

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 регулювання положення із векторно-
керуваним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором»

Виконав(ла)

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

Микола КОТЛЯРОВ
(ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Керівник роботи

к.т.н., доц. Борис КОБИЛЯНСЬКИЙ
(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.	10
2	ПОТУЖНІСТЬ ДВИГУНА	21
3	МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	35
4	ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ	58
	Висновки	65
	Список використаних джерел	67
	Додатки	69

					ЕМКС 122003 000 ПЗ			
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Електро система регулювання положення із векторно- керованим асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором	Літ.	Арк.	Аркуші
Розроб.		Котляров М.А.				6		
Перевір.		Кобилянський Б.				БННППІ ХНУ ім. В.Н. Каразіна БД-Е21		
Т. контр.								
Н. Контр.		Кобилянський Б.						
Затверд.		Кузнецов Б.І.						

ВСТУП

Однією з ключових проблем, що стоять перед сучасною теорією та практикою побудови електромеханічних систем автоматичного керування, є забезпечення високої точності функціонування в умовах дії інтенсивних керуючих сигналів і широкого спектра збурювальних впливів. Зростаючі вимоги до точності та стабільності систем керування ускладнюються цілим рядом факторів. Одним з найсуттєвіших є обмеження, що накладаються недосконалістю механічних передач, які з'єднують виконавчий електродвигун із кінцевим виконавчим механізмом [1].

Зокрема, ці недоліки трансмісійних елементів призводять до зміщення межі пропускну здатності системи управління у зону, де можуть проявлятися резонансні частоти власних механічних коливань об'єкта. До того ж, такі коливання виникають не лише в механізмах із жорстким зчепленням, але й у системах з пружними зв'язками, що з'єднують вал електродвигуна, вихід редуктора і робочий орган.

У подібних ситуаціях стає недостатнім застосування спрощеної одномасової моделі типу "двигун – навантаження". Для адекватного опису динаміки системи необхідно враховувати пружні деформації, інерційні характеристики окремих вузлів і використовувати складніші багатомасові математичні моделі – двох-, трьох- або навіть більше масових структур. Це суттєво впливає на розробку систем керування, вимагаючи застосування спеціалізованих регуляторів, які здатні компенсувати пружні коливання та забезпечувати стійку роботу в широкому частотному діапазоні [2].

Окрім того, серйозним ускладненням при побудові адекватних математичних моделей і алгоритмів керування є наявність нелінійних ефектів. Один із найпоширеніших – це нелінійна залежність сил тертя, які виникають у точках контакту рухомих частин, від швидкості відносного переміщення. Наприклад, у механізмах обробки матеріалів спостерігається зміна моменту тертя

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
						7
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в залежності від швидкості ковзання робочого органу, що суттєво ускладнює завдання компенсації збурень і знижує точність відпрацювання керуючих дій.

Таким чином, для побудови високоточних електромеханічних систем необхідно враховувати комплекс факторів: еластичність трансмісії, інерційні характеристики окремих вузлів, резонансні явища, а також нелінійності механічних впливів. Все це зумовлює підвищені вимоги до якості математичного моделювання, методів аналізу й синтезу систем керування, а також до обчислювальних засобів, що реалізують ці алгоритми в реальному часі [3].

Подібна нелінійна залежність моменту тертя від швидкості особливо яскраво проявляється в умовах повільного (повзучого) руху виконавчого механізму, що є характерним для багатьох технологічних процесів. У цих режимах навіть незначні варіації швидкості або навантаження можуть істотно впливати на поведінку всієї електромеханічної системи. Залежно від конструкції та призначення конкретного обладнання, робота в режимі низьких швидкостей може вважатися або штатною (нормальною), або, навпаки, перебувати за межами допустимого експлуатаційного режиму, тобто бути потенційно аварійною [4].

Ситуація ще більше ускладнюється у випадках, коли одночасно присутні пружні елементи в механічній структурі передачі (наприклад, муфти, гнучкі з'єднання, еластичні вали) та система функціонує на спадній ділянці характеристики зовнішнього тертя. В таких умовах виникає реальна небезпека розвитку автоколивальних процесів. Це можуть бути як незатухаючі, так і розбалансовані механічні коливання, що з часом посилюються - особливо в разі резонансної взаємодії між частотами збудження та власними частотами пружної системи. З технічної точки зору, такі коливання є вкрай небажаними: вони призводять до підвищеного зносу деталей, зниження точності позиціонування виконавчих органів, нестабільності в роботі приводу і можуть викликати передчасні відмови окремих вузлів. Крім того, у системах із замкненими контурами управління виникають труднощі в реалізації точного регулювання,

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оскільки зворотний зв'язок не завжди в змозі адекватно компенсувати коливальні збурення, породжені внутрішніми нелінійностями.

Тому аналіз та врахування поведінки електромеханічної системи в зоні низьких швидкостей, особливо за наявності пружних ланок і фрикційних взаємодій, є надзвичайно важливим для забезпечення стабільності, надійності та довговічності її функціонування [3].

Крім класичних параметрів динаміки, сучасні системи керування повинні також демонструвати високу точність у процесі стеження за задавальними впливами або стабілізації на певному рівні. З цією метою часто встановлюються обмеження на максимально допустиму дисперсію помилки – особливо в умовах випадкових або шумоподібних сигналів, що задають або обурюють. Таким чином, система має бути здатною не лише точно відтворювати бажаний профіль руху, а й ефективно придушувати зовнішні збурення, не виходячи за допустимі межі контрольованих параметрів і керуючих сигналів [4]. Ще одним важливим критерієм є здатність системи реагувати на періодичні сигнали, зокрема гармонійної природи. У подібних випадках вимагається, щоб при подачі вхідних впливів певної (або кількох) частот система забезпечувала відповідну якість роботи – наприклад, точне стеження без затримок чи надмірних фазових зсувів. Іноді вимоги поширюються не лише на фіксовані частоти, а й на цілий спектр або діапазон робочих частот, у межах якого система повинна відповідати певним умовам – таким як допустимі значення амплітудно-частотної характеристики, фазового зсуву або швидкодії [3].

Таким чином, проектування та аналіз багатомасових систем керування неможливе без урахування всіх зазначених факторів, що в сукупності визначають її здатність стабільно та точно функціонувати в широкому діапазоні технічних і експлуатаційних умов.

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						9
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Історія винайдення ескалатора бере свій початок наприкінці ХІХ століття. 15 березня 1892 року американський інженер і винахідник Джесс Рено отримав патент на пристрій, що став прообразом сучасного ескалатора. Перший функціональний зразок цього механізму був встановлений у 1894 році на території популярного на той час парку розваг Коні-Айленд у Нью-Йорку. Він слугував радше як розважальний елемент для відвідувачів і мав конструкцію у вигляді плавної похилої рухомої платформи без виділених сходинок [4].

Подальша еволюція конструкції механізованих підйомних пристроїв відбулася на зламі ХІХ і ХХ століть. Значною віхою в цьому процесі стала Всесвітня виставка 1900 року, що проходила в Парижі, де було презентовано перший повністю функціональний зразок сучасного ескалатора з шаблевим принципом дії. Його розробка стала результатом співпраці американської компанії *Otis Elevator Company* із талановитим інженером-дизайнером Чарльзом Зібергером. Запропонована модель докорінно відрізнялася від попередніх прототипів: у ній застосовувалась система горизонтальних рухомих шаблів, які послідовно виринали з підлогової платформи у зоні посадки [5].

Початок використання ескалаторів у Радянському Союзі припадає на 1935 рік, коли було урочисто відкрито першу лінію Московського метрополітену. Саме тоді у підземці з'явилися перші 15 автоматичних підйомних пристроїв, виготовлених за проектами радянських інженерів на базі промислових підприємств «Червоний металіст» і «Підйомник». На той час було розроблено два типи механізмів: експериментальна модель Э-1 та серійна версія Н-30. Модель Э-1 не була оснащена синхронізованими поручнями та внаслідок цього не отримала широкого впровадження через низку конструктивних недоліків. Натомість ескалатор типу Н-30, створений на основі креслень конструктора С. П. Казьміна, став передовим прикладом інженерного досягнення. Його технічні характеристики значно перевершували аналоги того часу: Н-30 вирізнявся

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

високою потужністю, великою довжиною траси та надійністю в експлуатації, що зробило його одним із найефективніших рішень у світовій практиці на той момент [4].

У проміжку між 1973 і 1975 роками фахівці Спеціального конструкторського бюро, що спеціалізувалося на створенні ескалаторного обладнання (СКБЕ), реалізували масштабний проєкт з розробки вдосконаленої серії тунельних ескалаторів нового покоління. Ці агрегати отримали позначення типу ЕТ і включали п'ять основних модифікацій - від першої до п'ятої. Нові конструктивні рішення дозволили значно підвищити ефективність вертикального транспорту в умовах глибокого залягання станцій метрополітену - ескалатори типу ЕТ могли забезпечувати підйом на висоту до 65 метрів, що на той момент було технічно складним завданням.

Завдяки поєднанню технічної надійності, простоти обслуговування та адаптації до складних геологічних умов підземної інфраструктури, ці моделі швидко стали основним рішенням для новобудов метрополітенів. У Києві саме ескалатори типу ЕТ різних модифікацій були встановлені майже на кожній другій станції, що функціонує у складі міського метрополітену. Ба більше, ці пристрої не лише зберегли свою експлуатаційну придатність, а й продовжують активно використовуватися донині, демонструючи високу довговічність та адаптивність до сучасних вимог [4].

У 2004 році вітчизняна промисловість зробила вагомий крок у напрямку локалізації виробництва підйомно-транспортного обладнання - саме тоді в експлуатацію було введено перший ескалатор українського виробництва типу ЕТК-245. Цей механізм, виготовлений на базі потужностей ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук), був встановлений на станції київського метрополітену «Сирець». Подія стала знаковою, оскільки вона ознаменувала початок застосування сучасних транспортних рішень національного виробництва у стратегічно важливих об'єктах міської інфраструктури [4].

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Подальше серійне виробництво призвело до появи ескалаторів серії ЕТК-215, які були встановлені на нових виходах станцій «Лісова» та «Дарниця». Ці агрегати відповідають найвищим стандартам безпеки, надійності та ергономіки. Серед основних технічних характеристик варто виділити балюстради, виготовлені з корозійностійкої (іржостійкої) сталі, що забезпечує тривалий термін служби навіть за інтенсивної експлуатації у вологому підземному середовищі. Ширина сходиноквого полотна складає 1000 мм, що дозволяє ефективно транспортувати великі потоки пасажирів. Швидкість руху ескалатора становить 0,75 метра за секунду - це оптимальне значення з точки зору як енергоспоживання, так і зручності для користувачів. Конструкція ескалаторів ЕТК-215 є результатом тривалого періоду науково-дослідної та інженерної роботи у галузі тунельного ескалаторобудування. Вона поєднує кращі вітчизняні традиції проектування машин безперервної дії та адаптована до вимог сучасної урбаністичної інфраструктури. За своєю суттю, ця техніка стала продовженням еволюційної лінії українського машинобудування, що не має прямих аналогів у закордонних виробників у контексті масштабності, ресурсу та умов експлуатації у глибоких тунельних системах [4].

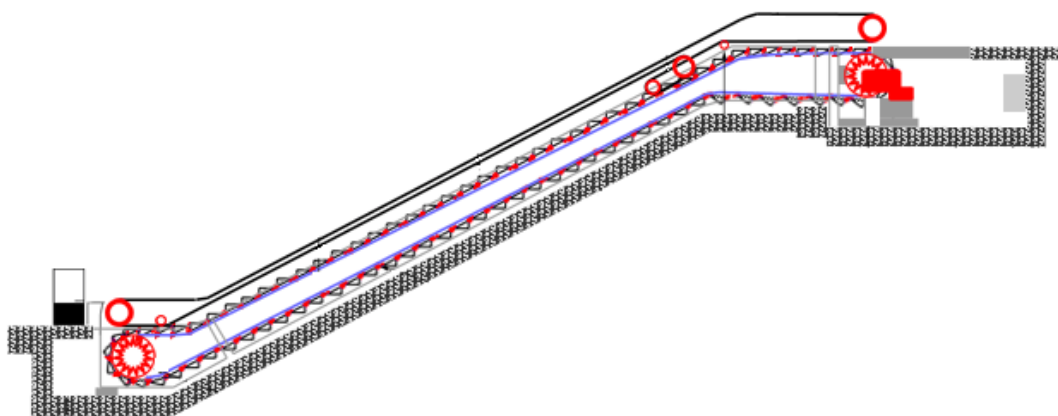


Рисунок 1.1 - Загальний вигляд

Сучасний ескалатор являє собою високотехнологічну систему, що поєднує в собі елементи електротехніки, механіки та автоматизованого управління.

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Структурно кожна стрічка ескалатора виконує функцію незалежної модульної одиниці, в якій понад 50% компонентів мають динамічний (рухомий) характер. Це обумовлює високі вимоги до якості виготовлення, надійності вузлів і безпеки експлуатації [4].

Основу конструкції становить жорстка металева рама (несуча база), виготовлена зі зварених сталевих елементів, що забезпечує необхідну міцність і геометричну стабільність у процесі експлуатації. Уздовж внутрішньої частини каркаса проходять напрямні рейки, якими переміщуються з'єднані в кільцевий контур сходинок. Кожна сходинка має характерну трапецієподібну форму в поперечному перерізі, що дозволяє їй ефективно "вписуватися" у криволінійний контур руху та формувати безперервну стрічку під час руху ескалатора [5].

Тягові ланцюги приводяться в рух за допомогою масивних ведучих зірочок, які встановлюються у верхній частині ескалаторного тунелю - у так званому машинному відсіку. Діаметр кожної зірочки може сягати 1,5 метра, і вона безпосередньо взаємодіє з тяговим ланцюгом. Передача обертового моменту здійснюється від електродвигуна через редукторний механізм, який оптимізує крутний момент та швидкість. Для кожної стрічки встановлюється окремий привід, що забезпечує незалежне керування напрямком і динамікою руху.

Крім того, у машинному відділенні розміщується керуюча електроніка: пульти диспетчерського контролю, системи електроживлення, захисна автоматика та діагностичне обладнання. Саме звідси оператори можуть здійснювати запуск, зупинку, зміну напрямку руху, контроль параметрів роботи та виявлення відхилень у режимах функціонування.

Незважаючи на обмежену гнучкість у налаштуваннях, двошвидкісні приводи залишаються ефективним рішенням для задач, де повноцінне частотне регулювання не є критично необхідним, проте бажана наявність економного або зниженого режиму роботи [6].

У конструкції двошвидкісних асинхронних електродвигунів, що використовуються в системах приводу ескалаторів, застосовуються фіксовані

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

співвідношення чисел полюсів, які визначають відповідні швидкісні режими обертання ротора. Найбільш поширеними комбінаціями полюсів є [4]:

- 6:18, що забезпечує чергування між 1000 об/хв (при шести полюсах) та 333 об/хв (при вісімнадцяти полюсах);
- 6:24, відповідно — між 1000 об/хв та 250 об/хв;
- 4:16, із режимами 1500 об/хв та 375 об/хв;
- 4:24, які забезпечують роботу з частотами обертання 1500 об/хв та 250 об/хв.

Ці співвідношення дають змогу реалізувати суттєво різні швидкісні діапазони, що дозволяє адаптувати привід до різних експлуатаційних сценаріїв: як стандартного режиму перевезення пасажирів, так і економного — у періоди низького пасажиропотоку.

Зазначені параметри досягаються за рахунок вбудованих у статор окремих обмоток для кожного режиму, перемикання між якими відбувається електромеханічним способом. При цьому зміна числа полюсів прямо впливає на синхронну швидкість обертання відповідно до виразу:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P}$$

де n_s — синхронна швидкість (об/хв), f — частота мережі живлення (Гц), P — число полюсів.

Починаючи з середини 1980-х років, широкого поширення набули електропривідні системи, що реалізують регулювання швидкості асинхронних двигунів шляхом зміни прикладеної до статора напруги. Сутність цього підходу полягає в прямому управлінні амплітудою напруги живлення без зміни її частоти. У таких системах ключову роль відіграє тиристорний комутатор, який складається з трьох пар антипаралельно з'єднаних тиристорів (по одній парі на кожну фазу) [4].

									Арк.
									14
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЕМКС 122003 000 ПЗ				

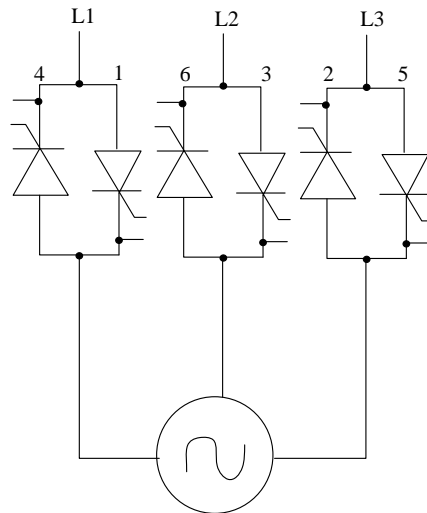


Рисунок 1.3 - Схема підключення

У випадку, коли напруга, що подається на статор асинхронного двигуна, знижується, відповідно зменшується й величина створюваного ним електромагнітного моменту. Така динаміка особливо помітна в системах із простим регулюванням напруги, де частота живлення залишається сталою.

У режимах понижених швидкостей, коли двигун функціонує з глибоким ковзанням, система управління змушена збільшувати кут відкриття тиристорів для підтримання необхідної потужності. Однак це супроводжується підвищеним рівнем гармонічних викривлень у формі напруги живлення, що зумовлює появу вищих гармонік [4].

Крім того, за рахунок втрати ефективності перетворення енергії та додаткового нагрівання, відбувається помітне зниження загального коефіцієнта корисної дії (ККД) електропривідної системи. У таких умовах виникає потреба у встановленні посиленої системи охолодження для електродвигуна, що тягне за собою додаткові витрати на обладнання та енергоресурси.

Отже, хоча системи з регулюванням напруги є технологічно простими та економічно привабливими для обмеженого кола завдань, їх використання на низьких швидкостях вимагає ретельного врахування побічних ефектів - зростання теплових навантажень, погіршення енергетичної ефективності та підвищеного зносу обладнання [5].

У практиці експлуатації ескалаторних систем, зокрема в європейських країнах, широке поширення отримав метод керування, який дає змогу реалізувати ефективне електродинамічне гальмування за допомогою низькошвидкісної обмотки асинхронного електродвигуна. Цей підхід базується на застосуванні спеціальних двигунів із подвійною конструкцією ротора - так званою «подвійною білковою кліткою» (double squirrel-cage motor).

Суть методу полягає у поетапному керуванні обмотками, кожна з яких відповідає за певний діапазон частоти обертання. Високошвидкісна обмотка, яка забезпечує номінальну швидкість обертання (наприклад, 1500 об/хв), підключається до трифазної мережі через керований регулятор струму, що дає змогу регулювати кут відкривання тиристорів та, відповідно, напругу на статорі. Низькошвидкісна обмотка (наприклад, на 375 або 250 об/хв) отримує живлення від окремого випрямного моста, який формує ланцюг постійного струму [4].

Під час прискорення обертовий момент створюється саме обмоткою високої швидкості. Завдяки можливості плавного регулювання поданої напруги за допомогою тиристорного змінного напругового регулятора (ТЗН), формується необхідна крива залежності моменту від швидкості, яка відповідає вимогам до плавного старту.

У фазі уповільнення (гальмування) ескалатора ключову роль відіграє низькошвидкісна обмотка, яка живиться вже від джерела постійного струму. Такий режим створює активний гальмівний момент, що забезпечує контрольоване зниження швидкості без застосування додаткових механічних гальмівних пристроїв [6].

Окремою перевагою цієї системи є її здатність компенсувати змінне навантаження, що виникає внаслідок нерівномірного пасажиропотоку. Завдяки можливості змінювати напругу живлення в режимах як розгону, так і гальмування, стає можливим повністю або частково відмовитися від додаткових інерційних мас, що використовуються в традиційних приводах для забезпечення плавності ходу.

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Таким чином, така система дозволяє не тільки покращити енергетичну ефективність приводу ескалатора, але й суттєво підвищити комфорт та безпеку пасажирів при зміні динаміки руху.

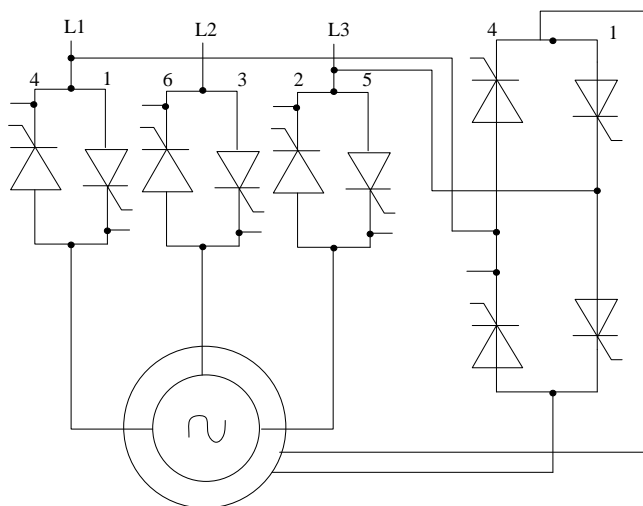


Рисунок 1.4 - Схема підключення

Системи регулювання, що реалізують зміну як напруги, так і частоти живлення, будуються на основі асинхронного електродвигуна, підключеного до частотного перетворювача (інвертора). Така конфігурація дозволяє реалізувати безперервне керування швидкістю обертання двигуна шляхом пропорційної зміни частоти та амплітуди поданої напруги. У найпростішому вигляді функціональна структура цієї системи включає блок керування, випрямляч змінного струму, ланку постійного струму, інверторний модуль, а також зворотний зв'язок, що забезпечує стабільність параметрів керування [7].

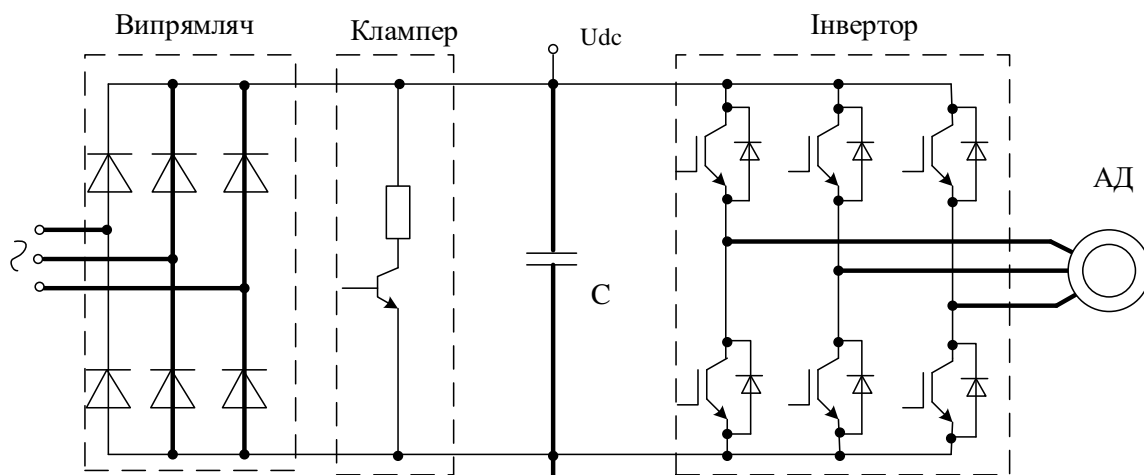


Рисунок 1.5 - Перетворювач

У системах електроприводу з використанням частотно-регульованих інверторів сучасного типу, асинхронні електродвигуни здатні забезпечувати стабільне значення крутного моменту в широкому діапазоні швидкостей обертання. Це стало можливим завдяки використанню технології змінної частоти живлення, що генерується електронним інвертором. Такий тип керування дозволяє гнучко регулювати як частоту, так і напругу, що подається на обмотки статора, що забезпечує оптимальне керування динамічними режимами роботи приводу.

Крім того, при зниженні частоти до дуже малих значень суттєво погіршується природна вентиляція двигуна, особливо якщо охолодження реалізовано за допомогою вбудованого вентилятора, швидкість обертання якого пропорційна швидкості вала. Це вимагає застосування зовнішніх вентиляторів або спеціальних конструктивних рішень для ефективного тепловідведення в умовах низькошвидкісної роботи [5].

У підсумку, хоча системи з регулюванням частоти забезпечують високий рівень керованості та гнучкість у роботі електромеханічного обладнання, їх практична реалізація вимагає врахування ряду факторів, пов'язаних з якістю електроенергії, тепловими режимами та довговічністю елементів системи [4].

Для сучасних ескалаторів ключовими критеріями ефективності їх функціонування є досягнення визначеної пропускної здатності, гарантоване забезпечення безпечного переміщення пасажирів, стабільна й безвідмовна експлуатація впродовж усього терміну служби, високий рівень зручності для користувачів під час транспортування, а також економне використання електроенергії в процесі роботи.

Для забезпечення високого рівня експлуатаційної безпеки сучасних ескалаторних установок передбачено впровадження комплексної системи блокувальних та захисних механізмів, які включають як механічні, так і електронні компоненти. Такі заходи дозволяють запобігати виникненню аварійних ситуацій, забезпечують надійне функціонування пристрою і мінімізують ризики для користувачів [7].

У разі, якщо один із вищевказаних захистів або блокувань спрацює до запуску механізму, система керування не формує дозволу на початок руху. Якщо ж аварійне спрацювання трапляється в процесі функціонування ескалатора, то система миттєво генерує сигнал на екстрене аварійне зупинення, чим гарантує оперативне припинення транспортування для запобігання розвитку небезпечної ситуації.

Сучасна система керування ескалатором повинна забезпечувати безперервний моніторинг та стабільне регулювання всіх режимів його роботи - як при підйомі, так і при спуску пасажирів. Вона зобов'язана підтримувати встановлену швидкість руху полотна відповідно до заданих параметрів, обмежуючи значення прискорення і динамічних ривків у фазах пуску та зупинки. У разі виникнення нештатної ситуації або спрацювання будь-якої з систем захисту, керуюча логіка має ініціювати контрольоване гальмування з плавною зупинкою механізму, щоб уникнути травмонебезпечних наслідків та забезпечити максимально комфортне завершення транспортного циклу.

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

2 ПОТУЖНІСТЬ ДВИГУНА

У подальшому викладається обчислення ряду ключових параметрів, необхідних для точного проектування та аналізу роботи ескалаторної системи.

Серед розрахункових величин визначаються наступні [5]:

- Еквівалентний (приведений) радіус, що враховується для переходу від поступального до обертального руху елементів механізму;
- Кутова швидкість електродвигуна, яка визначається залежно від конструктивних характеристик приводу та передаточного числа;
- Лінійне навантаження на один метр довжини стрічки, що враховує масу пасажирів та самої конструкції ескалатора;
- Повна довжина стрічкового полотна, з урахуванням геометричних параметрів нахилу та висоти підйому;
- Сумарне навантаження на стрічку, що включає вагу конструкції, вагу пасажирів, та додаткові силові впливи;
- Статичний момент навантаження, який виникає при сталому русі без урахування інерційних сил;
- Максимальний момент навантаження, що враховує пікові навантаження під час пуску або при перевантаженні;
- Розрахункова механічна потужність електродвигуна, необхідна для ефективного функціонування системи;
- Сила тертя у напрямних та підшипниках, що створює додаткове навантаження на привід;
- Загальна сила опору руху, яка складається з сил тертя, гравітаційного опору та сил інерції.

Кожен з перелічених параметрів є критичним для точного вибору електромеханічного обладнання та забезпечення надійної роботи транспортного засобу неперервної дії [6].

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
						21
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\rho_{\Sigma} = \frac{D_{\text{нач}}}{2i_{\Sigma}} = \frac{1.2}{2 \cdot 58.1} = 0.01 \text{ м}$$

$$\omega_{\text{об}} = \frac{v}{\rho_{\Sigma}} = \frac{0.75}{0.01} = 75 \text{ с}^{-1}$$

$$F_{\text{п.м.}} = G \cdot \sin \alpha = \frac{1650}{2} = 825 \text{ Н}$$

$$l = \frac{H}{\sin \alpha} = \frac{55}{0.5} = 110 \text{ м}$$

$$F_{\Sigma} = F_{\text{п.м.}} \cdot l = 825 \cdot 110 = 90750 \text{ Н}$$

$$M_c = F_{\Sigma} \rho_{\Sigma} = 90750 \cdot 0.01 = 907.5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{max}} = M_c = 907.5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$P_{\text{об}} = k_3 M_c \omega_{\text{об}} = 1.3 \cdot 907.5 \cdot 75 = 88.5 \text{ кВт}$$

$$n = \frac{30 \omega_{\text{об}}}{\pi} = \frac{30 \cdot 75}{3.14} = 716.6 \text{ об / хв}$$

$$F_{\text{ТР}} = k \cdot v = 6800 \cdot 0.75 = 5100 \text{ Н}$$

$$F_{\text{оп}} = F_{\Sigma} - F_{\text{ТР}} = 97050 - 5100 = 91950 \text{ Н}$$

Здійснюється детальний розрахунок параметрів, які характеризують роботу електродвигуна в умовах його номінального режиму - тобто при встановлених виробником стандартних навантаженнях та експлуатаційних умовах. Обчислення

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
						22
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

охоплюють широкий спектр характеристик, що забезпечують повне уявлення про функціональні можливості приводу. Зокрема, розглядаються наступні величини [6]:

- Кутова швидкість вектора напруги статора - ця характеристика визначає частоту обертання електромагнітного поля в обмотках статора, що безпосередньо впливає на робочий режим двигуна;
- Швидкість ідеального холостого ходу (х.х.) - показник, за якого ротор обертається без механічного навантаження, лише під впливом створеного магнітного поля;
- Номінальна механічна швидкість обертання ротора, що задається конструктивно та відповідає оптимальним умовам роботи машини;
- Номінальне значення обертового моменту, яке забезпечується двигуном у звичайних умовах експлуатації;
- Критичний момент (максимальний), що розраховується на основі перевантажувальної здатності двигуна згідно з технічним паспортом або каталогом виробника - він визначає межу допустимого навантаження без втрати стабільної роботи;
- Номінальна фазна напруга, яка подається на одну з фаз обмотки статора;
- Діюче значення фазного струму в умовах номінального навантаження, яке використовується при визначенні теплових та енергетичних параметрів;
- Потокозчеплення в номінальному режимі - важливий електромагнітний параметр, який відображає взаємодію магнітного поля з обмотками та впливає на формування моменту.

Комплексна оцінка перелічених характеристик дозволяє не лише підтвердити коректність вибору електродвигуна, а й закласти основу для точного

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						23
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

математичного моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink, а також для подальших розрахунків динаміки, навантаження і регулювання [7].

$$\omega_0 = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ рад / с}$$

$$\omega_{x.x.} = \frac{\omega_0}{p_n} = \frac{314}{4} = 78.5 \text{ рад / с}$$

$$\omega_H = \omega_{x.x.} (1 - s_H) = 78.5 \cdot (1 - 0.015) = 77.323 \text{ рад / с}$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{90000}{77.323} = 1163.949 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_K = \lambda \cdot M_H = 2.3 \cdot 1163.949 = 2677.083 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$U_{1\phi H} = U_{1ЛН} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В}$$

$$I_{1\phi H} = \frac{P_{2H}}{3 \cdot U_{1\phi H} \cdot \eta \cdot \cos(\varphi)} = \frac{90000}{3 \cdot 220 \cdot 0.93 \cdot 0.85} = 172.503 \text{ А}$$

$$\psi_H = \sqrt{2} \cdot U_{1\phi H} / \omega_0 = 311 / 314 = 0.987 \text{ Вб}$$

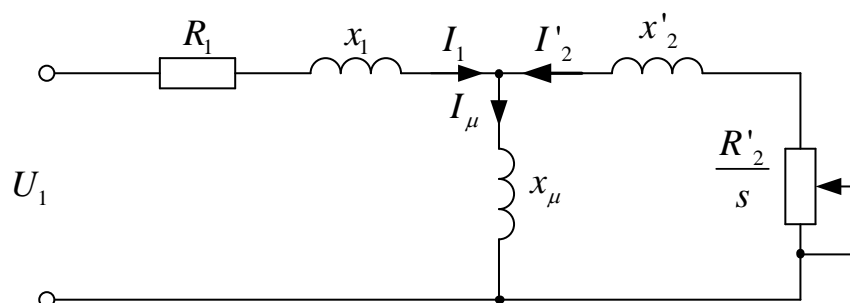


Рисунок 2.1 - Т - подібна схема.

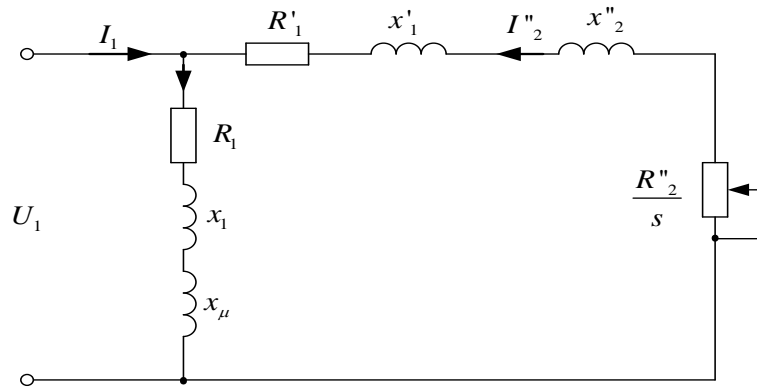


Рисунок 2.2 - Г - подібна схема.

Далі представлено поетапний розрахунок параметрів, необхідних для побудови еквівалентної моделі асинхронного двигуна за Г-подібною схемою заміщення, яка широко використовується при моделюванні векторних та скалярних систем керування. Зокрема, виконуються такі обчислення [5]:

- Розрахунок коефіцієнтів трансформації (перерахунку), які дозволяють здійснити перевід даних із Г-подібної схеми заміщення (традиційної для опису електричних процесів) у Т-подібну, яка є зручнішою для аналітичного аналізу та математичного моделювання в системах автоматичного керування;
- Обчислення параметрів Т-подібної схеми в системі відносних (нормованих) одиниць, що дозволяє універсалізувати модель, зменшити її залежність від конкретних величин напруги, струму, потужності тощо;
- Подальший перехід до абсолютних значень параметрів (в СІ), включаючи активні та реактивні опори гілок, що є необхідним для практичного застосування моделі в програмних середовищах на кшталт MATLAB/Simulink або LabVIEW;
- Визначення індуктивностей розсіювання обмоток статора та ротора, які моделюють магнітні втрати та виточки в системі;

- Індуктивність намагнічуючого контуру, яка характеризує основний магнітний потік машини та формується в основному магнітному колі;
- Повні індуктивності обмоток статора та ротора, що враховують як основну, так і розсіювальну складову та використовуються при розрахунках миттєвих значень струмів і напруг;
- Приведений момент інерції до вала двигуна, що дозволяє врахувати вплив навантаження та редуктора на динаміку системи;
- Сумарний момент інерції всієї системи, включаючи як механічну, так і електричну складову, що має ключове значення при розрахунку часових постійних та оцінці швидкодії приводу.

Загалом, наведені розрахунки створюють повну базу для переходу до наступного етапу - побудови точної математичної моделі електромеханічної системи та її комп'ютерного моделювання в рамках аналізу динамічних режимів роботи [6].

$$c_1 = \frac{x_\mu + \sqrt{x_\mu^2 + 4x_1' x_\mu}}{2x_\mu} = \frac{2.6 + \sqrt{2.6^2 + 4 \cdot 0.11 \cdot 2.6}}{2 \cdot 2.6} = 1.040$$

$$X_1 = \frac{x_1'}{c_1} = \frac{0.11}{1.040} = 0.106 \text{ у.о.};$$

$$r_1 = \frac{R_1'}{c_1} = \frac{0.023}{1.040} = 0.022 \text{ у.о.};$$

$$X_2 = \frac{x_2''}{c_1^2} = \frac{0.13}{1.040^2} = 0.12 \text{ у.о.};$$

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
						26
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$r_2 = \frac{R_2''}{c_1^2} = \frac{0.019}{1.040^2} = 0.018 \text{ y.o.}$$

$$x_1 = X_1 \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1\Phi H}} = 0.106 \frac{220}{172.503} = 0.135 \text{ Ом}$$

$$R_{1\sigma} = r_1 \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1\Phi H}} = 0.022 \frac{220}{172.503} = 0.028 \text{ Ом}$$

$$x_2 = X_2 \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1\Phi H}} = 0.12 \frac{220}{172.503} = 0.153 \text{ Ом}$$

$$R_2 = r_2 \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1\Phi H}} = 0.018 \frac{220}{172.503} = 0.023 \text{ Ом}$$

$$x_\mu = x_\mu \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1\Phi H}} = 2.6 \frac{220}{172.503} = 3.315 \text{ Ом}$$

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{2\pi f} = \frac{0.135}{314} = 0.00042 \text{ Гн};$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2}{2\pi f} = \frac{0.153}{314} = 0.00049 \text{ Гн}$$

$$L_\mu = \frac{x_\mu}{2\pi f} = \frac{3.315}{314} = 0.011 \text{ Гн}$$

$$L_1 = L_\mu + L_{1\sigma} = 0.011 + 0.00042 = 0.01142 \text{ Гн}$$

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$L_2 = L_\mu + L_{2\sigma} = 0.011 + 0.00049 = 0.01149 \text{ Гн}$$

$$J_{\text{пр}} = \frac{D_6^2 \cdot F_{\text{оп}}}{g \cdot 4 \cdot i_\Sigma^2} = \frac{132408}{132323.912} = 1.0006 \text{ м}$$

$$J_\Sigma = J_d - J_{\text{пр}} = 4,9 + 1.0006 = 5.9006 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Одним із ключових етапів проектування та впровадження системи електроприводу для ескалаторів є оптимальний вибір силової частини електрообладнання, яке повинно забезпечувати не лише необхідні електромеханічні характеристики, але й відповідати сучасним вимогам щодо енергоефективності, безпеки та надійності [7].

У типовій архітектурі електроприводу, що реалізується для приводу ескалаторів, широко застосовується тиристорний регулятор напруги. Його функціональне призначення полягає у керуванні зміні величини напруги, що подається на обмотки асинхронного електродвигуна, з метою плавного пуску, регулювання швидкості, а також реалізації гальмування.

У сучасній схемі електропривода ескалатора, побудованій із застосуванням тиристорного регулюючого блоку, зазвичай включаються наступні основні функціональні елементи [6]:

1. Силовий трансформатор – забезпечує необхідний рівень напруги для подальшої подачі на тиристорний перетворювач.
2. Трифазний тиристорний регулятор – складається з трьох пар зустрічно включених тиристорів, які дозволяють здійснювати симетричне регулювання напруги на навантаженні в кожній фазі.
3. Фільтри високочастотних гармонік – зменшують вплив вищих гармонічних складових на мережу та двигун, що виникають внаслідок імпульсного керування тиристорами.

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
						28
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Силовий асинхронний двигун – з короткозамкненим або фазним ротором, який обертає тяговий механізм ескалатора.

5. Пристрої плавного пуску та гальмування – дозволяють уникати стрибкоподібного навантаження на електромережу та механіку установки.

6. Система електронного керування – реалізується на мікроконтролерній або логічній базі і виконує функції обробки команд оператора, реалізації алгоритмів розгону, зупинки, аварійного відключення тощо.

7. Система захисту – включає як електричні (максимальний струм, перегрів, обрив фаз), так і механічні (перевищення швидкості, обрив стрічки) блокування та аварійні сигнали.

Тиристорні регулятори напруги є ефективними в умовах обмеженого діапазону зміни швидкості та забезпечують надійну роботу при великих пускових моментах, що характерно для ескалаторів. Недоліком може бути підвищений рівень вищих гармонік і необхідність посиленого охолодження двигуна при тривалих режимах на зниженій напрузі, однак ці питання вирішуються за допомогою відповідного фільтраційного та вентиляційного обладнання [6].

Тиристорний регулятор напруги використовується як керований джерело електричної енергії для живлення навантажень, які мають як активну, так і комбіновану активно-індуктивну природу. Його конструкція дозволяє ефективно працювати від трифазної змінної мережі живлення промислового стандарту, забезпечуючи регулювання амплітуди вихідної напруги шляхом фазового керування тиристорами. Такий тип регулятора є ключовим елементом у силовій частині систем електропривода, де потрібне плавне регулювання напруги, зокрема в приводах ескалаторів, ліфтів та інших транспортно-технологічних систем [4].

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

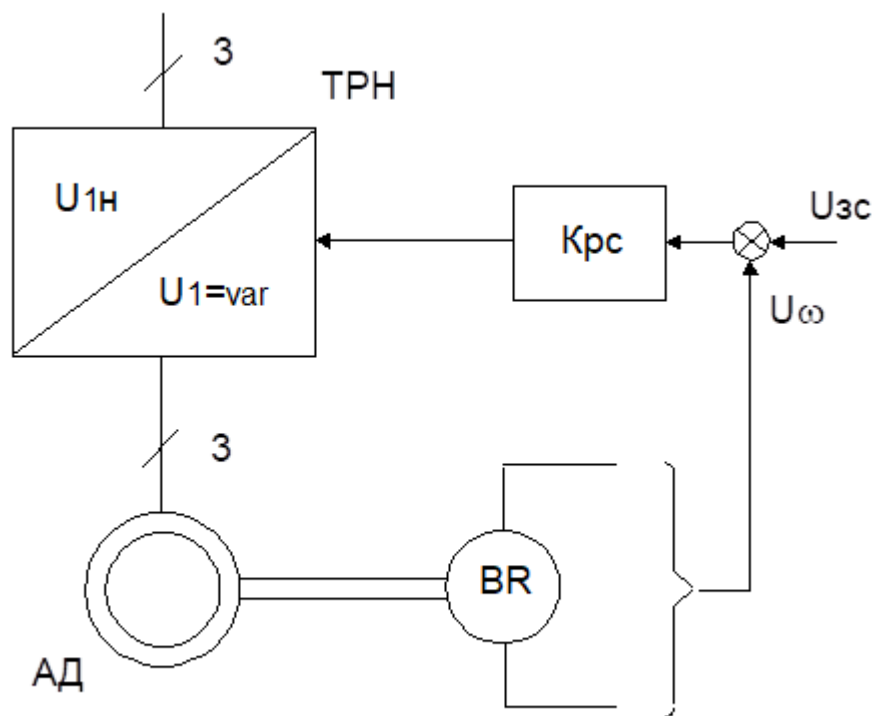


Рисунок 3.3 – Система ТРН-АД

Далі наведено результати ключових розрахунків, які стосуються електричних параметрів асинхронного двигуна в умовах номінального режиму роботи. Зокрема, визначено номінальні діючі (ефективні) значення фазної напруги та фазного струму статора, що є критичними показниками для точного моделювання та вибору силових компонентів електропривода [6].

Також проведено розрахунок амплітудних значень фазної напруги і струму, які використовуються в математичних моделях електромеханічних систем для переходу до аналізу в системах координат (наприклад, $a-ba-ba-b$ або $\alpha\beta$) та для побудови фазових діаграм. Ці величини мають важливе значення при визначенні максимальних навантажень на елементи силового кола та розрахунку допустимих теплових режимів електродвигуна [8].

$$U_n = \frac{U_{ln}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.393B$$

$$I_{1\phi H} = \frac{P_{2H}}{3 \cdot U_{1\phi H} \cdot \eta \cdot \cos(\varphi)} = \frac{90000}{3 \cdot 220 \cdot 0.93 \cdot 0.85} = 172.503A$$

$$U_{na} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 219.393 = 311B$$

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 172.503 = 243.956A$$

Для забезпечення прецизійного керування швидкістю обертання і точним позиціонуванням валу асинхронного електродвигуна критично важливим є застосування високоякісних сенсорних пристроїв. У цьому контексті особливу роль відіграє вибір відповідного енкодера - пристрою, що перетворює механічне обертання в електричний сигнал, який відображає кутове положення або частоту обертання [7].

Основними критеріями вибору такого датчика є [8]:

- Висока роздільна здатність, тобто здатність генерувати велику кількість імпульсів на один повний оборот вала, що дозволяє значно покращити точність зчитування положення;
- Мінімальне значення моменту інерції обертової частини датчика, що позитивно впливає на загальну динамічну реакцію системи, дозволяючи оперативно реагувати на зміни керуючих впливів без суттєвих запізнь;
- Компактні габарити та низьке енергоспоживання, що важливо для інтеграції у приводи з обмеженим простором або мобільні системи.

Таким чином, правильно підібраний енкодер є невід'ємною частиною ефективної системи керування, оскільки забезпечує стабільний і точний зворотний зв'язок, без якого неможлива реалізація алгоритмів адаптивного або високоточного регулювання в сучасних електромеханічних приводах [6].

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
						31
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для реалізації поставлених вимог було обрано інкрементальний енкодер Lenord + Bauer GEL 207, технічні характеристики якого дозволяють використовувати його у високоточних приводах [8]:

- Діапазон живлення: 5 В або 10–30 В постійного струму;
- Споживана потужність: залежить від напруги живлення, при 5 В — мінімальна;
- Роздільна здатність: до 5000 імпульсів на один оберт, що дозволяє отримувати дуже точну інформацію про положення і швидкість;
- Момент інерції валу: низький, що сприяє підвищенню точності регулювання в швидкодіючих системах.

Що стосується силової частини системи, яка передбачає керування навантаженням через змінювання поданої напруги, то в силовій схемі застосовуються тиристори як ключові елементи комутації. З урахуванням параметрів струму та напруги в силовому колі, з каталогу [9] було обрано тиристорний напівпровідниковий прилад типу LAMINA T61-175-12-50, що має такі параметри [9]:

- Максимальний прямий струм провідності - відповідний до навантаження приводу;
- Максимальна зворотна напруга - 1200 В, що забезпечує надійну роботу у колах живлення з високими імпульсними перевантаженнями.

Застосування саме таких елементів забезпечує узгодженість між високоточною системою керування та надійною силовою частиною, що є критично важливим для безпечної та стабільної роботи електромеханічного комплексу.

На основі техніко-економічного обґрунтування, проведеного у попередньому розділі даної дипломної роботи, було здійснено раціональний вибір електричної машини, яка відіграє ключову роль у функціонуванні електромеханічної системи. Зважаючи на специфіку режимів роботи та необхідність реалізації ефективного і стабільного керування, в якості виконавчого

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

елемента приводу було прийнято рішення використати трифазний асинхронний двигун серії 4А. З-поміж варіантів цієї серії найбільш оптимальним виявився двигун типу 4А315S8У3, що має номінальну встановлену потужність 90 кВт [5].

Основними критеріями, що вплинули на вибір зазначеної моделі, стали її експлуатаційна надійність, простота технічного обслуговування, а також сумісність із сучасними системами автоматизованого керування на базі частотних перетворювачів. Окрім цього, дана модифікація електродвигуна характеризується стабільною роботою у тривалих режимах навантаження, стійкістю до короткочасних перевантажень, високим ККД та достатньо низьким рівнем шуму, що є важливими факторами для забезпечення ефективності та довговічності всієї електропривідної системи [7].

Враховуючи величину номінального фазного струму статора електродвигуна, який було обрано на попередньому етапі розробки проєкту, здійснено підбір відповідного силового керуючого елемента - тиристорного регулятора напруги. У якості такого пристрою було обрано тиристорний регулятор типу ТРН-380-315-3 УХЛ4, конструктивно адаптований для роботи в мережах змінного струму напругою 380 В та номінальним струмом до 315 А. Зазначений регулятор забезпечує плавне керування напругою на вході електродвигуна, дозволяючи реалізувати контроль за швидкістю обертання без необхідності механічного втручання або складних обвідних схем [7].

Для реалізації функціональних можливостей цього регулятора та формування комутаційного процесу було обрано тиристори серії LAMINA T61-175-12-50. Зазначені напівпровідникові елементи мають високу здатність до протікання прямого струму, що досягає 175 А, а також витримують зворотну напругу до 1200 В, що є критично важливим при роботі в умовах змінного навантаження і динамічних пуско-гальмівних режимів [8].

Технічні характеристики обраних тиристорів повністю узгоджуються з параметрами двигуна та вимогами до системи електропривода, дозволяючи

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

забезпечити стабільну, безпечну та довговічну роботу електромеханічного комплексу в різних експлуатаційних режимах.

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		34

3 МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Електричні машини є фундаментальними елементами в структурі будь-якої системи, яка реалізує електромеханічне перетворення енергії. Вони функціонують як ключова ланка в системах електропривода, виконуючи перетворення електричної енергії у механічну, або навпаки - механічної енергії в електричну, що є критично важливим у широкому спектрі галузей - від транспортного машинобудування до автоматизованих виробничих ліній і побутових приладів [7].

Усі електромашинні пристрої, незалежно від їхньої конструктивної реалізації, класифікують за принципом перетворення енергії. До найбільш поширених типів належать [6]:

- машини постійного струму,
- асинхронні (індукційні) машини,
- синхронні електродвигуни та генератори.

Кожен із цих класів має свої особливості будови, динаміки й способу керування, що визначає доцільність його застосування в тій чи іншій технічній задачі.

Крім цього, в інженерній практиці важливим є розширене класифікування електричних машин за іншими ознаками, серед яких можна виокремити [8]:

- тип руху механічної частини - обертіві або лінійні системи;
- спосіб збудження магнітного поля - від зовнішнього джерела, постійних магнітів або за рахунок реактивного ефекту;
- конфігурація полюсів - явнополюсна чи неявнополюсна;
- форма розподілу магніторушійної сили (МРС) в повітряному проміжку між ротором і статором - синусоїдальна, трапецеїдальна або інша.

З точки зору системного підходу до автоматизованого керування, правильне математичне моделювання процесів, що відбуваються в електромашині, є ключовою умовою побудови ефективних регуляторів і точного аналізу поведінки

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

приводу в перехідних та усталених режимах. Використання чисельного моделювання з інструментами, такими як MATLAB/Simulink, дозволяє створювати адекватні цифрові копії фізичних об'єктів, на яких можна проводити дослідження, тестування й оптимізацію параметрів ще до фактичної реалізації технічної системи [9].

Ретельне моделювання на основі достовірних даних і точних рівнянь дозволяє проєктувальникам досягати високої точності керування, енергоефективності, стійкості до збурень, а також забезпечувати надійність і довговічність роботи електромеханічної системи в реальних умовах експлуатації [5].

Процес перетворення енергії з електричної у механічну або в зворотному напрямку, який відбувається в електричних машинах, у своїй суті ґрунтується на базових принципах класичної фізики - передусім, на законах електромагнетизму, електродинаміки та механіки. Ці фізичні закони визначають взаємодію електромагнітного поля з провідниками струму, що й забезпечує виникнення крутного моменту або електрорушійної сили, залежно від режиму роботи машини. Незважаючи на спільні фізичні засади для всіх електромеханічних перетворювачів, створити універсальну математичну модель, яка б одночасно охоплювала всі існуючі типи електричних машин (ЕМ) і при цьому точно враховувала специфіку кожної з них, практично неможливо. Це пояснюється великою кількістю конструктивних, електричних і магнітних особливостей, які характерні для різних класів машин - від машин постійного струму до синхронних і асинхронних двигунів, а також спеціалізованих сервомашин і реактивних приводів [7]. Створення докладних фізико-математичних моделей, які враховують усі внутрішні процеси в машині - включаючи втрати, насичення магнітопроводу, вищі гармоніки, ковзання та динамічні нелінійності - неминуче призводить до побудови складних, багатовимірних моделей з великою кількістю змінних та диференціальних рівнянь. Такі моделі хоча й точні, але є надто складними для використання в режимі реального часу, особливо в контексті

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						36
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

побудови алгоритмів автоматичного регулювання та керування електроприводом [8].

З цієї причини у практиці інженерного моделювання електромеханічних процесів широко застосовуються спрощені чи ідеалізовані математичні моделі, які формуються на основі певних припущень: лінійності, відсутності втрат, ідеальної форми МРС, рівномірного розподілу магнітного поля тощо. Подібні узагальнені моделі дозволяють ефективно досліджувати динаміку системи, аналізувати стійкість, розробляти схеми керування та проводити числове моделювання у програмному середовищі (наприклад, MATLAB/Simulink) без значного навантаження на обчислювальні ресурси [9].

Таким чином, використання ідеалізованих моделей є компромісом між фізичною точністю і практичною зручністю. Вони забезпечують достатню достовірність результатів на етапі проєктування й дозволяють створювати ефективні системи керування без необхідності занурення в надмірну деталізацію.

У процесах, що протікають в електричних машинах, ключову роль відіграє електромагнітна взаємодія, яка реалізується через магнітне поле, сформоване у повітряному зазорі між ротором і статором. Це магнітне поле виникає переважно під впливом електричних струмів, що проходять по провідниках активних частин обмоток, розташованих вздовж осі машини. Саме ці струми створюють основну магніторушійну силу (МРС), що забезпечує електромеханічне перетворення енергії. При цьому струми в лобових частинах обмоток, розміщених поза активною зоною, формують здебільшого паразитні магнітні потоки — так звані потоки розсіювання, які не беруть участі в основному процесі енергоперетворення, але впливають на параметри машини [8].

У більшості технічних випадків, при створенні аналітичних або спрощених математичних моделей електромагнітного поля електромашини, приймається припущення, що лінії магнітної індукції в повітряному проміжку мають орієнтацію, перпендикулярну до циліндричних поверхонь ротора та статора. Це спрощення дозволяє зменшити складність математичних описів, оскільки воно

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						37
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дає змогу використовувати аналітичні методи для опису розподілу поля та взаємодії магнітних потоків з провідниками [7].

Конфігурація розподілу магніторушійної сили в зазорі, а також її часові характеристики, залежать від кількох факторів. Насамперед, на це впливає конструктивне виконання самої машини, зокрема тип обмотки, геометрія укладання провідників, тип джерела живлення та електричні параметри. Від характеру прикладеної напруги до обмоток залежить форма та частота змін струму, що, у свою чергу, визначає часову структуру МРС. Наприклад, при живленні машини синусоїдальним змінним струмом спостерігається періодичне чергування напрямку та величини магнітного поля, що спричиняє змінну взаємодію з ротором [8].

Тип магнітного поля, яке виникає в машині (стаціонарне, обертове або пульсуюче), його форма, симетричність і гармонічний склад - усе це прямо визначає технічні параметри машини: обертовий момент, втрати, ККД, стабільність та електромагнітну сумісність. Водночас розподіл струмів у провідниках безпосередньо залежить від способу формування обмоток: концентрованого, розподіленого, хвильового тощо, а також від електричної схеми збудження, що використовується у конкретному приводі.

Таким чином, характер електромагнітного поля в повітряному зазорі є критичним фактором, що визначає динамічні та енергетичні характеристики електричних машин, і повинен бути належним чином врахований у процесі математичного моделювання та розробки систем керування.

У конструкції багатополосних електричних машин усі електромагнітні явища мають циклічний характер і повторюються через кожну пару полюсів. Це дозволяє значно спростити аналітичний розгляд, зосереджуючи увагу лише на одному полюсному інтервалі. Таким чином, при вивченні основ теорії електромашин доцільно обмежитись аналізом двополосної моделі, яка є базовим представником класу ідеалізованих електромеханічних перетворювачів енергії [8].

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						38
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У реальних електромеханічних пристроях конструкція є значно складнішою: у статорі та роторі можуть бути присутні множинні обмотки - припустимо, обмоток на статорі та m обмоток на роторі. Кожна з них є каналом взаємодії з керуючою системою, через який здійснюється підведення керуючої електричної напруги. У такій системі кількість незалежних електричних входів дорівнює сумі обмоток. Це забезпечує багатоканальне регулювання та контроль за динамікою електромагнітних процесів.

Вихідним результатом електромагнітної взаємодії в електричній частині машини є створення електромагнітного моменту, що генерується внаслідок взаємодії струмів обмоток зі змінним магнітним полем. Цей момент не тільки завершує електричний процес, а й слугує вхідним впливом для механічної частини електроприводної системи. До механічної підсистеми також додається момент зовнішнього збурення (наприклад, від навантаження) [7].

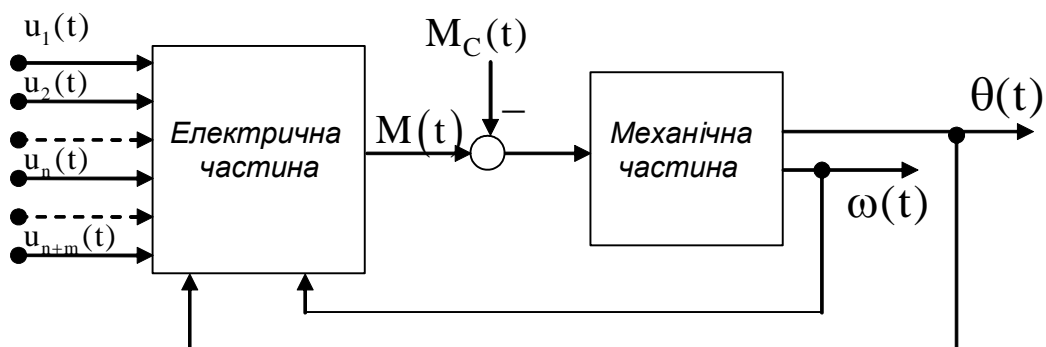


Рисунок 3.1 - Електромеханічний перетворювач

За умови дотримання попередньо сформульованих припущень і спрощень, що стосуються структури та динаміки електромеханічної системи, процес перетворення енергії з електричної форми у механічну (і навпаки) може бути узагальнений та представлений у вигляді формалізованої математичної моделі. Такий підхід дозволяє сформулювати єдиний опис динаміки, що охоплює як електричну, так і механічну підсистеми, в контексті векторного аналізу. Ці вектори є базовими змінними стану, що дозволяють сформулювати

електромагнітну динаміку системи у вигляді системи рівнянь, наприклад, за законом Кірхгофа для електричних кіл, доповненого рівняннями зв'язку між струмами та потокозчепленнями через індуктивності обмоток. Такий опис лежить в основі побудови векторної моделі електричної машини, що є особливо зручним у сучасних системах керування, зокрема в методах векторного керування асинхронними двигунами, де компоненти струму розділяються на активну (моментну) та реактивну (збуджувальну) складові [4].

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= (\mathbf{u}_{1s}, \mathbf{u}_{2s}, \dots, \mathbf{u}_{ns}; \mathbf{u}_{1r}, \mathbf{u}_{2r}, \dots, \mathbf{u}_{mr})^T \\ \mathbf{i} &= (\mathbf{i}_{1s}, \mathbf{i}_{2s}, \dots, \mathbf{i}_{ns}; \mathbf{i}_{1r}, \mathbf{i}_{2r}, \dots, \mathbf{i}_{mr})^T \\ \boldsymbol{\Psi} &= (\Psi_{1s}, \Psi_{2s}, \dots, \Psi_{ns}; \Psi_{1r}, \Psi_{2r}, \dots, \Psi_{mr})^T, \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{L}(\theta)\mathbf{i}, \quad (3.2)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \dot{\boldsymbol{\Psi}} \quad (3.3)$$

$$\dot{\mathbf{i}} = \mathbf{L}^{-1}(\theta) \left(-\mathbf{R}\mathbf{i} - \omega \frac{\partial \mathbf{L}(\theta)}{\partial \theta} \mathbf{i} + \mathbf{u} \right) \quad (3.4)$$

$$W_e = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \mathbf{L}(\theta) \mathbf{i} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{M} = \frac{\partial W_e(\theta)}{\partial \theta} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}(\theta)}{\partial \theta} \mathbf{i}. \quad (4.7)$$

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						40
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} [M - v\omega - M_c(t)], \quad M = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}(\theta)}{\partial \theta} \mathbf{i} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{i} = \mathbf{L}^{-1}(\theta) \left(-\mathbf{R}\mathbf{i} - \omega \frac{\partial \mathbf{L}(\theta)}{\partial \theta} \mathbf{i} + \mathbf{u} \right)$$

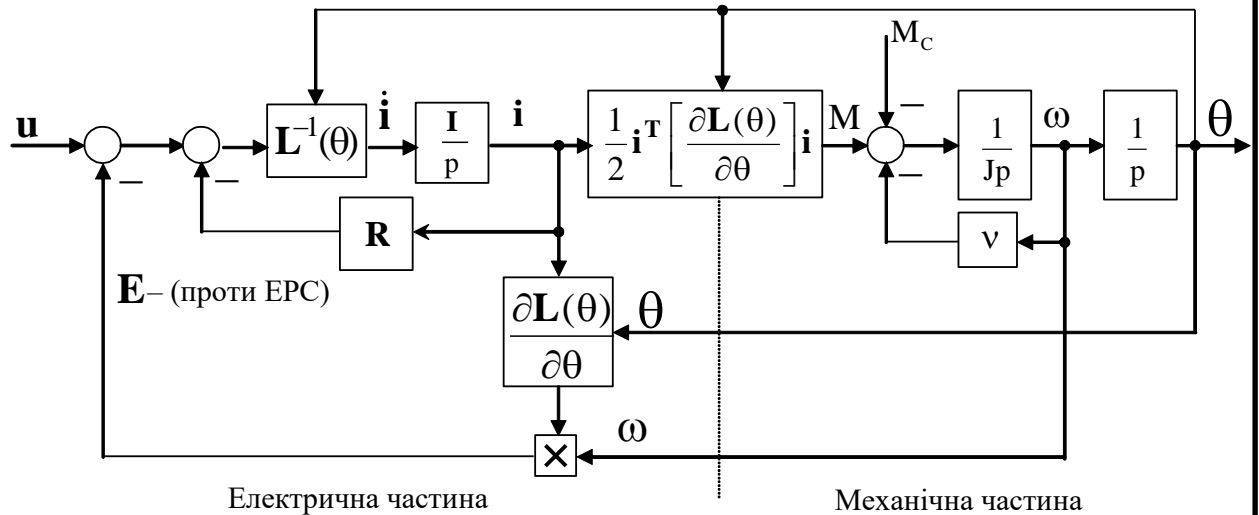


Рисунок 3.2 - Узагальнена структурна схема

У рамках теоретичного аналізу електричних машин широкого застосування набув підхід, що ґрунтується на використанні спрощених математичних моделей, які дозволяють суттєво зменшити складність опису фізичних процесів без істотної втрати точності. Одним із найбільш ефективних способів такого спрощення є перехід від трифазної системи координат до еквівалентної двофазної, що дає змогу отримати узагальнену математичну модель, яка є придатною для широкого спектра обертових електромеханічних перетворювачів [7].

Узагальнена електрична машина (УЕМ) - це концептуальна модель, яка використовується як ідеалізоване представлення динаміки реального електромеханічного пристрою. Такий підхід дає змогу побудувати універсальну структуру для моделювання, аналізу та розробки систем автоматичного керування обертовими електроприводами [8].

Ключовою умовою, яка лежить в основі цієї моделі, є синусоїдальний просторовий розподіл магніторушійної сили (МРС), що створюється в активній частині машини обмотками як статора, так і ротора. Такий розподіл розглядається як ідеалізоване наближення, яке добре узгоджується з реальною поведінкою машин, конструктивно наближених до симетрії. У випадку, коли МРС не є синусоїдальною за формою, модель зберігає точність, якщо розглядати лише основну (першу) просторову гармоніку поля, і відносити всі вищі гармоніки до явищ розсіювання магнітного потоку, які враховуються через відповідні корекції індуктивних параметрів.

Завдяки такому підходу стає можливим розглядати електромагнітні процеси у вигляді двох взаємно перпендикулярних фаз (наприклад, вісь α та β), що значно спрощує математичний опис і дозволяє застосовувати векторні методи аналізу. Отже, узагальнена електрична машина виступає потужним інструментом у задачах моделювання, синтезу алгоритмів керування, а також під час числового експериментування у спеціалізованих програмних середовищах типу MATLAB Simulink або ANSYS Maxwell [9].

У разі живлення машини, аналіз її поведінки в перехідних режимах зручно здійснювати на основі спрощеної математичної моделі, що оперує в координатах двофазної системи (наприклад, α - β або a - b). У таких умовах електрична частина машини може бути повністю охарактеризована системою диференціальних рівнянь, яка включає чотири основні рівняння електричної рівноваги, відповідні для контурів струму в обмотках статора і ротора. Ці рівняння встановлюють співвідношення між прикладеними напругами, струмами в обмотках та потокозчепленнями, що виникають у процесі взаємодії магнітних полів.

Крім того, для адекватного опису електромеханічного зв'язку необхідно враховувати вираз для електромагнітного моменту, що створюється машиною в результаті дії електричних струмів у її обмотках. Цей момент розглядається як функція електричних струмів та механічних змінних системи, таких як кутове положення ротора (θ) та швидкість його обертання (ω). Така модель дозволяє

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						42
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

комплексно враховувати як електричні, так і механічні аспекти роботи машини, забезпечуючи повноцінне представлення її динаміки в умовах змінних режимів навантаження та керування [7].

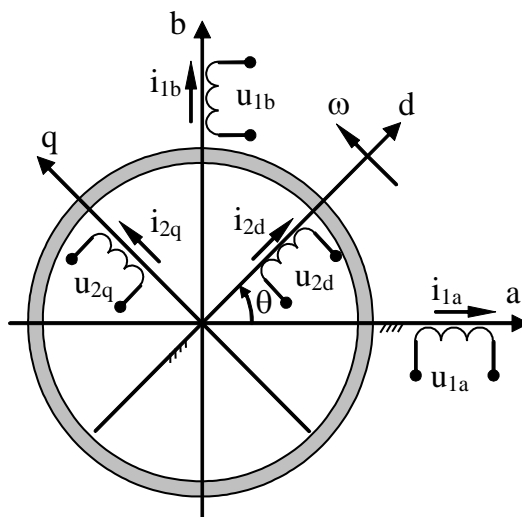


Рисунок 3.3 - Узагальнена машини.

У процесі математичного моделювання електромеханічної системи на основі асинхронної машини зручно використовувати різні системи координат для аналізу електромагнітних процесів. Зазвичай, для побудови динамічної моделі застосовують дві основні системи координат [10].

Для чіткого розмежування електричних величин, що належать до обмоток статора або ротора, у позначеннях використовуються індекси.

Крім того, другий індекс або нижній індекс вказує на просторове розміщення обмотки відносно осей обраної системи координат. Таким чином, позначення струмів, напруг та потокозчеплень набувають чітко визначеного фізичного змісту, що дозволяє правильно інтерпретувати результати моделювання та синтезувати системи керування з урахуванням електромагнітної структури машини [10].

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_1 &= (\mathbf{u}_{1a}, \mathbf{u}_{1b})^T \\ \mathbf{i}_1 &= (\mathbf{i}_{1a}, \mathbf{i}_{1b})^T \\ \boldsymbol{\psi}_1 &= (\boldsymbol{\psi}_{1a}, \boldsymbol{\psi}_{1b})^T,\end{aligned}\tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_2 &= (\mathbf{u}_{2d}, \mathbf{u}_{2q})^T \\ \mathbf{i}_2 &= (\mathbf{i}_{2d}, \mathbf{i}_{2q})^T \\ \boldsymbol{\psi}_2 &= (\boldsymbol{\psi}_{2d}, \boldsymbol{\psi}_{2q})^T.\end{aligned}\tag{3.10}$$

$$\mathbf{L}(\theta) = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & L_{12} \cos \theta & -L_{12} \sin \theta \\ 0 & L_1 & L_{12} \sin \theta & L_{12} \cos \theta \\ \hline L_{12} \cos \theta & L_{12} \sin \theta & L_2 & 0 \\ -L_{12} \sin \theta & L_{12} \cos \theta & 0 & L_2 \end{bmatrix},\tag{3.11}$$

$$\mathbf{L}(\theta) = \begin{bmatrix} L_1 \mathbf{I} & L_{12} e^{j\theta} \\ L_{12} e^{-j\theta} & L_2 \mathbf{I} \end{bmatrix},\tag{3.12}$$

$$e^{j\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad e^{-j\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_1 &= \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_1 + \frac{d\boldsymbol{\psi}_1}{dt} \\ \mathbf{u}_2 &= \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_2 + \frac{d\boldsymbol{\psi}_2}{dt}.\end{aligned}\tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\psi}_1 &= L_1 \mathbf{i}_1 + L_{12} e^{j\theta} \mathbf{i}_2 \\ \boldsymbol{\psi}_2 &= L_2 \mathbf{i}_2 + L_{12} e^{-j\theta} \mathbf{i}_1\end{aligned}\tag{3.14}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_1 + L_1 \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} + L_{12} e^{J\theta} \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} + L_{12} \omega e^{J\theta} \mathbf{J} \mathbf{i}_2 \\ \mathbf{u}_2 &= \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_2 + L_2 \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} + L_{12} e^{-J\theta} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} - L_{12} \omega e^{-J\theta} \mathbf{J} \mathbf{i}_1 \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_{12} e^{J\theta} \\ L_{12} e^{-J\theta} & L_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} \\ \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_1 - \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_1 - \omega L_{12} e^{J\theta} \mathbf{J} \mathbf{i}_2 \\ \mathbf{u}_2 - \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_2 + \omega L_{12} e^{-J\theta} \mathbf{J} \mathbf{i}_1 \end{pmatrix}. \quad (3.16)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} \\ \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} \end{pmatrix} = \mathbf{L}^{-1}(\theta) \begin{pmatrix} -\mathbf{R}_1 \mathbf{i}_1 - \omega L_{12} \mathbf{J} e^{J\theta} \mathbf{i}_2 + \mathbf{u}_1 \\ -\mathbf{R}_2 \mathbf{i}_2 + \omega L_{12} \mathbf{J} e^{-J\theta} \mathbf{i}_1 + \mathbf{u}_2 \end{pmatrix}. \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \mathbf{L}(\theta)}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} 0 & L_{12} e^{J\theta} \mathbf{J} \\ -L_{12} e^{-J\theta} \mathbf{J} & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

$$\mathbf{M} = L_{12} \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} e^{J\theta} \mathbf{i}_2 \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (L_{12} \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} e^{J\theta} \mathbf{i}_2 - \mathbf{M}c) \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} \\ \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} \end{pmatrix} = \mathbf{L}^{-1}(\theta) \begin{pmatrix} -\mathbf{R}_1 \mathbf{i}_1 - \omega L_{12} e^{J\theta} \mathbf{J} \mathbf{i}_2 + \mathbf{u}_1 \\ -\mathbf{R}_2 \mathbf{i}_2 + \omega L_{12} e^{-J\theta} \mathbf{J} \mathbf{i}_1 + \mathbf{u}_2 \end{pmatrix}$$

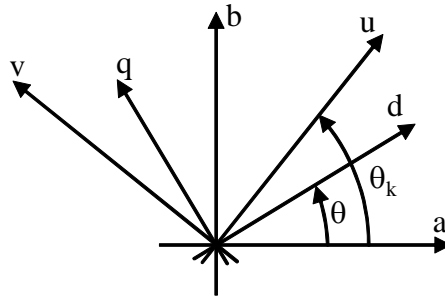


Рисунок 3.4 - Розташування координат

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1^{(u-v)} &= e^{-\mathbf{J}\theta_k} \mathbf{x}_1^{(a-b)} \\ \mathbf{x}_2^{(u-v)} &= e^{-\mathbf{J}(\theta_k - \theta)} \mathbf{x}_2^{(d-q)}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_1 + \frac{d\boldsymbol{\psi}_1}{dt} + \omega_k \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_1 \quad (3.22)$$

$$\mathbf{u}_2 = \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_2 + \frac{d\boldsymbol{\psi}_2}{dt} + (\omega_k - \omega) \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_2$$

$$\boldsymbol{\psi}_1 = L_1 \cdot \mathbf{i}_1 + L_{12} \cdot \mathbf{i}_2 \quad (3.23)$$

$$\boldsymbol{\psi}_2 = L_{12} \cdot \mathbf{i}_1 + L_2 \cdot \mathbf{i}_2$$

$$\mathbf{M} = L_{12} \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2 \quad (3.24)$$

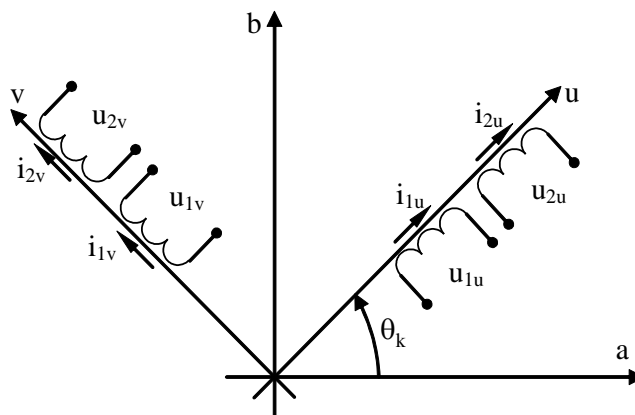


Рисунок 4.5 - Схематизація ЕМ

$$\mathbf{x}_{(\alpha\beta)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{(abc)} \square [3 \rightarrow 2] \mathbf{x}_{(abc)}, \quad (4.25)$$

$$\text{де } [2 \rightarrow 3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}. \quad (4.26)$$

$$P_{(abc)} = \frac{3}{2} P_{(\alpha\beta)}. \quad (4.27)$$

У рамках теоретичного аналізу процесів електромеханічного перетворення енергії, зокрема при моделюванні асинхронного електродвигуна, загальноприйнятим підходом є використання еквівалентної схеми заміщення, яка відображає поведінку однієї фази двигуна. Найбільш поширеною є так звана Т-подібна (трифазна) схема заміщення, що забезпечує зручне представлення внутрішніх електромагнітних процесів у вигляді взаємозв'язаних елементів: активних та реактивних опорів, які імітують втрати в обмотках, магнітне намагнічування та взаємодію між статором і ротором. Такий підхід дозволяє спростити розрахунки і глибше дослідити робочі режими асинхронної машини при різних умовах навантаження й живлення.

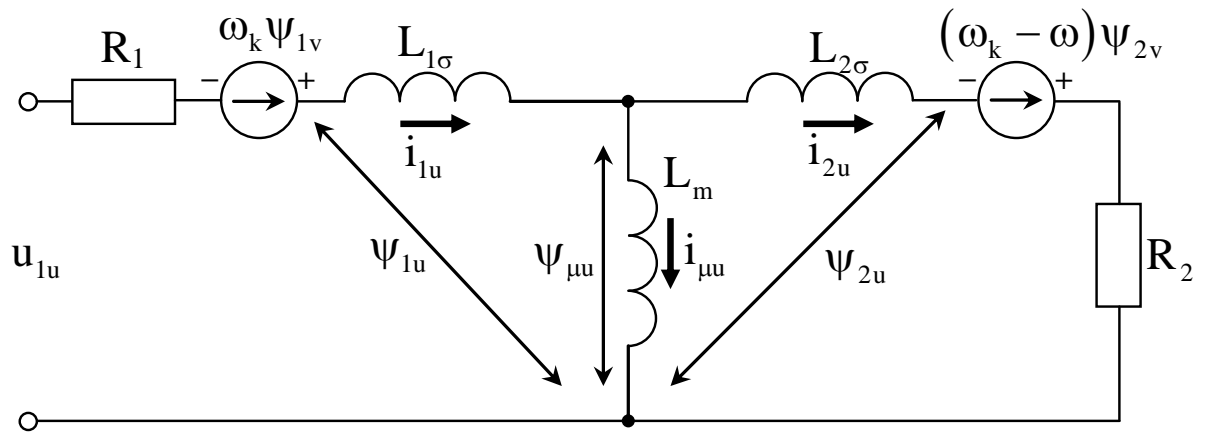


Рисунок 4.6 - Заміщення фази АД

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m \quad (3.28)$$

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_m,$$

$$\psi_1 = L_1 \mathbf{i}_1 + L_m \mathbf{i}_2 \quad (3.29)$$

$$\psi_2 = L_m \mathbf{i}_1 + L_2 \mathbf{i}_2,$$

$$M = \frac{3}{2} L_m \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2 \quad (3.30)$$

$$\mathbf{i}_2 = L_2^{-1} (\psi_2 - L_m \mathbf{i}_1) \quad (3.31)$$

$$\dot{\psi}_2 = -\alpha \psi_2 + \omega \mathbf{J} \psi_2 + \alpha L_m \mathbf{i}_1, \quad (3.32)$$

$$\dot{\mathbf{i}}_1 = -\frac{R_1}{\sigma} \mathbf{i}_1 - \beta \dot{\psi}_2 + \frac{1}{\sigma} \mathbf{u}_1, \quad (3.33)$$

$$\text{де } \sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma}.$$

$$\mathbf{M} = \frac{3 L_m}{2 L_2} \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \boldsymbol{\Psi}_2 \quad (3.34)$$

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

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \frac{1}{J} (\mathbf{M} - \mathbf{M}_c), \quad \mathbf{M} = \frac{3 L_m}{2 L_2} p_n (\psi_{2a} \mathbf{i}_{1b} - \psi_{2b} \mathbf{i}_{1a})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{1a} = -\gamma \mathbf{i}_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \boldsymbol{\omega} \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} \mathbf{u}_{1a} \quad (3.35)$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{1b} = -\gamma \mathbf{i}_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \boldsymbol{\omega} \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} \mathbf{u}_{1b}$$

$$\dot{\psi}_{2a} = -\alpha \psi_{2a} - p_n \boldsymbol{\omega} \psi_{2b} + \alpha L_m \mathbf{i}_{1a}$$

$$\dot{\psi}_{2b} = -\alpha \psi_{2b} + p_n \boldsymbol{\omega} \psi_{2a} + \alpha L_m \mathbf{i}_{1b}$$

$$\mathbf{x}^{(d-q)} = e^{-\mathbf{J}\theta_0} \mathbf{x}^{(a-b)}, \quad (3.36)$$

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

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \frac{1}{J} (\mathbf{M} - \mathbf{M}_c), \quad \mathbf{M} = \frac{3 L_m}{2 L_2} p_n (\psi_{2d} \mathbf{i}_{1q} - \psi_{2q} \mathbf{i}_{1d})$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{1d} = -\gamma \mathbf{i}_{1d} + \omega_0 \mathbf{i}_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \boldsymbol{\omega} \psi_{2q} + \frac{1}{\sigma} \mathbf{u}_{1d} \quad (3.37)$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{1q} = -\gamma \mathbf{i}_{1q} - \omega_0 \mathbf{i}_{1d} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta p_n \boldsymbol{\omega} \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} \mathbf{u}_{1q}$$

$$\dot{\psi}_{2d} = -\alpha \psi_{2d} + \omega_2 \psi_{2q} + \alpha L_m \mathbf{i}_{1d}$$

$$\dot{\psi}_{2q} = -\alpha \psi_{2q} - \omega_2 \psi_{2d} + \alpha L_m \mathbf{i}_{1q},$$

$$\mathbf{i}_1 = \mathbf{L}_1^{-1} (\boldsymbol{\Psi}_1 - \mathbf{L}_m \mathbf{i}_2), \quad (3.38)$$

$$\dot{\boldsymbol{\Psi}}_1 = -\alpha_1 \boldsymbol{\Psi}_1 - \omega_0 \mathbf{J} \boldsymbol{\Psi}_1 + \alpha_1 \mathbf{L}_m \mathbf{i}_2 + \mathbf{u}_1, \quad (3.39)$$

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						49
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\alpha_1 = R_1/L_1$.

$$\dot{\mathbf{i}}_2 = -\gamma_1 \mathbf{i}_2 - \omega_2 \mathbf{J} \mathbf{i}_2 + \alpha_1 \beta_1 \boldsymbol{\psi}_1 + \beta_1 p_n \omega \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_1 + \frac{1}{\sigma_1} \mathbf{u}_2 - \beta_1 \mathbf{u}_1 \quad (3.40)$$

$$\text{де } \sigma_1 = L_2 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \beta_1 = \frac{L_m}{L_1 \sigma_1}, \gamma_1 = \frac{R_2}{\sigma_1} + \alpha_1 L_m \beta_1.$$

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} L_m p_n (\mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2) = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\boldsymbol{\psi}_1 - L_m \mathbf{i}_2)^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n \boldsymbol{\psi}_1^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2 = \\ &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\psi_{1q} i_{2d} - \psi_{1d} i_{2q}) \end{aligned} \quad (3.41)$$

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

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} (M - M_c), \quad M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\psi_{1q} i_{2d} - \psi_{1d} i_{2q})$$

$$\dot{\psi}_{1d} = -\alpha_1 \psi_{1d} + \omega_0 \psi_{1q} + \alpha_1 L_m i_{2d} + u_{1d}$$

$$\dot{\psi}_{1q} = -\alpha_1 \psi_{1q} - \omega_0 \psi_{1d} + \alpha_1 L_m i_{2q} + u_{1q} \quad (3.42)$$

$$\dot{i}_{2d} = -\gamma_1 i_{2d} + \omega_2 i_{2d} + \alpha_1 \beta_1 \psi_{1d} - \beta_1 p_n \omega \psi_{1q} + \frac{1}{\sigma_1} u_{2d} - \beta_1 u_{1d}$$

$$\dot{i}_{2q} = -\gamma_1 i_{2q} - \omega_2 i_{2q} + \alpha_1 \beta_1 \psi_{1q} + \beta_1 p_n \omega \psi_{1d} + \frac{1}{\sigma_1} u_{2q} - \beta_1 u_{1q}.$$

З метою дослідження динамічних та статичних характеристик системи, яка складається з тиристорного регулятора напруги (ТРН) і асинхронного двигуна (АД), у першу чергу доцільно розглянути спрощену модель електричної взаємодії між її елементами. Для цього використовується приведена Т-подібна еквівалентна схема заміщення однієї фази асинхронного двигуна, яка дозволяє умовно зобразити основні складові електромагнітного процесу: активні опори,

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						50
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

індуктивності розсіювання статора й ротора, а також елемент, що відповідає за магнітне намагнічування машини. Такий підхід значно спрощує попередній аналіз і дозволяє провести базову оцінку впливу параметрів ТРН на роботу приводу [11].

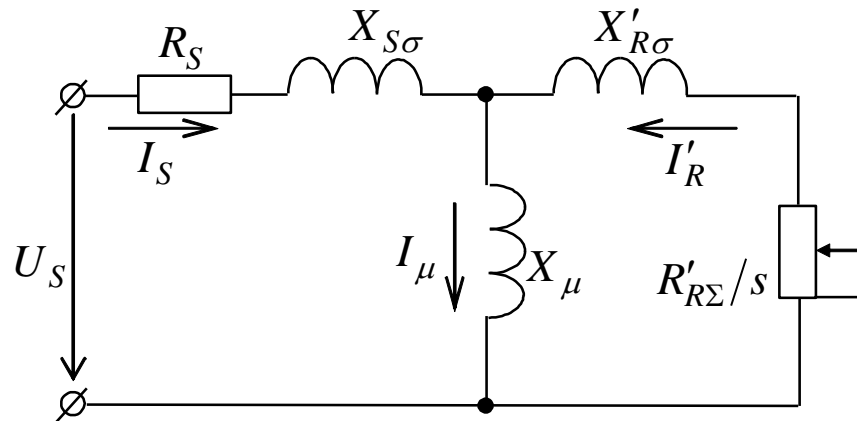


Рисунок 4.7 – Т-подібна схема

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_S &= \bar{I}_S (R_S + jX_{S\sigma}) + \bar{E}_S; \\ -\bar{E}'_R &= \bar{I}'_R (R'_{R\Sigma}/s + jX'_{R\sigma}), \end{aligned} \right\} \quad (3.43)$$

У межах нормального робочого режиму асинхронного двигуна, тобто в діапазоні навантажень, при яких струм, що протікає через обмотку статора, не перевищує свого номінального значення з помітним відхиленням, можна допустити спрощення математичного опису. Таким чином, у рівняннях моделі дозволяється проігнорувати доданок, оскільки його вплив на кінцевий результат моделювання є незначним і не впливає на точність розрахунків в рамках заданої похибки [12].

$$U_S \approx E_S = 4.44 f_S W_S \Phi \cong f_S \Phi, \quad (3.44)$$

$$s_K = \pm \frac{R'_{R\Sigma}}{\sqrt{R_S^2 + X_k^2}}; \quad (3.45)$$

$$M_K = \frac{3U_S^2}{2\omega_0 \left(R_S \pm \sqrt{R_S^2 + X_k^2} \right)}. \quad (3.46)$$

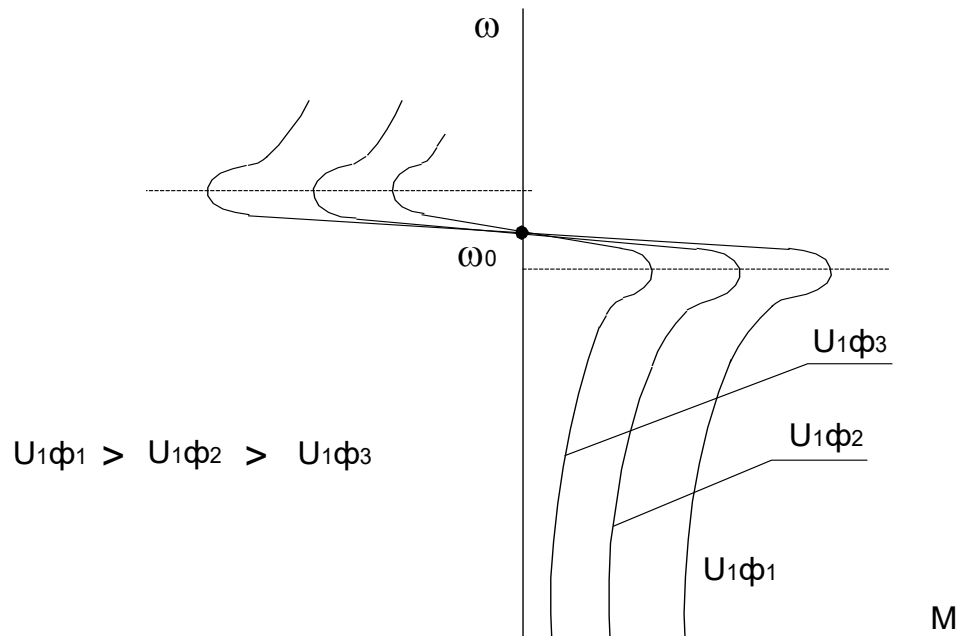


Рисунок 3.8 – Механічні характеристики АД

Аналіз конфігурації механічних характеристик свідчить про те, що для забезпечення достатньої жорсткості цих характеристик - тобто мінімальної чутливості швидкості обертання до змін навантаження - необхідним є впровадження плавного регулювання прикладеної до двигуна напруги. Такий підхід дозволяє стабілізувати швидкість у заданому діапазоні. Автоматично коригує керуючий сигнал у відповідь на найменші відхилення фактичної швидкості від заданого значення. Цей принцип є основоположним у побудові високоточних систем електроприводу, особливо при експлуатації в умовах змінних навантажень [12].

$$M = f(\omega, U_{S^*}) = \frac{2M_k \omega_0 s_K (\omega_0 - \omega) U_{SH}^2}{(\omega_0 - \omega)^2 + s_K^2 \omega^2} U_{S^*}, \quad (3.47)$$

$$\omega_3 \leq \frac{1}{(6 \dots 10) T_{E.\max}}, \quad (3.48)$$

$$T_E = 1/(\omega_s \alpha'_R),$$

$$T_{E.\max} = 1/(\omega_s s_K). \quad (3.49)$$

$$M - M_C = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.50)$$

$$\Delta M_j = J_\Sigma \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = -\beta \cdot \Delta \omega + K_M \Delta U_{S^*} - \Delta M_C, \quad (3.60)$$

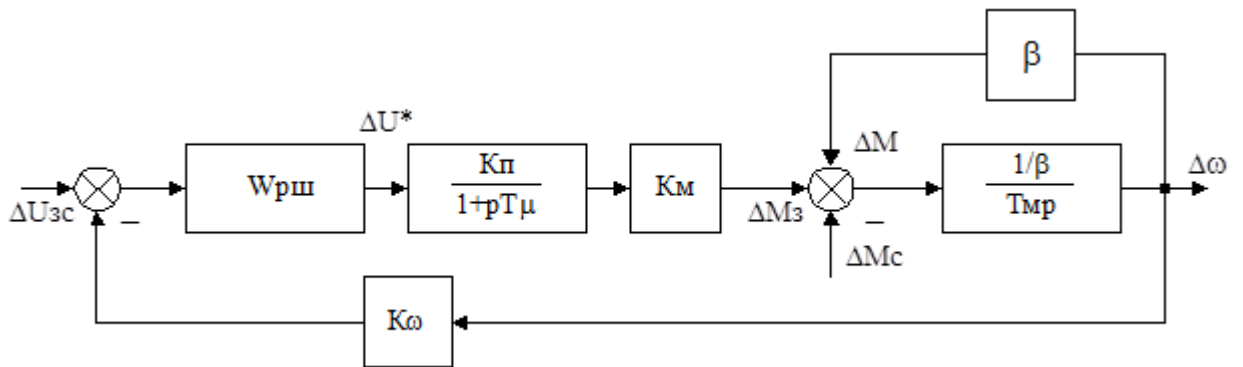


Рисунок 3.10 – Ссхема асинхронного привода

$$W_{рш}(p) = \frac{W_{жс}(p)}{W_{об}(p)} = \frac{\beta(T_M p + 1)}{2T_\mu K_\Pi K_M K_\omega p}, \quad (3.61)$$

$$T_{\mu} = \frac{6 \dots 10}{2\omega_s s_K} \quad (3.62)$$

Виходячи з проведених раніше теоретичних розрахунків, аналітичного обґрунтування параметрів та структурної побудови системи, було здійснено побудову математичної моделі електричного двигуна. Створена модель враховує ключові електромагнітні та механічні процеси, що відбуваються в машині під час її роботи, та слугує основою для подальшого комп'ютерного моделювання й аналізу її динамічних характеристик у середовищах інженерного проектування, зокрема MATLAB/Simulink. Зазначене моделювання дає змогу вивчити поведінку двигуна в різних режимах навантаження та швидкості, а також оцінити ефективність розробленої системи керування [9].

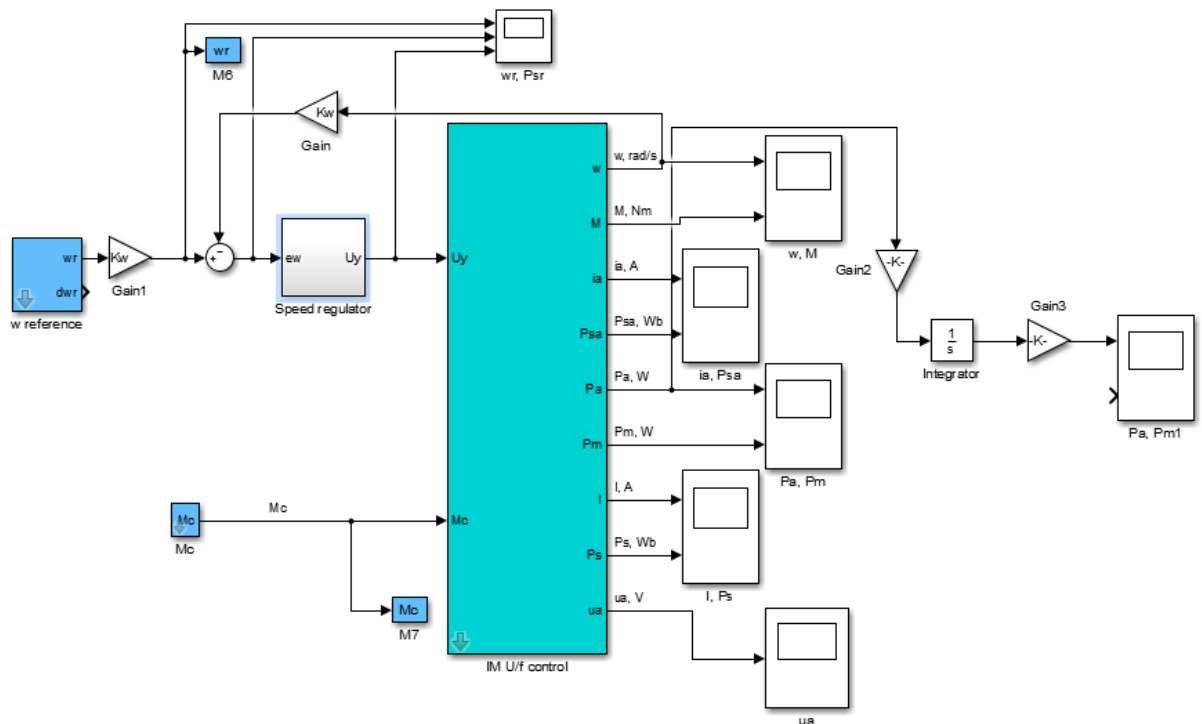


Рисунок 3.11 – Модель за системою “ТРН-АД”

Далі наведено повний перелік ключових розрахункових параметрів, необхідних для формування математичної моделі системи автоматичного

керування швидкістю обертання електропривода. Зокрема, було здійснено аналітичне визначення параметрів регуляторів, що забезпечують стабільну та точну роботу електромеханічної системи в динамічних умовах.

До числа обчислених величин належить еквівалентний активний опір асинхронного двигуна, що відображає загальні втрати на нагрівання в обмотках при його роботі. Розрахована електромагнітна стала часу двигуна дозволяє оцінити інерційність електромагнітних процесів у системі. Також визначено коефіцієнт передачі асинхронного двигуна по напрузі, що характеризує зв'язок між вхідним електричним сигналом і реакцією системи на нього.

Окрім цього, було обчислено коефіцієнт підсилення тиристорного регулятора напруги, що визначає, наскільки ефективно він здатен змінювати вихідну напругу при зміні вхідного сигналу керування. Особливу увагу приділено визначенню малої некомпенсованої сталої часу, яка залишилася після компенсації внутрішніх динамічних ланок системи, а також коефіцієнта зворотного зв'язку по швидкості, що є критичним для досягнення стабільної роботи замкненого контуру.

Важливими також є розрахунки сталої часу розімкненого контуру регулювання швидкості та сталої часу самого процесу регулювання швидкості. На завершення було визначено електромеханічну сталу часу, яка узагальнює динаміку всієї системи в електромеханічному аспекті та дозволяє зробити висновки щодо швидкодії та стійкості регуляторного контуру.

$$R_{AD} = R_1 + L_1 \frac{R_2}{L_2} = 0.0508 \text{ Ом}$$

$$T_e = \frac{\sigma}{R_{AD}} = 0.0175 \text{ с}$$

$$k_u = \frac{2\lambda M_H}{U_H} = 24.337$$

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

$$k_{\mu} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_H}{10} = 31.113$$

$$T_{\mu} = T_{zan} + T_e = 0.05c$$

$$k_{ш} = \frac{10}{1.1 \cdot \omega_{xx}} = 0.116$$

$$T_{ш} = 5 \cdot T_{\mu} = 0.252c$$

$$T_{рш} = \frac{k_{п} \cdot k_u \cdot k_{ш} \cdot T_{ш}}{\beta} = 0.095c$$

$$T_M = \frac{J}{\beta} = 0.021c$$

У межах даного розділу було виконано комплексне теоретичне дослідження структури та принципу дії узагальненої електричної машини, яка виступає спрощеним математичним аналогом реального електромеханічного перетворювача. Особливу увагу приділено формуванню її математичної моделі, що описує динамічні та електромагнітні процеси, що відбуваються в системі [12].

На підставі отриманих рівнянь, що характеризують роботу узагальненої електричної машини в координатному представленні, в середовищі MATLAB Simulink було реалізовано структурно-функціональну модель асинхронного електродвигуна, яка працює під керуванням за принципом системи "тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун" (ТРН–АД). Ця модель дозволяє візуалізувати перехідні процеси, а також оцінити якість керування електроприводом у динаміці [9].

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
						56
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки в межах даного дипломного проекту реалізується саме система керування типу ТРН–АД, виникає потреба в проведенні точного інженерного розрахунку параметрів регуляторів, що формують контур зворотного зв'язку. Ці регулятори відповідають за стабілізацію швидкості обертання ротора двигуна, мінімізацію перерегулювання та забезпечення необхідної швидкодії системи. Відповідні розрахунки були детально виконані у попередніх підрозділах і є невід'ємною складовою етапу розробки ефективного алгоритму керування електромеханічною системою.

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		57

4 ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ

В роботі було організовано серію експериментів із математичного моделювання перехідних процесів у системі. Основною метою такого дослідження стало виявлення впливу різних умов пуску та навантаження на поведінку електромеханічної системи, що, у свою чергу, дозволяє сформулювати обґрунтовані висновки щодо ефективності обраного методу керування.

Модель, застосована у цьому розділі, була побудована на основі повної системи рівнянь динамічного опису асинхронного двигуна у координатному представленні. Програмне середовище для імітаційного моделювання створено у MATLAB Simulink, що забезпечує можливість гнучкого налаштування параметрів та аналізу результатів у зручному форматі [9].

Проведення аналізу зазначених сценаріїв функціонування дає змогу здійснити комплексне зіставлення ефективності пуску асинхронного двигуна залежно від умов експлуатації. Зокрема, детальне вивчення результатів моделювання дозволяє визначити ключові параметри, що впливають на динаміку електропривода, серед яких: величина пускових струмів, швидкість наростання обертів ротора у часі, тривалість несталих режимів, а також ступінь впливу навантаження на електромагнітний момент та обертальну швидкість [12].

Крім того, у ході аналізу розглядається можливість виникнення перевантажувальних режимів, які можуть призвести до надмірного теплового навантаження або механічного зношування елементів системи. Отримані дані дозволяють оцінити надійність і стійкість приводу до зовнішніх збурень, а також надати практичні рекомендації щодо доцільності використання тиристорного регулювання напруги у системах з різною інерційністю та характером навантаження [15].

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

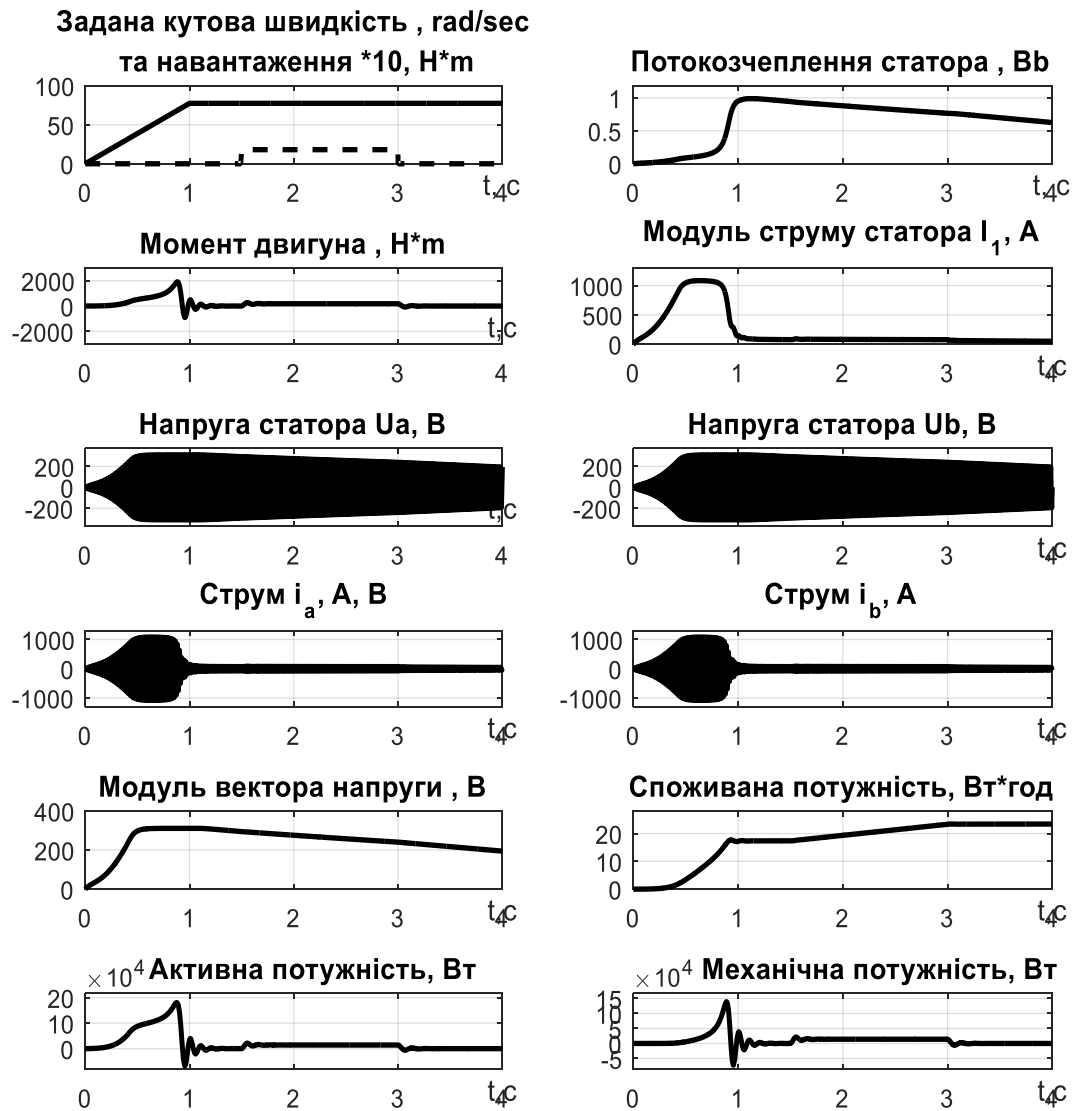


Рисунок 5.1 - Графіки перехідних процесів

На основі детального аналізу отриманих графіків перехідних процесів функціонування електромеханічної системи можна зробити низку важливих висновків щодо її працездатності та відповідності технічним вимогам. Результати моделювання чітко засвідчують, що система здатна стабільно працювати в умовах навантаження, не виходячи за межі допустимих параметрів, передбачених проектними характеристиками [17].

Зокрема, зафіксовано, що час розгону ротора до встановленої робочої швидкості за умов максимально допустимого моменту навантаження становить приблизно 1 секунду, що свідчить про високу динамічну якість системи та ефективність реалізованого алгоритму регулювання. Такий показник задовольняє вимоги щодо швидкодії та плавності переходу в усталений режим.

Крім того, під час імітаційного експерименту було визначено значення максимального електромагнітного моменту, що виникає на валу двигуна в перехідному процесі. Це значення становить що значно менше від критичного моменту двигуна, який за каталогом дорівнює. Така різниця свідчить про достатній запас стійкості системи та виключає ризик перевантаження двигуна у звичайних експлуатаційних режимах [12].

Таким чином, результати динамічного аналізу підтверджують, що розроблена електромеханічна система з тиристорним керуванням забезпечує надійне функціонування, дотримуючись усіх основних критеріїв якості: адекватного часу розгону, обмеження моментів у допустимих межах та відсутності загроз нестабільності при максимальному навантаженні [15].

На підставі детального аналізу отриманих графіків перехідних процесів можна сформулювати узагальнений висновок щодо ефективності функціонування електроприводної системи в умовах реального навантаження. Як показали результати моделювання, розглянута електромеханічна система демонструє повну працездатність і стабільність динамічної поведінки. Її основні характеристики залишаються у межах допустимих значень, що відповідає встановленим технічним вимогам до якості регулювання.

Зокрема, одним із ключових показників є час розгону до номінальної швидкості обертання, який становить 1 секунду. Це значення зберігається і за умов повного завантаження ескалаторного приводу, що додатково підтверджує адаптивність та надійність системи в роботі під підвищеним навантаженням [17].

Факт стійкого запуску двигуна за умов максимальної маси пасажиропотоку свідчить про достатній динамічний резерв і правильний вибір компонентів

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						60
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи, включаючи двигун, тиристорний регулятор і відповідні параметри регуляторів. Повторне підтвердження працездатності в різних режимах, зокрема при пуску з повним навантаженням, є важливим аргументом на користь стабільності системи в усьому діапазоні робочих режимів [16].

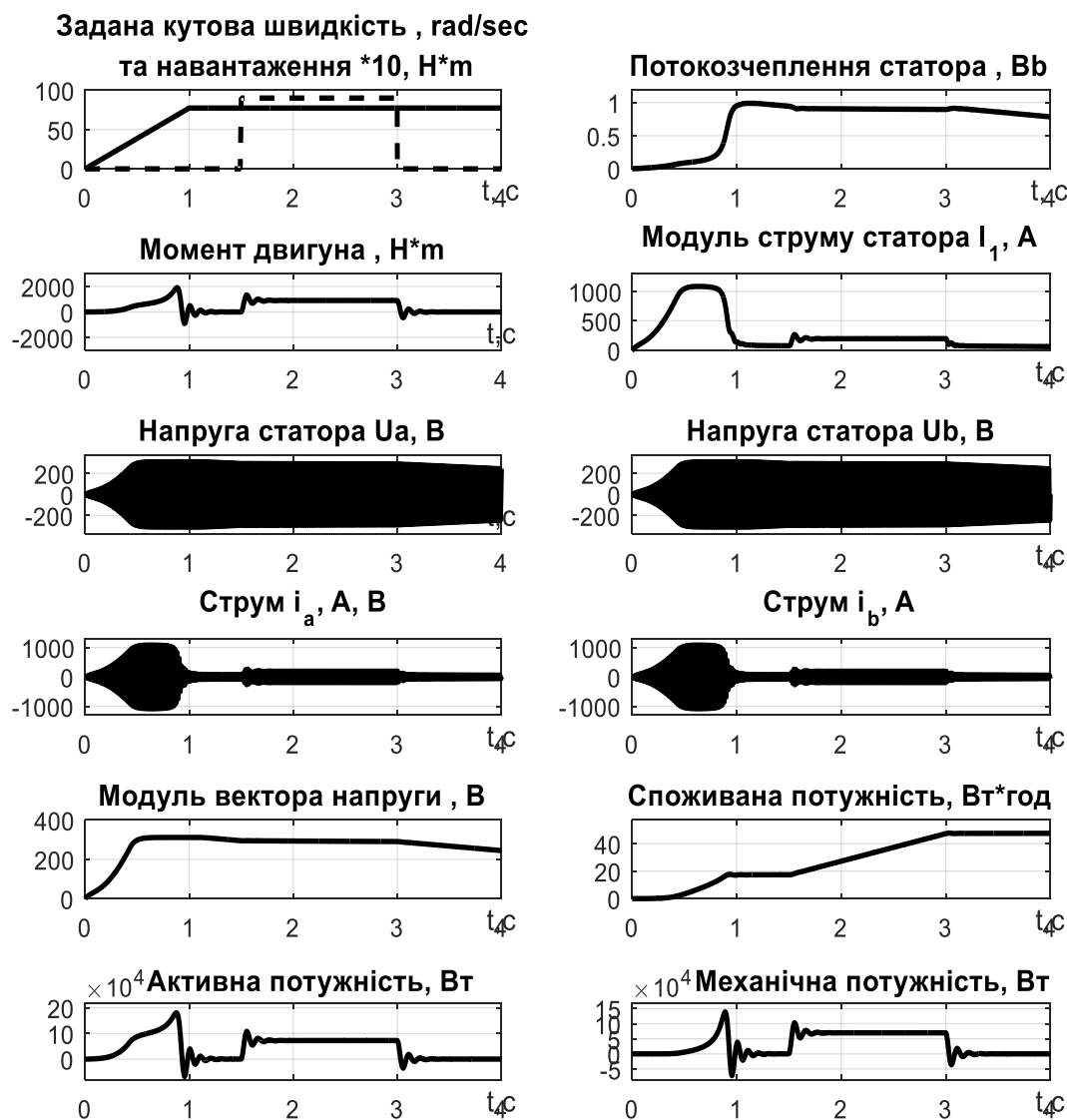


Рисунок 5.2 - Графіки перехідних процесів

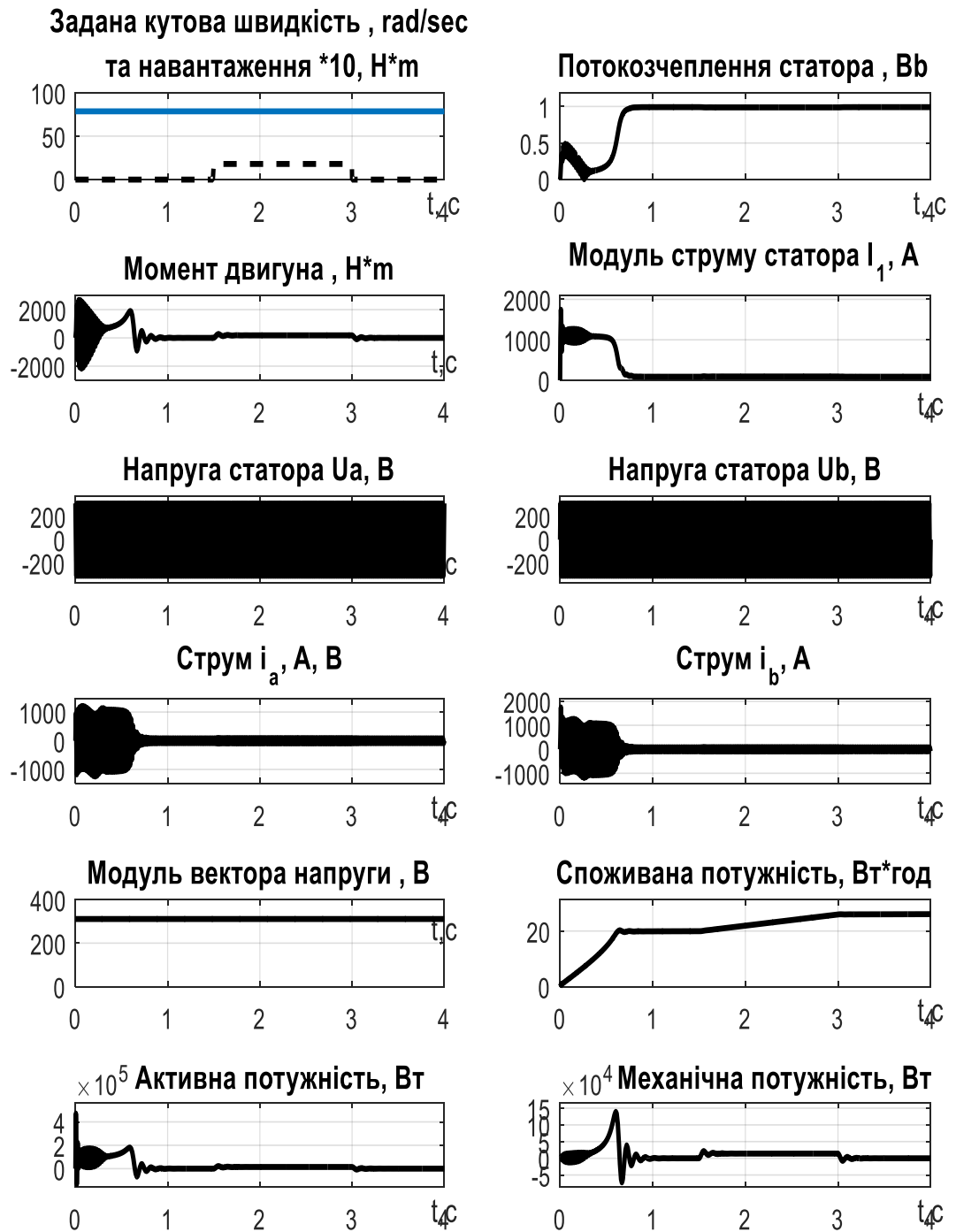


Рисунок 5.3 - Графіки перехідних процесів при прямому пуску ескалатора під навантаження $M_{max} / 5$

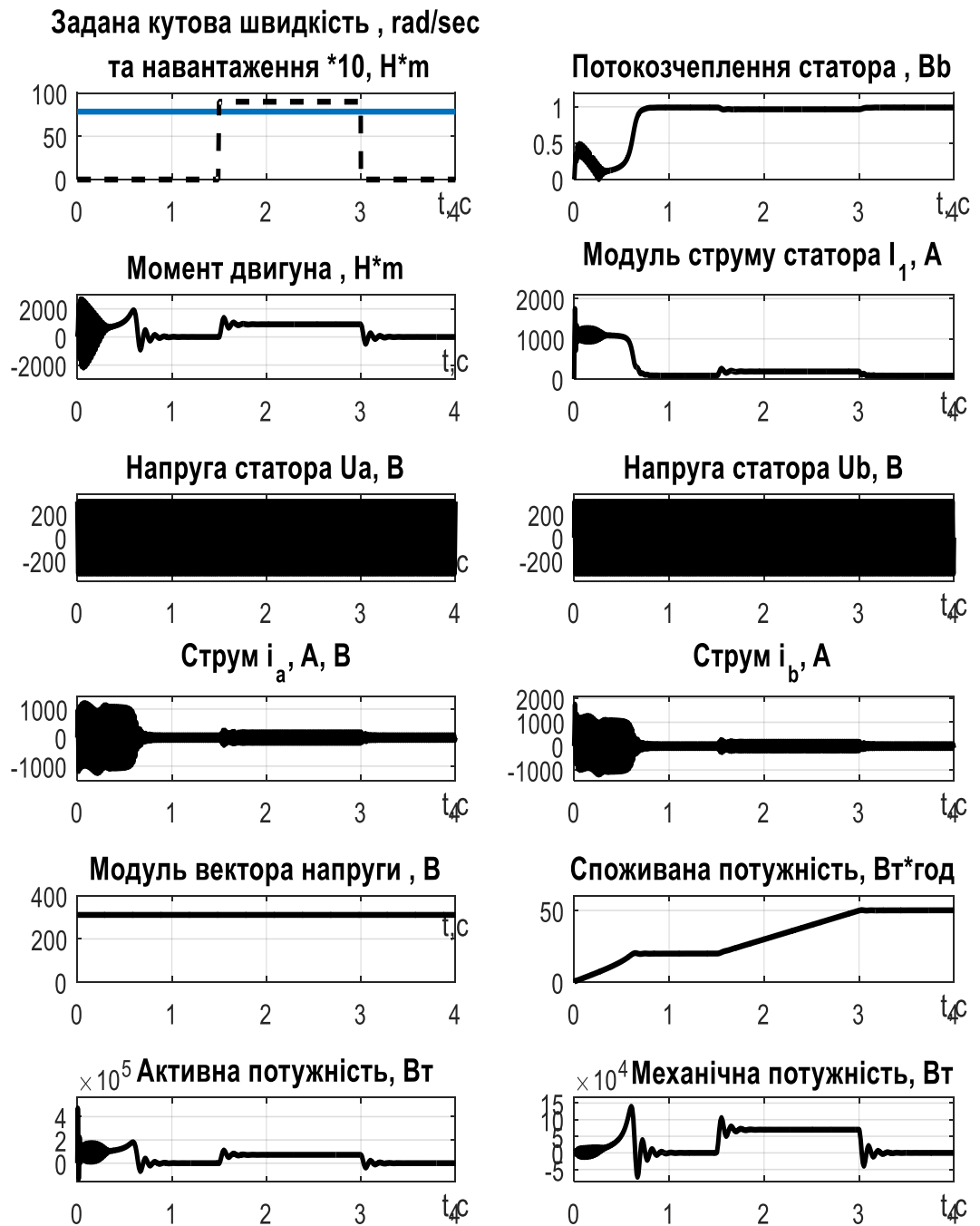


Рисунок 5.4 - Графіки перехідних процесів при прямому пуску ескалатора під навантаження M_{max}

На основі аналізу графіків перехідних процесів, можна зробити обґрунтований висновок про ефективність реалізованого способу керування асинхронним електродвигуном. Зокрема, система демонструє стабільну роботу навіть у складних режимах, таких як пуск приводу з повністю завантаженим ескалаторним полотном - наприклад, після аварійного або екстреного зупинення. Значущим показником ефективності є час розгону до робочої швидкості, який при повному навантаженні не перевищує приблизно однієї секунди, при цьому забезпечується необхідна плавність пуску, що суттєво знижує динамічні навантаження на елементи приводу [15].

Окремої уваги заслуговує аналіз графіків споживаної потужності. Вони наочно демонструють, що застосування тиристорного керування дозволяє суттєво зменшити енергетичні витрати у порівнянні з традиційним прямим запуском двигуна. Це досягається завдяки більш точному дозуванню напруги на статорі під час запуску, що, у свою чергу, знижує рівень пускового струму та втрат у системі [17].

Отже, реалізоване рішення не лише забезпечує належну динаміку електропривода, але й відповідає сучасним вимогам енергоефективності та експлуатаційної надійності.

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	Арк.
						64
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У цій кваліфікаційній роботі було детально розглянуто побудову та функціонування електромеханічної системи позиційного регулювання, в основі якої застосовано асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором, що працює за принципами векторного керування. У якості прикладного об'єкта дослідження обрано вантажопідіймальну установку, для якої було проаналізовано конструктивні особливості, виконано інженерні розрахунки і здійснено обґрунтований вибір електродвигуна — асинхронної машини типу 4А, яка відповідає вимогам до потужності, надійності та ефективності.

У рамках теоретичного дослідження було розглянуто сучасні схеми електроприводів, що знаходять широке застосування в автоматизованих системах керування, та проведено їх порівняльний аналіз. Особливу увагу було приділено варіантам реалізації приводу з векторним керуванням, а також специфіці використання тиристорних регуляторів напруги у таких системах.

Для реалізації системи керування було обрано тиристорний регулятор напруги типу ТРН-380-315-3 УХЛ4, що забезпечує плавне регулювання параметрів живлення електродвигуна та дозволяє досягти стабільної роботи в умовах змінного навантаження. Було побудовано узагальнену математичну модель електромеханічної системи, проведено повний набір розрахунків її параметрів, а також змодельовано її поведінку в динамічних і статичних режимах.

Всі етапи моделювання було реалізовано в середовищі MATLAB/Simulink. На основі моделі було побудовано графіки перехідних процесів для чотирьох основних режимів роботи: запуск з навантаженим ескалаторним полотном та без нього - як у випадку тиристорного керування, так і при прямому підключенні до мережі. Результати моделювання дозволили проаналізувати ефективність функціонування системи, зокрема з погляду часу розгону, величини пускових струмів, моменту на валу, а також енергетичних втрат [15].

					ЕМКС 122003 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Також була розроблена функціональна структурна схема електромеханічної системи регулювання положення, яка відповідає поставленому технічному завданню, враховує вимоги щодо точності, надійності, енергоефективності та безпеки експлуатації.

Таким чином, поставлені задачі дослідження були успішно вирішені, а результати підтвердили працездатність і доцільність застосування векторно-керованого асинхронного приводу в автоматизованих системах позиціонування вантажопідіймального обладнання.

					<i>ЕМКС 122003 000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змін.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		66