і дозволить уникнути похибок, пов'язаних із різними формами подання струму [11].

$$M = k_m \cdot i_q \rightarrow k_m = \frac{M}{i_q};$$

$$M = K_{M_N} \cdot I \rightarrow K_{M_N} = \frac{\sqrt{2} \cdot M}{i_q};$$

$$K_m = \frac{K_{m_n} \cdot I}{I \cdot \sqrt{2}} = \frac{K_{m_n}}{\sqrt{2}} = \frac{2.37}{\sqrt{2}} = 1.69 \ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}.$$

$$K_u = \frac{K_{ЕМК} \cdot 30}{1000 \cdot \pi} = \frac{145.5 \cdot 30}{1000 \cdot 3.14} = 1.39 \ \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p_n}$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{4} = 78.5 \text{ рад/с}$$

$$J_п = J_{дв} + m \cdot R_к^{\ 2}$$

$$J_п = 0.0273 + 140 \cdot 0.18^2 = 4.56 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Акумуляторні батареї мають низку фундаментальних характеристик, які визначають їхню ефективність і сферу застосування. Найважливішими з цих параметрів є ємність, напруга, а також час, необхідний для повного заряджання. У галузі електротранспорту особливе поширення отримали різні типи акумуляторних накопичувачів енергії. До найбільш часто використовуваних відносяться свинцево-кислотні акумулятори, літій-іонні батареї та лужні енергетичні накопичувачі. Однією з основних характеристик, що визначають продуктивність батареї, є її ємність — показник, який вказує на тривалість часу, протягом якого акумулятор здатен безперервно постачати електроенергію підключеному до нього навантаженню. Ємність зазвичай виражається в ампер-годинах (А·год), що є продуктом постійного струму, який акумулятор може віддавати, та часу його розряду. Іншими словами, одиниця виміру демонструє, що ємність акумулятора визначається як добуток величини стабільного струму розряду на тривалість цього розряду [9].

$$E = I \cdot T$$

У процесі розряду акумуляторної батареї спостерігається поступове зниження її напруги. Коли напруга досягає визначеного мінімального рівня, відомого як кінцева напруга розряду, система електричного ролера автоматично відключає живлення для запобігання повного розряду. Варто зазначити, що чим

нижче встановлена кінцева напруга розряду, тим більший запас енергії може бути використаний з акумулятора, що відповідно збільшує його корисну ємність [12].

Для визначення номінальної ємності акумулятора на його корпусі або в технічній документації зазвичай вказується числове значення, яке характеризує максимальний струм, який батарея може видавати, а також тривалість часу, протягом якої вона здатна підтримувати цей струм без суттєвого зниження ефективності. Наприклад, якщо в маркуванні зазначено певне значення ємності, це означає, що акумулятор здатен подавати визначений струм на навантаження протягом певного проміжку часу. При цьому слід враховувати, що зі збільшенням навантажувального струму ефективна віддача акумулятора відносно номінальної ємності знижується. Іншими словами, при зростанні споживаної потужності фактична корисна ємність акумулятора зменшується, що пояснюється фізичними та хімічними процесами, які відбуваються всередині батареї під час інтенсивного розряду [11].

Причиною цього явища є специфіка внутрішніх процесів, що відбуваються в акумуляторі, зокрема протікання струму через іонну провідність електроліту. Хоча електроліт може мати досить високу іонну провідність, яка сама по собі не є критичним фактором, основним обмеженням виступає швидкість перенесення іонів всередині активних матеріалів пластин акумулятора. Крім того, іони повинні подолати фазовий розділ між поверхнею електрода і електролітом, що є досить повільним процесом. Внаслідок цього при швидкому розряді частина іонів не встигає покинути електрод і перейти в електроліт протягом обмеженого часу розряду. Це явище призводить до того, що акумулятор не може повністю віддати свою номінальну ємність, що обмежує його ефективність при високих навантаженнях [9].

Як було згадано раніше, ємність акумулятора характеризує тривалість часу, протягом якої батарея здатна безперервно забезпечувати електроживлення підключеного навантаження. У контексті електричних схем існують два

основних способи з’єднання акумуляторних елементів — послідовне та паралельне. Послідовне з'єднання передбачає з'єднання батарей одна за одною, що призводить до сумування їхніх напруг, тоді як при паралельному з’єднанні елементи об’єднуються так, щоб збільшити загальну ємність і силу струму, підтримувану системою, зберігаючи при цьому напругу на рівні одного елемента [10].

При організації послідовного з'єднання акумуляторних батарей позитивна клема першого акумулятора під'єднується до позитивного виходу електричної схеми за допомогою спеціальної перемички. Далі негативна клема цього акумулятора з'єднується з позитивною клемою наступного елемента акумуляторної батареї. Такий порядок підключення повторюється для кожного наступного акумулятора в ланцюзі, забезпечуючи збільшення загальної напруги системи шляхом сумування напруг окремих батарей, при цьому загальна ємність залишається на рівні однієї батареї.

Паралельне з’єднання акумуляторних елементів передбачає електричну конфігурацію, в якій декілька окремих акумуляторів підключаються таким чином, що їхні позитивні клеми з’єднуються між собою, як і негативні. У результаті такої схеми загальна напруга батареї залишається незмінною — вона відповідає напрузі одного окремого акумуляторного елемента. Однак у цьому випадку відбувається підсумовування ємностей усіх акумуляторів, що беруть участь у з’єднанні. Тобто, сумарна ємність створеної системи є прямою сумою номінальних ємностей кожного елемента. Це має суттєве практичне значення: паралельне з’єднання дозволяє збільшити загальну кількість накопиченої енергії без необхідності підвищувати рівень напруги, що є важливим для багатьох типів електронного та електротранспортного обладнання. Завдяки такій структурі з’єднання можна суттєво продовжити час автономної роботи пристрою або транспортного засобу, що працює від акумуляторної батареї. Іншими словами, паралельна схема підключення сприяє зростанню енергетичного потенціалу системи без зміни електричних параметрів, які можуть бути критичними для

сумісності з робочим обладнанням. Завдяки своїй простоті реалізації та ефективності у збільшенні ємності, цей спосіб з'єднання широко використовується в енергетичних модулях електромобілів, електросамокатів, акумуляторних блоків безперебійного живлення, а також у багатьох інших сучасних пристроях, де необхідно забезпечити тривалу роботу без підзарядки. Такий підхід дає змогу конструкторам гнучко адаптувати акумуляторні системи до конкретних вимог щодо енергоспоживання [10].

Висновок

У даному розділі було здійснено комплексний теоретичний аналіз, спрямований на визначення основних факторів, що чинять опір руху електричного ролера при його русі з максимальною розрахованою швидкістю. Під час дослідження враховано всі ключові види опору — аеродинамічний, опір коченню, а також вплив гравітаційної складової на ухилах. На основі отриманих числових значень загального опору руху було визначено величину крутного моменту, яку необхідно реалізувати на вихідному валі тягового електродвигуна для забезпечення стійкого та динамічного руху в умовах реальної експлуатації.

Здійснене обчислення крутного моменту в поєднанні з розрахунком необхідної потужності дозволило сформувати обґрунтовані технічні вимоги до силового агрегату. Ці параметри стали визначальними критеріями при виборі моделі двигуна, здатного забезпечити ефективну роботу електроролера в заданому режимі навантаження. Таким чином, результати розрахунків не лише забезпечили достовірну базу для підбору електродвигуна, а й лягли в основу подальшого проектування електроприводної системи.

У результаті детального порівняльного дослідження технічних параметрів доступних на ринку моделей електродвигунів, було здійснено обґрунтований вибір найбільш придатного варіанта для інтеграції в конструкцію електричного ролера. З урахуванням розрахованих експлуатаційних навантажень і вимог до крутного моменту та потужності, перевага була надана двигуну з номінальною

потужністю 2,8 кВт, оснащеному чотирма парами полюсів. Така конфігурація електричної машини забезпечує ефективне узгодження обертальних характеристик із динамічними потребами транспортного засобу.

Обраний електродвигун здатен генерувати номінальний крутний момент, який повністю відповідає попередньо розрахованим значенням, необхідним для подолання сумарного опору руху на максимальній швидкості. Завдяки цьому забезпечується стабільна та надійна робота електроролера в межах стандартних режимів експлуатації, без перевантаження силового агрегату. Таким чином, вибір двигуна є технічно обґрунтованим і відповідає критеріям енергоефективності, надійності й довговічності, що є ключовими аспектами у створенні сучасного електротранспорту.

Окрім розрахунків, пов’язаних із силовою частиною електроприводу, в межах цього розділу було всебічно проаналізовано процес формування акумуляторної батареї, яка є ключовим джерелом енергії для електроролера. Особлива увага була приділена вивченню варіантів з’єднання окремих акумуляторних елементів у єдину систему — як за схемою послідовного з’єднання, що забезпечує збільшення напруги, так і за схемою паралельного підключення, яка дозволяє збільшити загальну ємність батареї.

Беручи до уваги електричне навантаження, що створюється тяговим двигуном під час роботи, а також задану тривалість автономної експлуатації без підзарядки, було проведено техніко-економічне обґрунтування кількісного складу акумуляторного блоку. Зокрема, було розраховано необхідну кількість акумуляторних осередків для досягнення.

У результаті цих розрахунків було сформовано конфігурацію акумуляторної системи, що повністю відповідає потребам електричного транспорту за параметрами надійності, стабільності напруги та тривалості роботи. Такий підхід дозволяє гарантувати ефективне живлення усіх споживачів енергії електроролера впродовж усього періоду використання без потреби в проміжній підзарядці.

4 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ

З метою ідентифікації ключових компонентів електромеханічної системи електроролера та розуміння принципів їхньої взаємодії, у даному розділі буде проаналізовано дві основні схеми: функціональну та електричну принципову. Розгляд цих схем дозволить детально дослідити логіку побудови електросистеми, визначити послідовність та характер зв’язків між окремими елементами, а також виявити загальні закономірності функціонування електрообладнання в складі транспортного засобу [13].

Функціональна схема є концептуальним представленням електромеханічної системи електроролера, що дозволяє встановити загальну логіку роботи окремих функціональних блоків, таких як система живлення, блок керування, електродвигун, а також інформаційно-керуючі та виконавчі елементи. Вона дає змогу візуалізувати розподіл обов’язків між підсистемами та зрозуміти, яким чином забезпечується керування процесами руху та енергоспоживання в цілому [14].

У свою чергу, електрична принципова схема розкриває внутрішню будову електронних та електричних вузлів з урахуванням точного компонування елементів, способів їх з’єднання, напрямків протікання струму, а також реалізації функцій керування, захисту, перетворення та подачі електроенергії. Така схема є критично важливою для технічного аналізу, налагодження, діагностики та обслуговування системи .

Сумісне вивчення функціональної та принципової електричної схем дозволяє отримати всебічне уявлення про архітектуру електроролера, логіку роботи всіх його підсистем, а також про шляхи реалізації алгоритмів керування і забезпечення надійної взаємодії між усіма компонентами під час експлуатації.

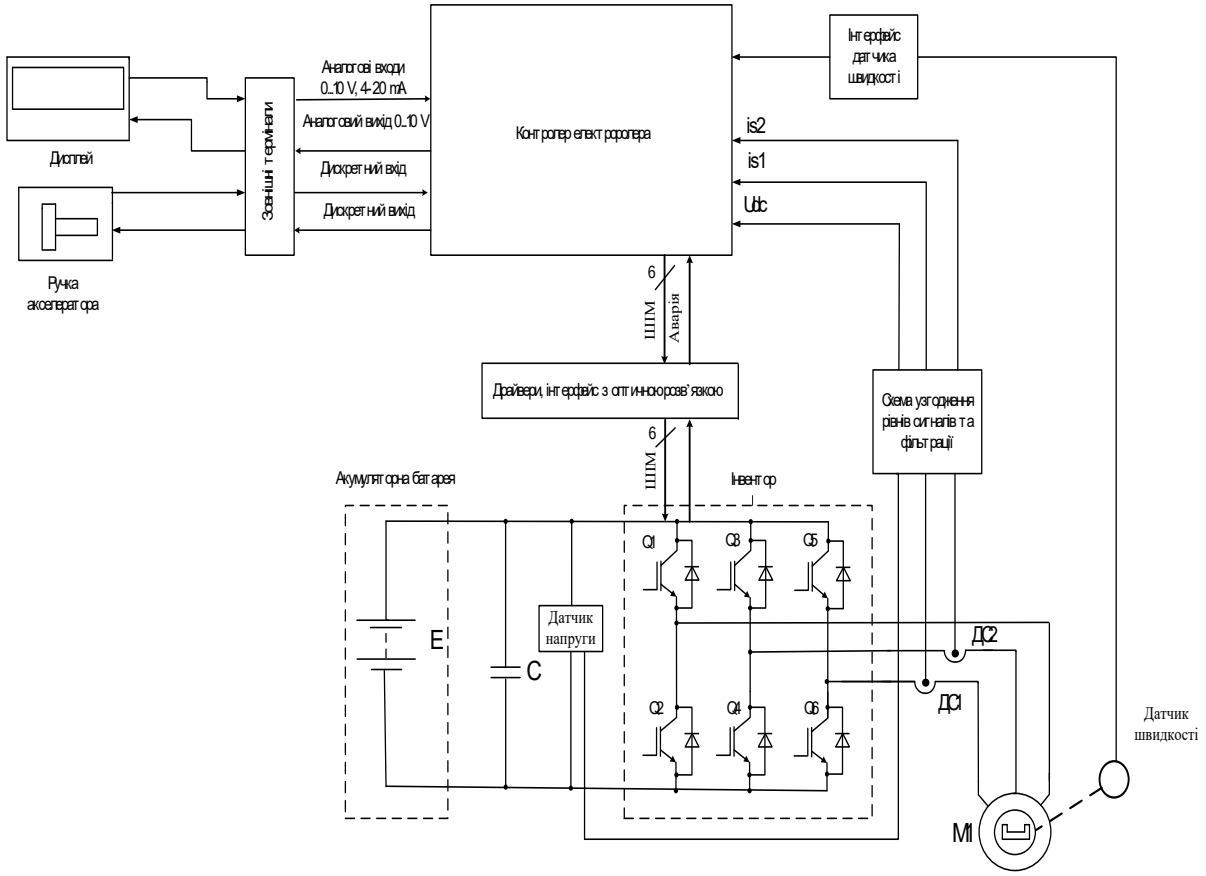

Рисунок 4.1 – Схема функціональна

Частотний перетворювач у складі електричного ролера виконує функцію центрального елементу силової електроніки та водночас виступає як керуючий модуль, інтегруючи в собі як силову, так і керувальну частини системи. Структурно силова частина перетворювача охоплює кілька ключових компонентів: джерело живлення у вигляді акумуляторної батареї, інверторний блок для формування змінного струму заданої частоти та амплітуди, а також систему датчиків, що вимірюють струм у фазах статора і напругу на шині постійного струму. До того ж до силової частини входять драйверні схеми, які забезпечують керування напівпровідниковими ключами інвертора, а також модулі гальванічної розв'язки для безпечної передачі сигналів між низьковольтною логікою контролера та високовольтною силовою частиною [14].

Контролер, у свою чергу, виконує функції логічного обробника керувальних сигналів і містить електронні вузли для узгодження, обробки та

формування управляючих імпульсів відповідно до заданого алгоритму роботи електроприводу. Завдяки чіткій взаємодії між силовими компонентами та контролером забезпечується ефективне керування тяговим двигуном, оптимізація режимів роботи системи, а також контроль за основними електричними параметрами, необхідними для безпечної та стабільної експлуатації системи [15].

Для здійснення коректного проєктування та розрахунку основних вузлів силової частини перетворювача частоти, призначеного для живлення синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ), необхідно враховувати низку ключових параметрів. До таких параметрів належать: номінальна потужність електродвигуна, значення його номінального та максимального струмів, а також технічні характеристики джерела живлення — зокрема, ємність і напруга акумуляторної батареї [15].

З огляду на ці вихідні дані можна здійснити розрахунок силового блоку інверторного типу, який формує змінну напругу та забезпечує кероване живлення обмоток статора СДПМ. На основі наведених характеристик визначаються номінальні та пікові струмові навантаження на напівпровідникові ключі, вибирається конфігурація силових транзисторів (наприклад, IGBT або MOSFET) та розраховується схема драйверів, що забезпечують їхнє надійне комутаційне керування [16].

Крім того, враховуючи параметри акумуляторної батареї, виконується перевірка на відповідність енергетичних характеристик джерела живлення потребам електродвигуна в різних режимах експлуатації, включаючи пускові процеси, динамічні навантаження та гальмування. Таким чином, результати цього етапу розрахунку лягають в основу формування силової архітектури перетворювача частоти, що забезпечує ефективну та безпечну роботу електромеханічної системи [15].

Максимально допустиме значення фазного струму електродвигуна визначається його номінальними технічними характеристиками, наведеними в паспортних даних виробу. У межах цього дослідження приймається, що граничне значення струму в обмотці однієї фази становить ___ А (значення задається згідно з технічними даними конкретної моделі двигуна). Це значення є критичним параметром при виборі силових електронних компонентів перетворювача частоти, зокрема, IGBT- або MOSFET-ключів, а також при проєктуванні системи охолодження і формуванні алгоритмів захисту від перевантаження струмом [16]:

$$I_{max} = 79.5 \text{ А}.$$

Під час підбору ізольованих біполярних транзисторів з керованим затвором (IGBT), які використовуються в якості силових ключових елементів у складі автономних інверторів напруги, необхідно обов’язково враховувати їхню гранично допустиму напругу між колектором та емітером. Вимоги до цього параметра формуються виходячи з умов безпечної експлуатації пристрою, а саме — напруга пробою IGBT повинна перевищувати максимальну робочу напругу джерела живлення (акумуляторної батареї) щонайменше у 1.5 раза. Таким чином, якщо відома пікова напруга акумуляторного джерела, її необхідно помножити на коефіцієнт запасу (1.5), щоб визначити мінімально допустиме значення напруги колектор–емітер для вибраного транзистора, що гарантує його надійну та довготривалу роботу у змінних навантажувальних умовах [16].

$$U_{ce} > 1.5 \cdot U_{бат}$$

Таким чином:

$$U_{ce} = 1.5 \cdot 404 = 606 \text{ В}$$

Процедура вибору IGBT-транзистора для використання в інверторній частині електроприводу базується на аналізі його граничних експлуатаційних характеристик, наведених у технічній документації виробника. Основними параметрами, які приймаються до уваги при виборі, є: допустиме тривале значення струму, що протікає через колектор транзистора, а також максимально допустиме значення напруги між колектором та емітером. Для забезпечення надійної роботи пристрою за умов тривалого навантаження і можливих пікових перевантажень, обрані значення IGBT повинні відповідати таким співвідношенням [16].

Керуючий контролер відіграє ключову роль у функціонуванні частотного перетворювача та забезпечує повну автоматизацію процесу керування електроприводом. Цей інтелектуальний модуль виконує обробку команд, пов’язаних із регулюванням основних динамічних координат, таких як швидкість обертання чи момент. Контролер реалізує алгоритм управління роботою двигуна, генерує необхідні ШІМ-імпульси для керування силовими напівпровідниковими ключами інвертора, а також відповідає за виконання широкого спектру захисних функцій, включаючи виявлення перевантажень, перенапруги, коротких замикань або порушення фазної послідовності [17].

Схеми узгодження сигналів і фільтрації використовуються для адаптації аналогових виходів сенсорів струму та напруги до вхідних характеристик аналого-цифрового перетворювача (АЦП), вбудованого у контролер. Такі схеми забезпечують нормалізацію рівнів сигналів, щоб уникнути перевантаження входів АЦП, а також дозволяють застосовувати активні або пасивні фільтри для зменшення впливу електромагнітних завад, що особливо важливо в умовах інтенсивної роботи електричного двигуна [17].

Інтерфейс підключення датчика швидкості забезпечує можливість інтеграції з різноманітними типами сенсорів, зокрема фотоімпульсними або магнітними датчиками, які відстежують частоту обертання колеса. Як правило, такий інтерфейс оснащується елементами гальванічної розв’язки, що ізолюють

низьковольтну обчислювальну частину контролера від високовольтного силового кола, підвищуючи безпечність роботи пристрою.

Зовнішні термінали дозволяють реалізувати підключення допоміжного обладнання та органів керування — зокрема аналогових і дискретних входів/виходів, необхідних для взаємодії з дисплеєм, ручкою акселератора, кнопками режимів роботи, або іншими елементами інтерфейсу користувача.

Акумуляторна батарея — це джерело електричної енергії, яке живить як тяговий електродвигун, так і всі допоміжні вузли електричної системи. Вона виконує функцію накопичувача енергії, що дозволяє забезпечити автономність роботи електричного ролера на тривалий період без потреби в постійному підключенні до мережі[16].

У складі електроролера контролер виконує не лише функцію генератора керувальних сигналів, а й фактично координує роботу всього електромеханічного комплексу, включаючи аналіз вхідних даних і реалізацію закону керування швидкістю обертання двигуна. При надходженні сигналу від ручки акселератора, контролер зчитує величину бажаної швидкості та, орієнтуючись на показники з давача швидкості або датчиків Холла, формує необхідну частоту та тривалість імпульсів, які подаються на інвертор [18].

У системах, де застосовується двигун з датчиками**,** необхідність в окремому давачі швидкості відпадає. Датчики Холла виконують функцію зворотного зв’язку, надаючи контролеру дані щодо положення ротора в реальному часі. Це дає змогу точно синхронізувати момент подачі імпульсів на відповідні обмотки статора. Таким чином, забезпечується оптимальне керування роботою мотор-колеса на всіх етапах його функціонування. Контролер постійно відстежує зміну електричних параметрів системи, включно з напругою, струмом, частотою та температурою, що дає можливість не лише ефективно регулювати швидкість обертання, але й своєчасно реагувати на потенційні аварійні ситуації. Швидкість обертання електродвигуна прямо залежить від амплітуди поданої напруги, тому

точність у формуванні цієї напруги є критично важливою для стабільності й ефективності роботи всієї електросистеми [19].

Висновок

У межах цього розділу було детально проаналізовано функціональну схему, що забезпечує розуміння принципів побудови та взаємодії окремих підсистем пристрою. Основну увагу зосереджено на ключових компонентах частотного перетворювача, які забезпечують ефективне перетворення та керування електричною енергією. До таких критично важливих елементів належать: напівпровідникові ключі IGBT-типу, які виконують функцію керованих перемикачів у силовому контурі; мікропроцесорний контролер, що реалізує алгоритми керування та захисту; датчики струму, необхідні для реалізації зворотного зв’язку; енкодер або датчик положення ротора, що забезпечує точне позиціонування в системі векторного керування; а також елементи енергоживлення — акумуляторні батареї та фільтрувальні конденсатори, що стабілізують напругу в проміжному ланцюгу. Додатково враховано застосування датчика напруги, який дозволяє здійснювати контроль за параметрами постійного струму в силовому ланцюгу, запобігаючи перенавантаженням та аварійним режимам.

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЧАСТОТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ СИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

У даному розділі було здійснено моделювання та дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи з метою аналізу його поведінки під час експлуатації в різних режимах роботи. Математичне моделювання проводилося за допомогою спеціалізованого програмного середовища MATLAB/Simulink, що забезпечило можливість побудови адекватної і деталізованої моделі всієї системи приводу. Створена модель охоплює взаємодію основних компонентів, включаючи тяговий електродвигун, інверторну частину перетворювача, систему керування та навантаження, що моделює масу транспортного засобу. Завдяки цьому стало можливим проаналізувати динамічну поведінку системи, зокрема, перехідні процеси при запуску, зміні навантаження та варіації вхідних параметрів. Результати моделювання надали змогу оцінити реакцію системи на керуючі дії, визначити час виходу на усталений режим та перевірити відповідність обраної конструкції заданим технічним вимогам [16].

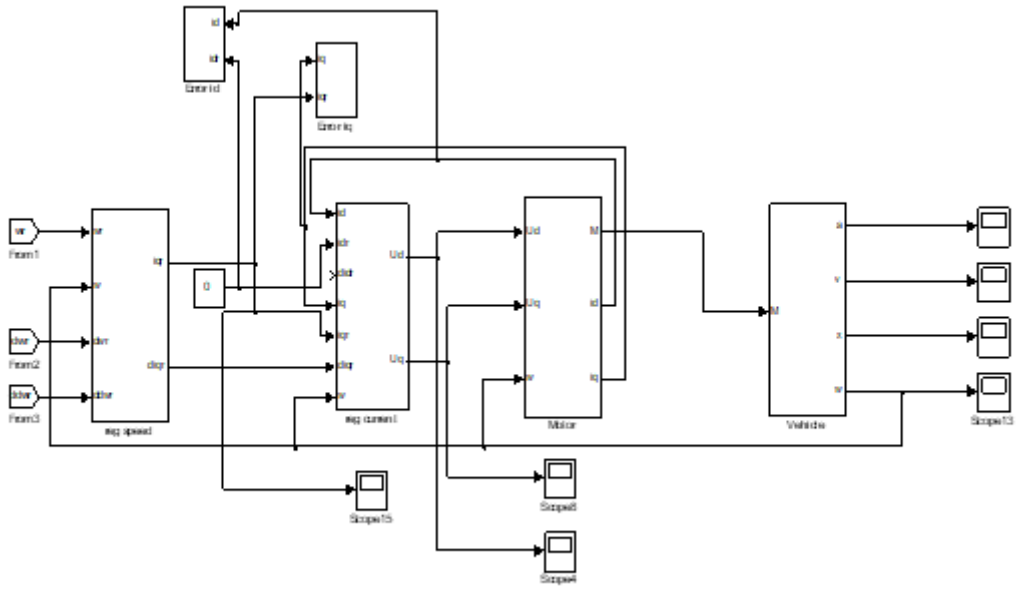

Рисунок 5.1 – Модель системи управління

Рисунок 5.2 –Траєкторії швидкості

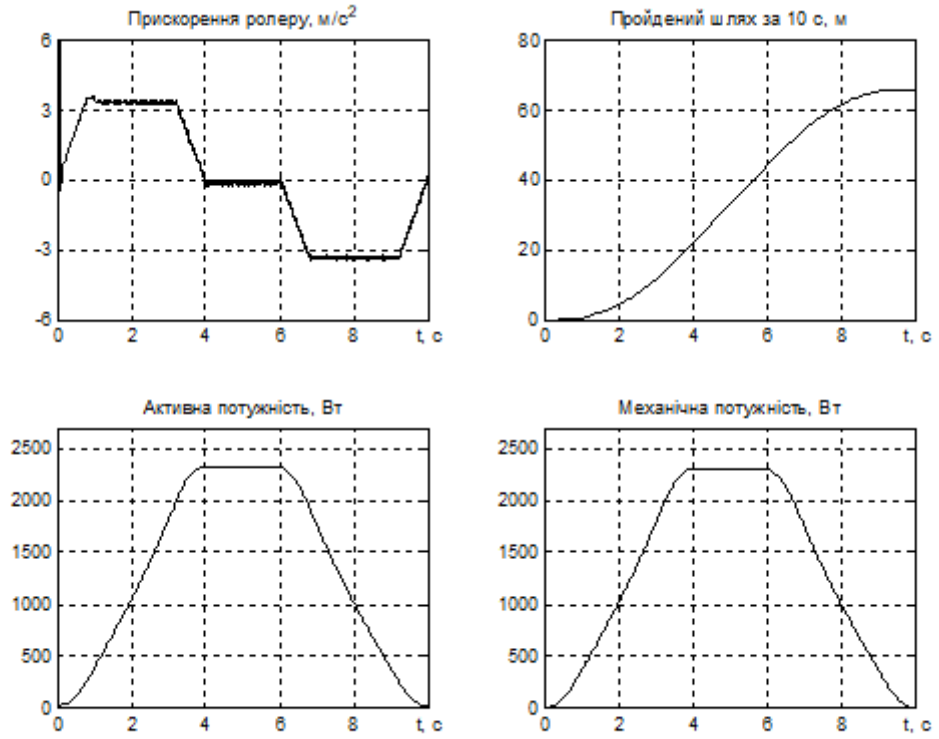

Рисунок 5.3 – Перехідні процеси

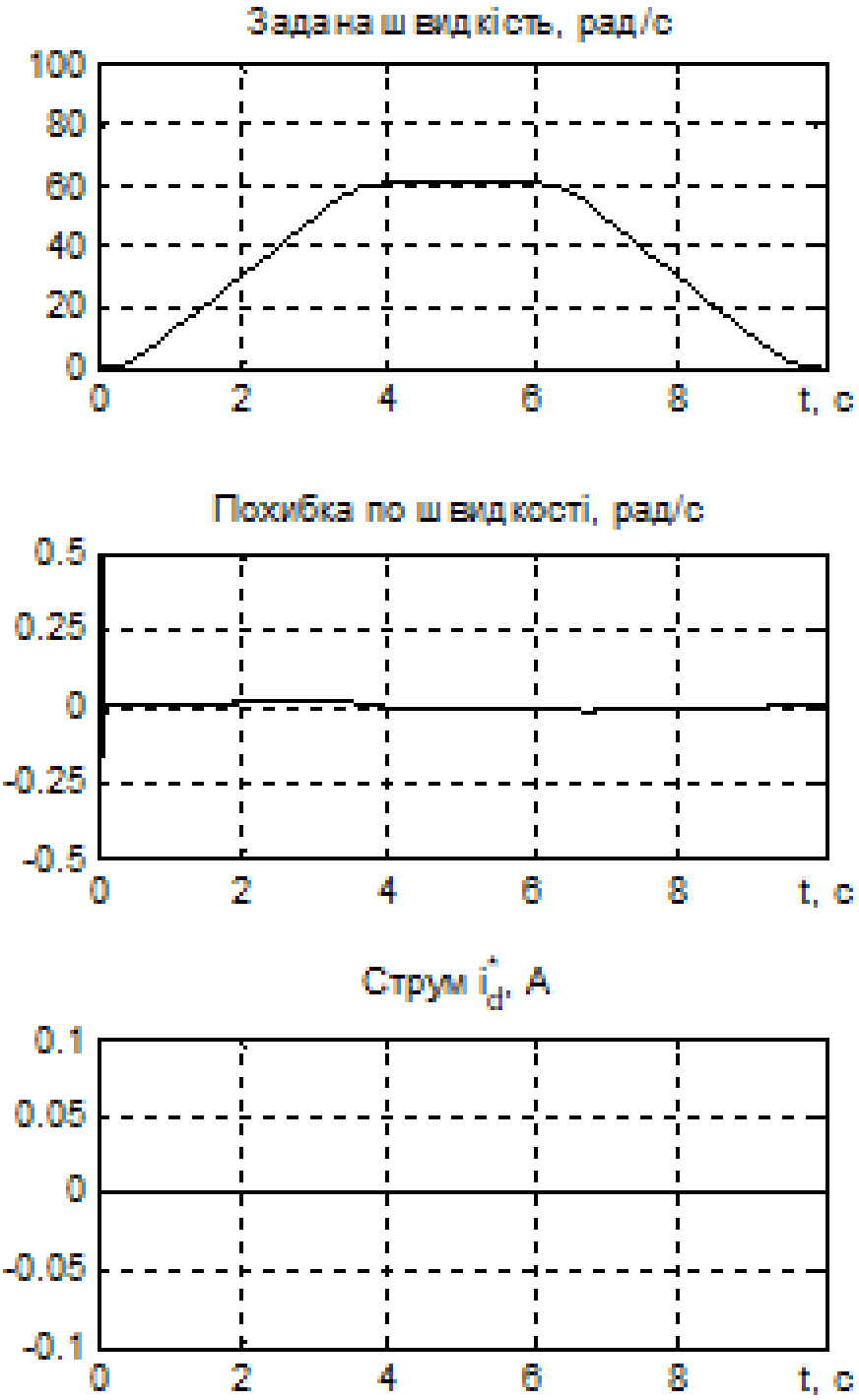

Рисунок 5.4 – Перехідні процеси

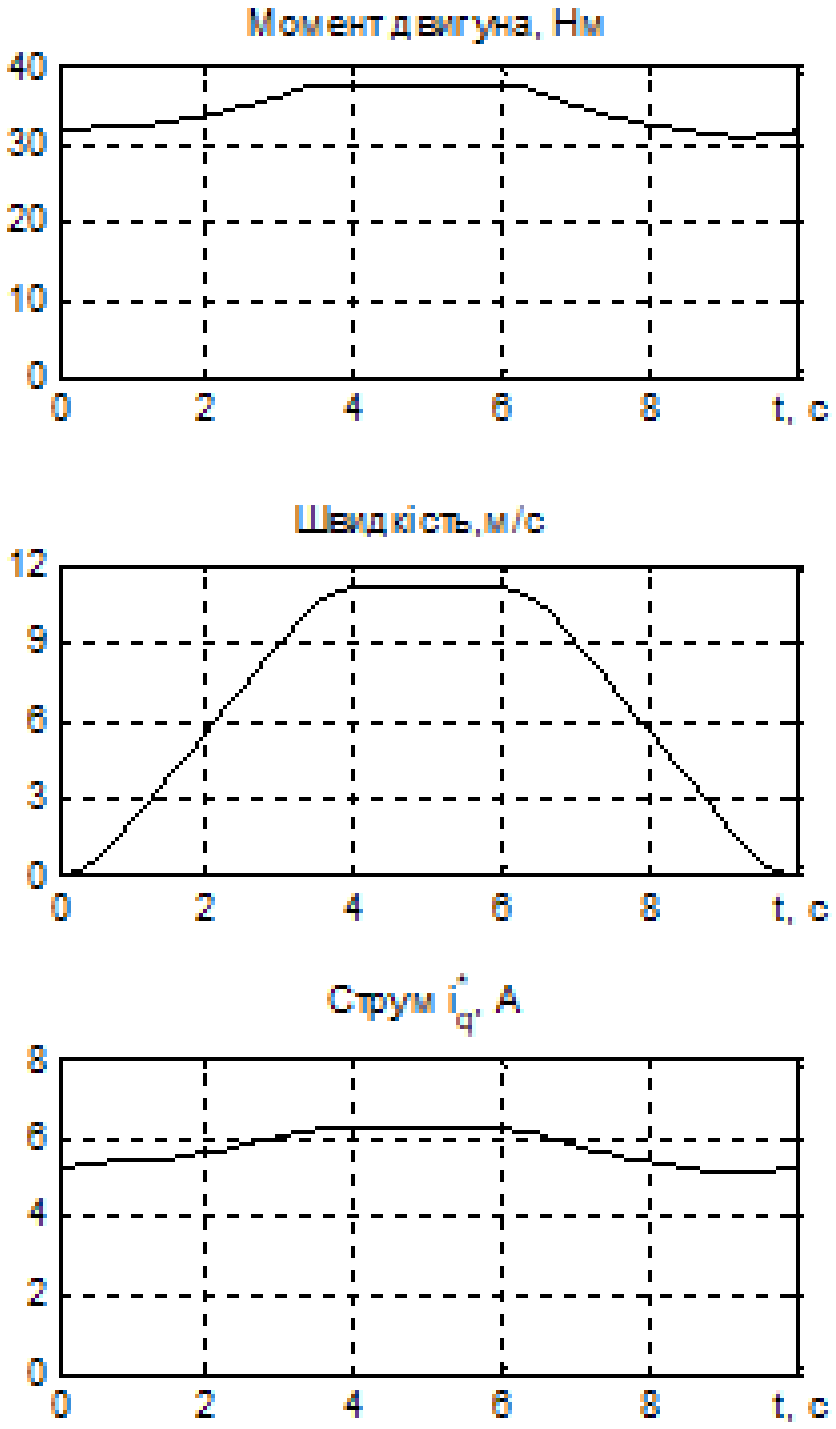

Рисунок 5.5 – Перехідні процеси

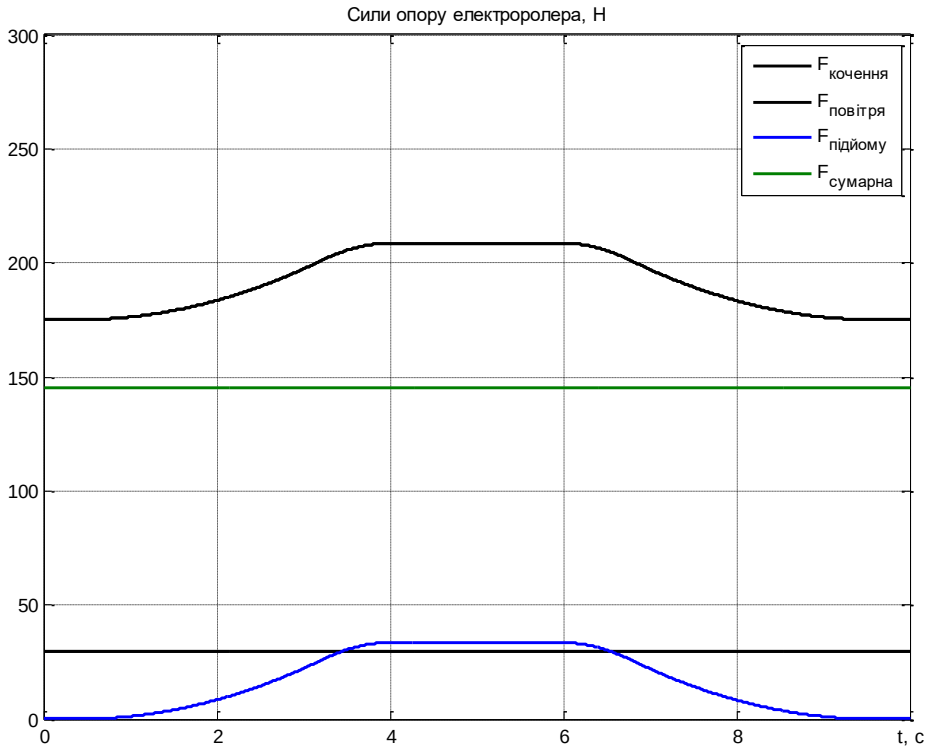

Рисунок 5.6 – Перехідні процеси а при $\omega = 62.14$ рад/с

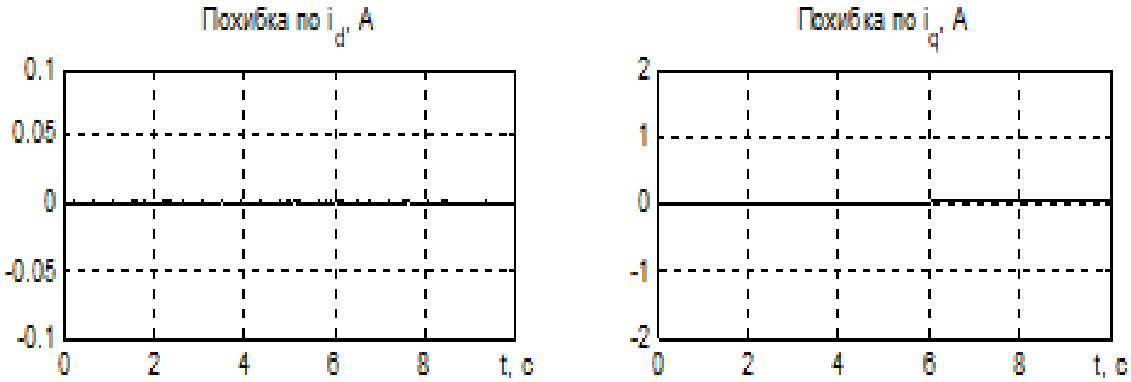

Рисунок 5.7 – Перехідні процеси

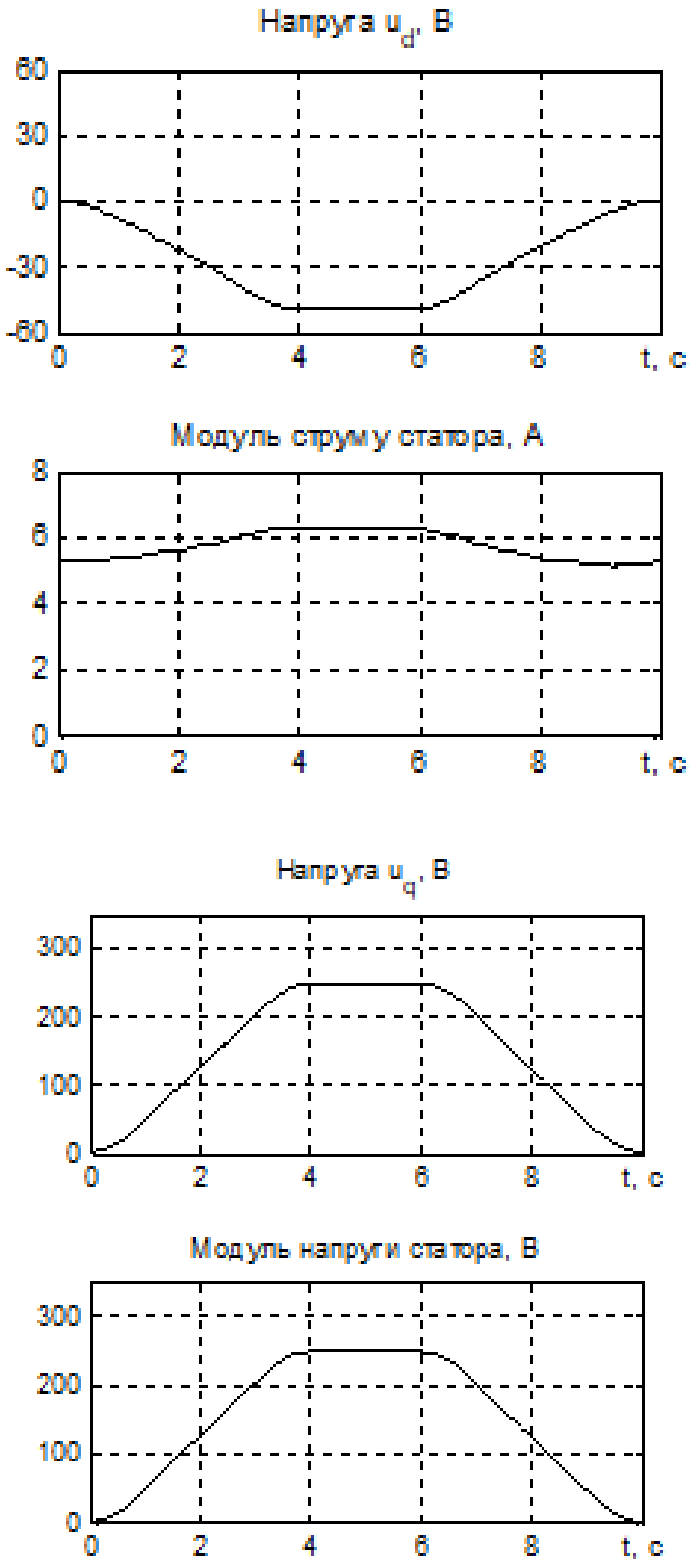

Рисунок 5.8 – Перехідні процеси

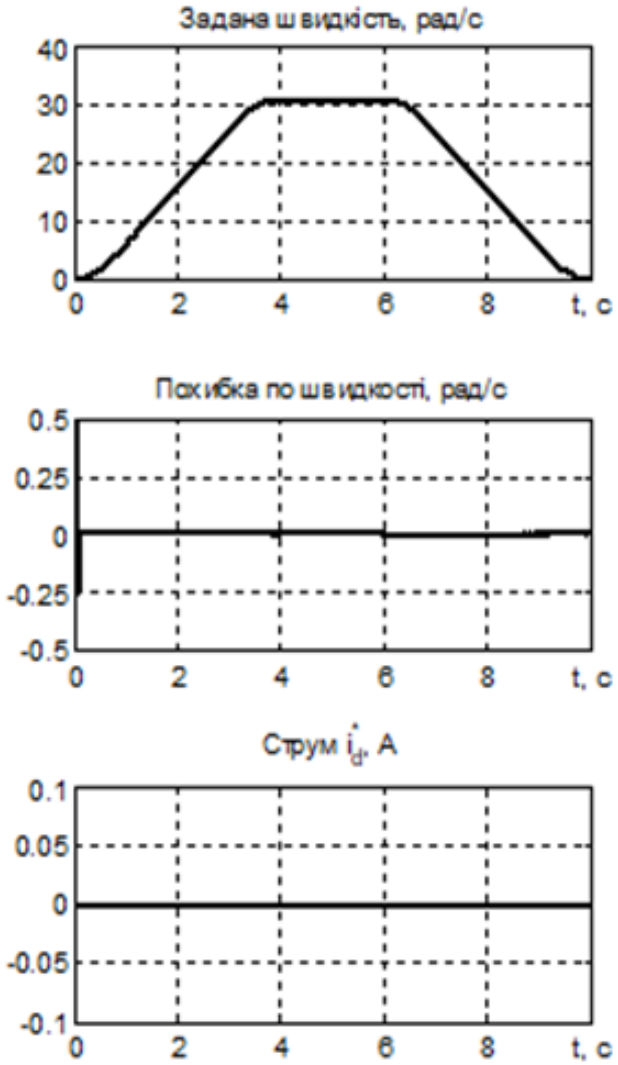

Рисунок 5.9 – Перехідні процеси

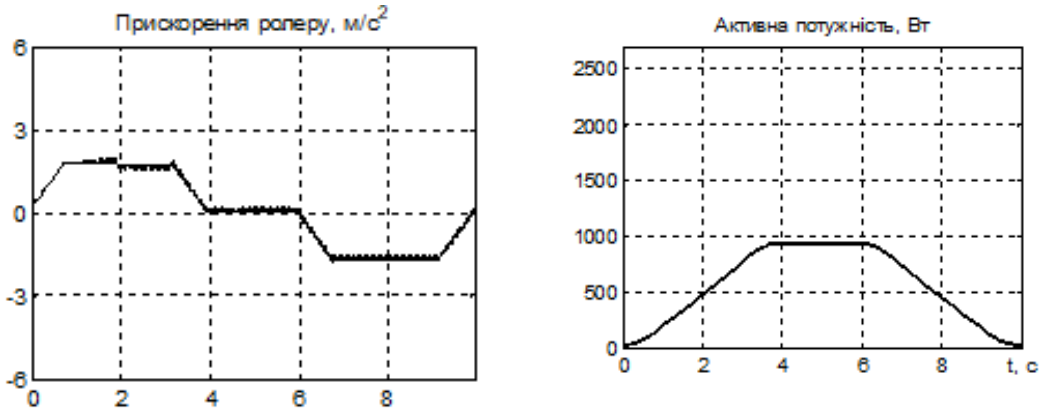

Рисунок 5.10 – Перехідні процеси

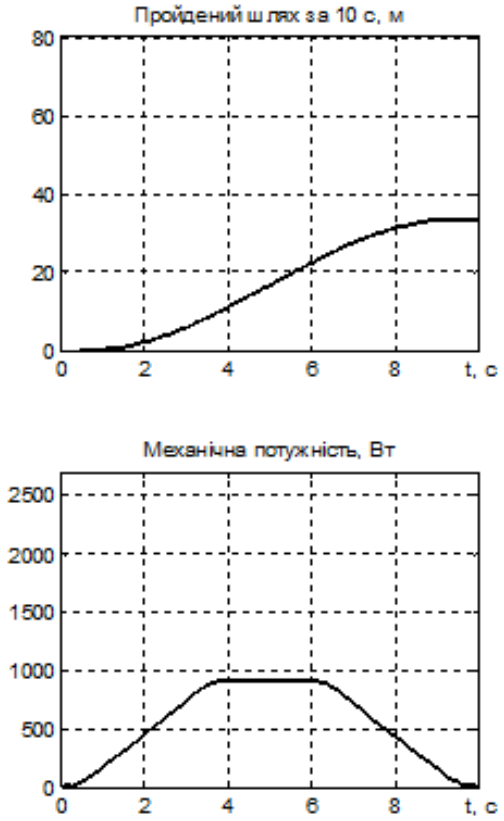

Рисунок 5.11 – Перехідні процеси

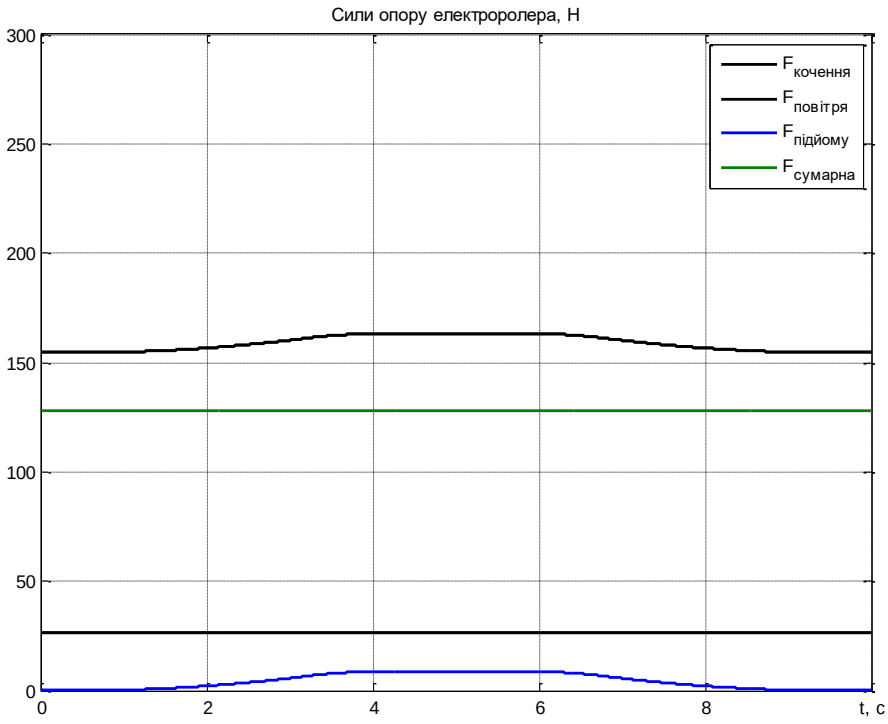

Рисунок 5.12 – Перехідні процеси при $\omega = 31.07$ рад/с

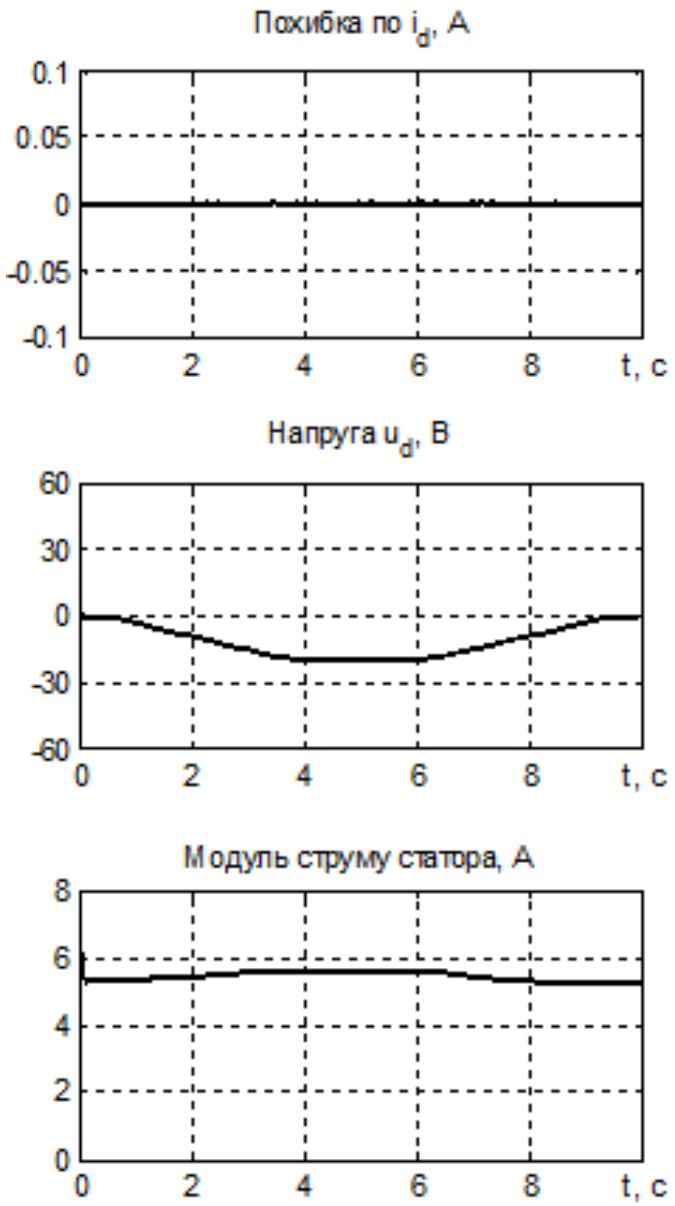

Рисунок 5.12 – Перехідні процеси

На основі проведеного чисельного моделювання перехідних процесів у системі векторного керування електроприводом електроролера, можна зробити висновок, що система ефективно відпрацьовує задану траєкторію зміни швидкості.

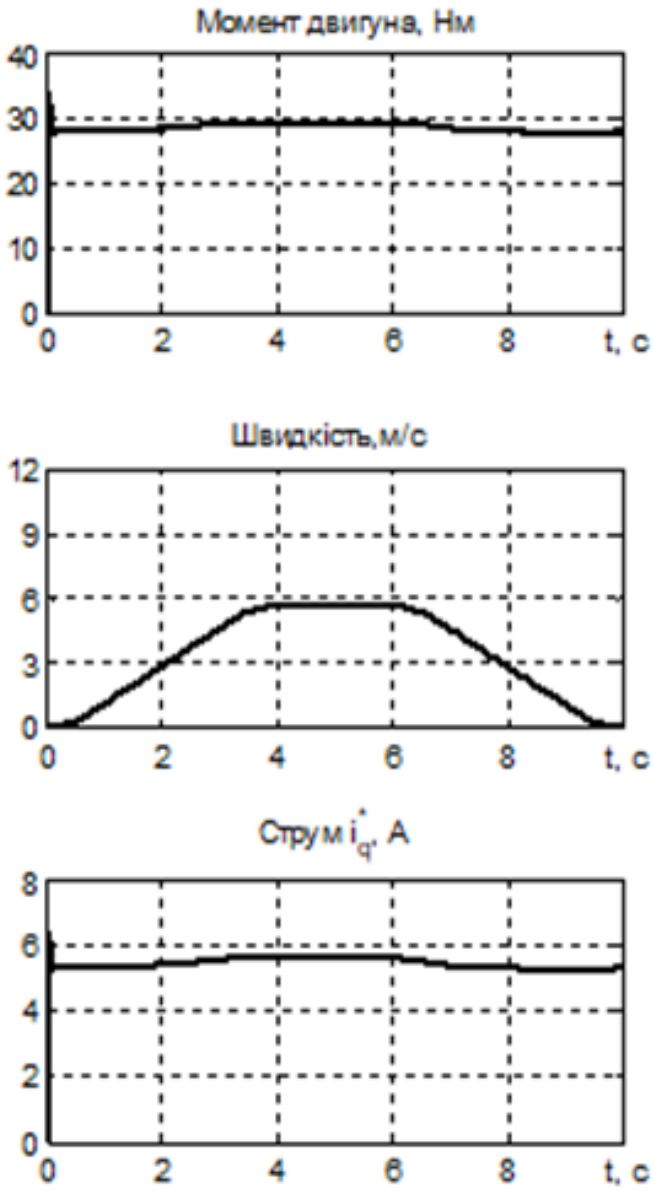

Рисунок 5.13 – Перехідні процеси

Графік миттєвої похибки по швидкості підтверджує точне слідування заданому профілю руху, що свідчить про належно налаштовані регулятори та стабільну роботу системи керування.

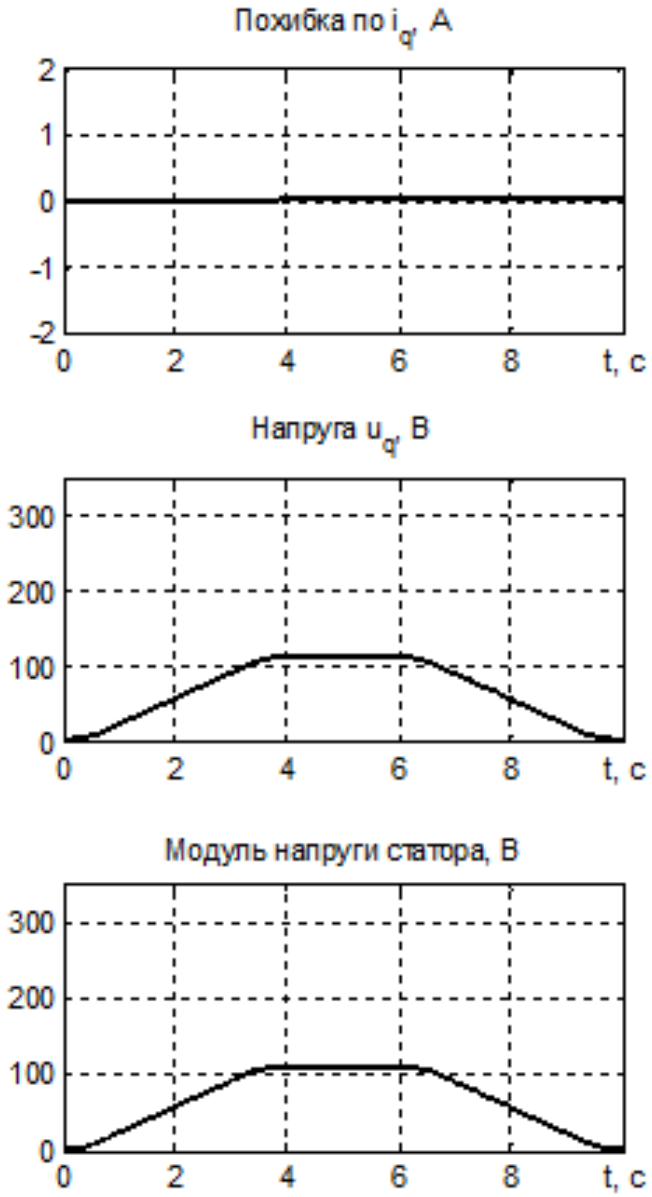

Рисунок 5.14 – Перехідні процеси

Для забезпечення сталого обертального моменту на встановленому режимі роботи електродвигуна потрібно прикладати момент, значення якого відповідає умовам рівномірного руху, з урахуванням всіх сил опору. Прискорення системи на фазах розгону та гальмування залишалося стабільним і відповідало заданим параметрам, що забезпечувало плавну зміну швидкості без коливань чи перевищення граничних значень [19].

Протягом 10 секунд експлуатації електроролер пройшов відстань у 67 метрів, що цілком узгоджується з теоретичними розрахунками. Активна

потужність електромеханічної системи при цьому склала приблизно 2.325 кВт, тоді як величина механічної потужності на валу двигуна становила 2.31 кВт, що вказує на високий ККД силової частини приводу.

Особливої уваги заслуговує той факт, що статична похибка у системі відсутня, що свідчить про ефективність реалізованої структури векторного керування у контурі швидкості.

Висновок

У результаті математичного моделювання системи векторного керування швидкістю синхронного електродвигуна було проведено дослідження динамічних характеристик роботи приводу. Отримані результати підтвердили теоретичні положення, зокрема щодо здатності системи забезпечувати асимптотичне слідування за заданим законом зміни швидкості.

Модель адекватно відтворює реальні процеси: під час моделювання було зафіксовано, що траєкторія зміни швидкості виконується із незначною динамічною похибкою, яка не перевищує 6 рад/с. Це свідчить про достатній рівень точності системи регулювання швидкості навіть за умов зміни зовнішніх навантажень або параметрів системи.

Контур регулювання струму також продемонстрував високі динамічні якості — відповідь по струму стабілізується асимптотично, з максимальною динамічною похибкою, що не перевищує 0.05 А. Така точність є свідченням ефективного налаштування ПІ-регуляторів струму в системі керування.

Крім того, результати моделювання підтвердили відповідність механічної потужності двигуна на номінальному режимі його паспортному значенню. Це ще раз підкреслює правильність вибору електродвигуна для розроблюваної електромеханічної системи та узгодженість його параметрів із розрахунковими навантаженнями системи.

ВИСНОВКИ

У процесі здійснення аналітичного огляду було виокремлено низку вагомих аргументів, що підтверджують перевагу електричного транспорту порівняно з класичними транспортними засобами, які функціонують на основі двигунів внутрішнього згоряння. Перш за все, електротранспорт вирізняється надзвичайно високим коефіцієнтом корисної дії, який у більшості випадків коливається в межах 85–95%. Це свідчить про мінімальні втрати енергії в процесі її перетворення у механічну роботу, що безпосередньо підвищує загальну енергоефективність системи.

Крім того, електричні силові установки мають спрощену конструкцію — у них відсутня велика кількість тертя та зносу, що властиво двигунам внутрішнього згоряння. Це сприяє не лише зниженню частоти обслуговування та витрат на ремонт, а й значному збільшенню ресурсу безвідмовної роботи електроприводу.

Ще одним суттєвим фактором, який визначає привабливість електричного транспорту, є його екологічна безпечність: у процесі експлуатації такі транспортні засоби не викидають у довкілля шкідливих речовин, зокрема CO_2, NO_x чи сажі. Це особливо важливо з огляду на сучасні глобальні тенденції щодо зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище, а також у контексті переходу до сталих форм мобільності.

У рамках реалізації алгоритму векторного керування швидкістю для синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ), була побудована математична модель системи, яка описується диференціальними рівняннями четвертого порядку. Структура цієї моделі враховує взаємодію між електромагнітними та механічними підсистемами електроприводу, що дозволяє комплексно оцінювати динамічні характеристики системи керування.

Для забезпечення ефективної реалізації векторного керування було здійснено синтез внутрішнього контуру регулювання струму у двох взаємно перпендикулярних осях (d та q). При цьому використовувалась методика

лінеаризації нелінійної математичної моделі СДПМ, що дало змогу застосувати класичні підходи до побудови ПІ-регуляторів з передбачуваними характеристиками у перехідних режимах.

Зовнішній контур, який відповідає за стабілізацію швидкості обертання ротора, був розділений у часовому масштабі з внутрішнім струмовим контуром. Це досягнуто шляхом відповідного підбору коефіцієнтів підсилення регуляторів, що забезпечило ієрархічну організацію контурів керування. Такий підхід дозволяє уникнути взаємного впливу між петлями керування і гарантує стійку роботу системи в умовах змінних навантажень та перехідних процесів.

Проведено детальний розрахунок основних сил опору, що виникають під час руху електричного ролера, а саме: сили аеродинамічного опору, сили тертя ковзання, сили опору коченню, сили опору підйому, а також інших чинників, що впливають на загальне опірне навантаження транспортного засобу. Особливу увагу приділено визначенню сили опору підйому, яка є найбільш значущою серед усіх опорів під час руху ролера по схилу або похилій ділянці дороги.

Після сумування всіх виявлених сил опору було розраховано необхідний крутний момент, який потрібно створити на валу електродвигуна, щоб забезпечити підтримку заданої швидкості руху при подоланні опорів. Виконані розрахунки моменту в поєднанні з обраною швидкістю руху дали змогу обґрунтувати вибір двигуна за потужністю та моментом.

Зокрема, для забезпечення стабільної роботи електроролера було обрано електродвигун з номінальною потужністю 2,8 кВт і номінальним крутним моментом 38 Н·м. Цей вибір гарантує достатній запас потужності для подолання всіх розрахованих сил опору та ефективне забезпечення необхідних динамічних характеристик електричного транспортного засобу в різних режимах руху.

У роботі, також дослідженню динамічних характеристик синхронного двигуна, було проведено математичне моделювання алгоритму керування швидкістю. Результати моделювання підтвердили, що відпрацювання заданої траєкторії швидкості відбувається асимптотично, із максимальною динамічною

похибкою близько 6 рад/с. Це свідчить про високу точність і стабільність системи керування швидкістю при реалізації заданих режимів руху.

Додатково було проаналізовано роботу регуляторів струму по осях d та q, які також демонструють асимптотичне відпрацювання з динамічною похибкою приблизно 0,05 А. Такий рівень точності забезпечує стабільність електромеханічної системи та ефективне керування електродвигуном.

Механічна потужність, яка досягається на номінальній швидкості обертання двигуна, відповідає потужності, обраній для синхронного двигуна в проекті. Це підтверджує правильність вибору двигуна і його відповідність заданим експлуатаційним характеристикам.