

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 скалярного частотного керування
швидкості асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором.

Виконав(ла)

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

Віталій ГАМЛІЙ
(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.	8
1.1 Електромеханічна система скалярного частотного керування швидкості асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором	8
1.2 Загальний опис електромеханічної системи скалярного частотного керування швидкості асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором	13
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА	23
3 ВИБІР ДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ	29
4 КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ АД	36
5 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ АД	47
6 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА ДАНИМИ КАТАЛОГУ	50
Висновки	64
Список використаних джерел	66
Додатки	69

					ЕМКС 410001 000 ПЗ							
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Гамлій В.І.			Електромеханічна система скалярного частотного керування швидкості асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором.				Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Кобилянський									6	
Т. контр.									БННППІ ХНУ ім. В.Н. Каразіна БЗ-Е21			
Н. Контр.		Кобилянський										
Затверд.		Кузнецов Б.І.										

ВСТУП

Математичне моделювання - це науковий прийом, спосіб дослідження об'єктів та отримання нової інформації про них. Вирішення переважної більшості наукових та інженерно-технічних завдань (проектування та оптимізація систем, оптимальне управління об'єктом, вивчення механізму явищ, прогнозування розвитку процесів у часі та ін.) базується на математичному моделюванні.

Математичне моделювання передбачає опис досліджуваних явищ, процесів, систем різної фізичної природи мовою математичних співвідношень. Клас математичної моделі визначається постановкою завдання і метою дослідження, а також рівнем знань експериментатора про об'єкт, що моделюється. Математика дозволяє одноманітно описати широке коло фактів і спостережень, провести їх детальний кількісний аналіз, передбачити, як поведеться об'єкт у різних умовах, тобто спрогнозувати результати майбутніх спостережень.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						7
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Електромеханічна система скалярного частотного керування швидкості асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором

У зв'язку з тим що у реальних умовах роботи гірничо-збагачувальних підприємств підтримання стабільного й безперервного навантаження живильника та дробарки гірською масою є вкрай складним завданням. Унаслідок цього повна встановлена потужність стрічкового конвеєра необхідна лише у певні, обмежені проміжки часу, коли навантаження досягає максимальних значень. У решті часу експлуатації системи потужність навантаження істотно коливається, що призводить до роботи транспортувального обладнання у режимах, далеких від номінальних [1].

Зазначене явище зумовлює той факт, що більшість стрічкових конвеєрів, які використовуються на дробарно-сортувальних комплексах, функціонують у нерегулярному режимі, не використовуючи весь потенціал своєї технічної потужності. У такій ситуації постає актуальна інженерна задача — зменшення швидкості руху стрічки до оптимального рівня, який забезпечував би необхідну продуктивність за умови збереження номінального рівня навантаження на одиницю довжини конвеєра [3].

Враховуючи вищезазначене, у цій роботі передбачається проведення аналізу й дослідження технічних можливостей регулювання швидкісного режиму стрічки конвеєра. Зокрема, увага приділяється використанню частотного перетворювача, який працює за принципом скалярного (вольт-частотного) керування, що дозволяє плавно змінювати швидкість електропривода та адаптувати роботу конвеєра до фактичного навантаження в реальному часі.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						8
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

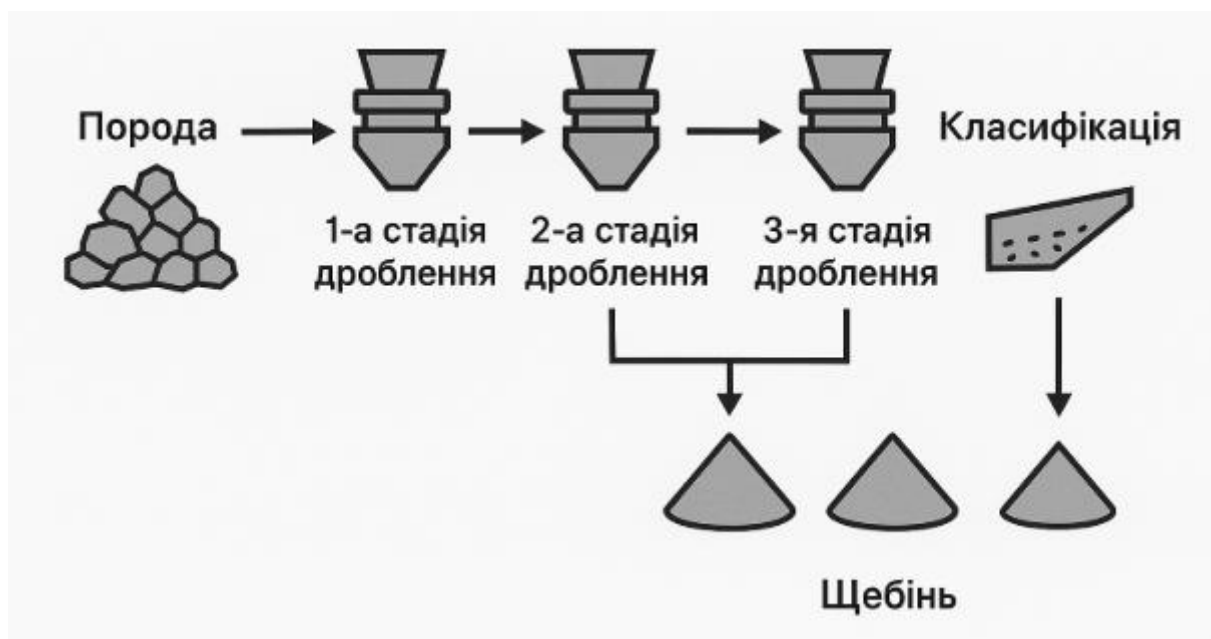
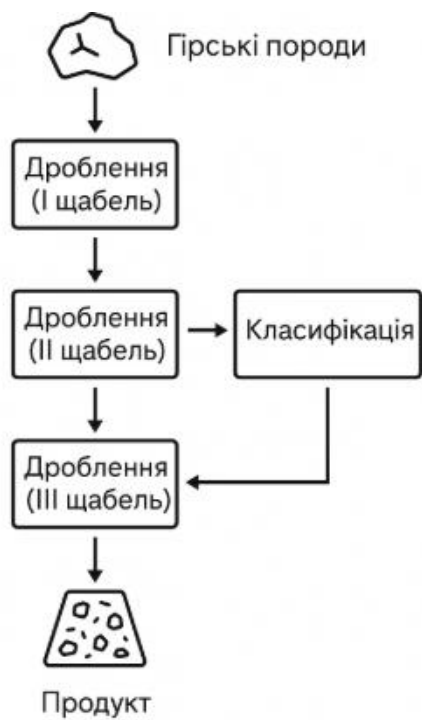


Рисунок 1.1 - Технологічна схема

Підприємства, що спеціалізуються на виробництві нерудних будівельних матеріалів, поділяються на три основні типи залежно від характеру готової

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						9
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продукції: щебеневі, гравійно-піщані та піщані заводи. Основною сировиною для таких підприємств є гірські породи природного походження, що не потребують складної хімічної переробки. З метою зменшення витрат на транспортування сировини та підвищення ефективності виробництва, подібні заводи зазвичай будують безпосередньо на місцях видобутку корисних копалин. При цьому велике значення має близькість до основних транспортних комунікацій, таких як залізниці, автомобільні дороги чи водні артерії, що дозволяє забезпечити зручну логістику як для доставки сировини, так і для транспортування готової продукції споживачам [3].

У ряді випадків, особливо під час реалізації інфраструктурних проєктів, зокрема дорожнього будівництва в малонаселених або віддалених районах, доцільним є використання місцевих запасів нерудних матеріалів. Їх видобувають у невеликих за масштабами тимчасових (так званих притрасових) кар'єрах, які створюються безпосередньо поблизу будівельних майданчиків. Це дає змогу значно скоротити витрати на транспортування сировини, зменшити час доставки матеріалів та забезпечити будівництво необхідною кількістю ресурсу [4].

У таких випадках широко використовуються мобільні або пересувні дробильно-сортувальні установки, які можна оперативно доставити на місце розробки кар'єру та швидко ввести в експлуатацію. Ці установки дають змогу безпосередньо на місці здійснювати повний цикл обробки гірської маси — від первинного дроблення до сортування фракцій відповідно до встановлених вимог. Завдяки цьому забезпечується гнучкість виробництва, економічність процесу та можливість швидкого реагування на потреби будівельного об'єкта. Для того щоб перетворити гірничу сировину, отриману під час розробки кар'єру, на повноцінний будівельний матеріал, придатний до практичного використання, необхідно реалізувати послідовний і технологічно складний цикл переробки. Цей цикл включає в себе кілька обов'язкових етапів, серед яких: дроблення до заданих фракцій, класифікація за розмірами (сортування), промивання матеріалу з метою видалення домішок, а також його зневоднення. Кожен із цих процесів вимагає ретельно підбраного обладнання, яке враховує

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

специфіку фізико-механічних характеристик сировини, технічні параметри продуктивності підприємства, а також встановлені вимоги до якості кінцевого продукту [5].

Після завершення усіх стадій обробки отриманий матеріал акумулюється в спеціально облаштованих зонах або складах тимчасового зберігання. Лише після цього він підлягає відвантаженню споживачеві з урахуванням логістичних, договірних і технологічних умов [6].

Варто зазначити, що реалізація описаних вище операцій вимагає інтеграції широкого спектра технічних засобів – від дробарок і грохотів до мийних та зневоднювальних установок. Ці машини повинні бути функціонально поєднані у єдину виробничу систему, що забезпечує максимальний рівень механізації й автоматизації усіх виробничих етапів [4].

Правильний вибір технологічного обладнання, який базується на системному аналізі вихідних даних, дозволяє не лише досягти високої якості продукції, а й оптимізувати витрати на її виробництво. Як результат – значне зниження собівартості готової будівельної сировини, що підвищує конкурентоспроможність підприємства на ринку нерудних матеріалів.

Верхня фракція матеріалу транспортується до щоклової дробарки крупного (первинного) подрібнення моделі Nordberg C125, де великі уламки породи зменшуються в розмірах до 150–300 мм. Такий ступінь дроблення забезпечує оптимальні умови для ефективної роботи дробильного обладнання наступного рівня[4].

У виробництві будівельних матеріалів із нерудної сировини для первинного подрібнення порід, що мають високу міцність і зносостійкість, найчастіше використовують щоклові дробарки. Якщо ж обробляються менш абразивні породи середньої міцності, застосовують роторні машини. На другому етапі процесу розміри частинок зменшуються до 0–50 мм за допомогою конусної дробарки GP200S coarse [6].

Матеріал, який пройшов другий рівень подрібнення, надходить на грохот №1, що виконує функцію попереднього фракціонування. Основне його призначення — відсіяти частинки, які не потребують додаткової обробки, і тим

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						11
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

самим зменшити навантаження на роторну дробарку Barmac B7150SE DTR, яка працює на заключному, третьому етапі дроблення. Це також дозволяє уникнути надмірного подрібнення матеріалу, що може негативно вплинути на якість готової продукції [7].

На цьому рівні переробки, залежно від типу породи, її розміру та вимог до виробничої потужності, можуть встановлюватися одна або кілька дробарок середнього подрібнення. Так, для твердих і абразивних порід доцільно застосовувати щоківі або конусні дробарки, тоді як для порід із середньою міцністю і невисоким вмістом абразивів — роторні або молоткові агрегати. Нижня фракція з грохота разом із продуктом, який пройшов через дробарку необхідної стадії, подається далі, де відбувається чергове проміжне сортування. На третьому етапі обробки роторна дробарка зменшує розмір частинок до необхідного для споживача товарного рівня — орієнтовно до 40 мм. Після завершення третього дроблення матеріал направляється на останній грохот, де відбувається остаточне просіювання. На цьому етапі встановлюється сито з отворами, що відповідають максимально допустимому розміру фракцій у готовій продукції. Частинки, які перевищують цей розмір (понад 40 мм), повертаються до роторної дробарки третього ступеня для повторного подрібнення, що формує замкнений цикл дроблення [7].

Запровадження замкнутого циклу дозволяє значно (на 25–30%) підвищити ефективність роботи дробарок фінального етапу завдяки можливості збільшити розміри вихідних отворів. Окрім того, така організація процесу забезпечує стабільність якості кінцевого продукту за фракційним складом [8].

Щебінь остаточно фракціонується на три основні товарні групи [8]:

- дрібну — 0–5 мм,
- середню — 5–20 мм,
- велику — 20–40 мм.

Для здійснення як проміжного, так і фінального сортування використовуються плоскі вібраційні грохоти, які можуть створювати

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						12
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коливання кругового або лінійного типу. Саме завдяки цим коливанням забезпечується ефективне розділення матеріалу за розмірами.

Після завершення етапу сортування на контрольних грохотах відсортований щебінь направляється до складів зберігання готової продукції, звідки здійснюється його подальше відвантаження споживачам.

Зазначена технологічна схема виробництва щебеню, представлена на рисунку 1, є узагальненою (спрощеною) моделлю. Вона ілюструє ключові етапи обробки базальтової сировини, що відбувається на профільному підприємстві з виробництва нерудних матеріалів.

1.2 Загальний опис електромеханічної системи скалярного частотного керування швидкості асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором

У сучасному промисловому виробництві важливим чинником забезпечення високої ефективності та стабільного функціонування підприємств виступають технології безперервного переміщення матеріалів. Однією з найпоширеніших і найефективніших форм такого транспорту є стрічкові конвеєри, які характеризуються лаконічністю конструктивного виконання, експлуатаційною надійністю та широким спектром застосування. Вони здатні переміщати як сипучі, так і штучні вантажі на значні відстані з мінімальними витратами енергії [8].

Такі системи, як правило, інтегруються з додатковими модулями, що автоматизують процеси завантаження і вивантаження матеріалів, сприяючи комплексній оптимізації виробничого циклу [8].

Призначення, роль у виробничому процесі та напрями використання

Конвеєрні установки створені для транспортування вантажів безперервним потоком у межах заданої логістичної траєкторії. Під час переміщення вантаж може не лише переміщуватись, а й дозуватись, сортуватись, накопичуватись у визначених зонах або передаватись на інші технологічні ділянки, забезпечуючи чітку послідовність та безперервність виробничих операцій.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						13
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливої ваги ці транспортні засоби набувають у машинобудуванні, де вони забезпечують транспортування комплектуючих, деталей, заготовок і готової продукції між цехами та вузлами технологічної обробки. Конвеєрні лінії є ключовим компонентом автоматизованого виробництва, що дозволяє послідовно здійснювати такі етапи як термообробка, очищення, складання, забарвлення, сушка, охолодження й пакування.

Конвеєрні системи задають ритм виробництва, впливають на його ефективність, сприяють зростанню обсягів продукції, зменшенню витрат часу й енергії, та дозволяють уникати технологічних простоїв.

У зонах їх розміщення організовуються спеціальні ділянки для завантаження й розвантаження, які інтегруються в загальну структуру виробничого процесу.

За типом елемента, який виконує тягову функцію, системи транспорту поділяються на два основні класи[8]:

- з наявністю тягового елемента (наприклад, стрічка, ланцюг, канат або штанга);
- без нього, до яких належать системи шнекового (гвинтового) типу, роликові пристрої та обертові трубопроводи.

Типи руху, що здійснює вантажонесучий елемент, можуть бути поступальними, обертальними, коливальними або зворотно-поступальними, залежно від умов експлуатації та особливостей технологічного процесу.

Стрічкові конвеєри: конструктивні особливості та принцип функціонування

Найбільш універсальними у використанні вважаються стрічкові транспортери, які завдяки простоті обслуговування, високій надійності та енергоефективності мають широке розповсюдження в різних галузях [9].

Принцип дії стрічкового конвеєра (див. рис. 2) полягає у наступному [8]:

- Натяжний барабан (поз. 1) створює потрібне зусилля в гумовотканинній стрічці (поз. 2), яка одночасно виконує функцію тягового і вантажонесучого елемента.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						14
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Привідний барабан (поз. 3) передає обертальний момент на стрічку завдяки силам тертя між поверхнями, забезпечуючи її рух по замкнутому контуру.

Завдяки простоті та надійності, такі системи широко впроваджуються в гірничодобувній, металургійній, будівельній, хімічній та харчовій промисловості, де є потреба в ефективному транспортуванні великих обсягів матеріалу на різні відстані [9].

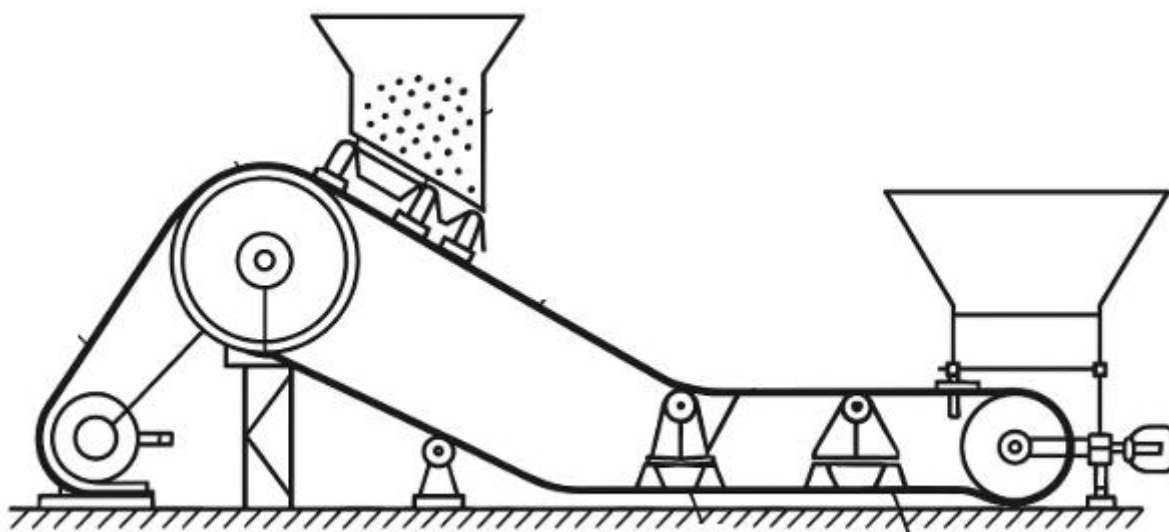


Рисунок 1.2 - Принципова схема

У процесі функціонування стрічкового транспортера подача матеріалу відбувається під час проходження вантажонесучої стрічки під живильним пристроєм, без необхідності зупинки привідного механізму. Сегмент стрічки, по якому переміщується вантаж, прийнято називати гілкою, тоді як інша її частина, що повертається до початкової точки, є зворотною гілкою [9].

Для забезпечення підтримки стрічки під час руху використовуються елементи, що сприяють стабільному переміщенню вантажу. Щоб коригувати напрямок руху та запобігти боковому зміщенню, застосовують опори. З метою

підвищення ефективності зчеплення між приводним барабаном і стрічкою використовуються, які збільшують кут обхвату[8].

У більшості випадків вивантаження матеріалу здійснюється у кінцевій частині транспортної магістралі, де розміщується спеціальний бункер-приймач. Однак за необхідності передбачаються проміжні пункти вивантаження, оснащені відповідними технічними пристроями [7].

Усі складові елементи конвеєра монтуються на опорній несній конструкції, яка приймає на себе навантаження від транспортуемого матеріалу. Конфігурація опорної бази залежить від складності маршруту та типу транспортера. Найчастіше вона складається з уніфікованих секцій довжиною 3–6 м, виготовлених з металопрокату профільного типу. Окремі ділянки, призначені для встановлення приводів або натяжних пристроїв, мають посилену конструкцію для забезпечення надійної фіксації обладнання.

Секції з'єднуються болтовими вузлами, що забезпечує легкість монтажу, демонтажу й технічного обслуговування. До рамної конструкції пред'являються жорсткі вимоги щодо міцності, стійкості до деформацій, мінімальної ваги, стандартизації елементів, а також безпечності експлуатації [9].

Щодо вантажонесучого полотна, то найпоширенішими є гумові стрічки, що мають армовану основу з тканини або сталевго троса. Такі стрічки складаються зі скелетної тягової частини та зовнішнього еластичного покриття, яке захищає конструкцію від зношування і механічних пошкоджень. Таке рішення забезпечує тривалий термін експлуатації, високу надійність і універсальність застосування у промисловості.

Основним елементом, що забезпечує подовжню міцність транспортувальної стрічки та визначає її жорсткість у поперечному напрямку, є її силовий каркас. Його зовнішнє покриття виконує захисну функцію: запобігає потраплянню вологи, механічному зносу та забезпечує цілісність конструкції стрічки [10].

Відповідно до нормативного документа ГОСТ 22644-77, типові ширини стрічок варіюються від 300 до 3000 мм. До таких стрічкових систем

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						16
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

висуваються численні технічні вимоги — серед них висока міцність при незначній масі, мала ступінь подовження, гнучкість, а також здатність чинити опір зносу. При проєктуванні конвеєрного обладнання вибір стрічки, як правило, здійснюється на основі стандартів без проведення індивідуального розрахунку її міцності [8].

Механізм натягу служить для забезпечення необхідного початкового зусилля в стрічці, запобігання її провисанню між опорами та компенсації подовження, яке виникає в процесі експлуатації. Крім того, у деяких конструкціях цей механізм відповідає за створення контактного тиску між стрічкою та приводним барабаном — умови, необхідної для ефективної передачі крутного моменту через силу тертя [9].

Сучасні конструкції натяжних пристроїв можуть мати різні варіації, зокрема гвинтово-пружинні рішення, а також автоматизовані системи натягу, які самостійно адаптуються до зміни навантажень.

Опорні елементи ходу — це компоненти, призначені для підтримки стрічки під час її руху з вантажем та для зниження необхідного тягового зусилля. Як правило, у таких системах застосовуються роликові опори, плоскі напрямні або металеві настили. Вони розташовуються як під робочою гілкою, так і під зворотною [4].

Привідний механізм виконує функцію передавання руху стрічці. У випадках, коли довжина конвеєра значна, можливе застосування декількох приводних вузлів, розміщених по трасі.

Технологічні лінії, побудовані на базі безперервного транспорту, часто доповнюються допоміжними модулями, що автоматизують процеси завантаження й вивантаження матеріалів. Ці пристрої можуть виконувати функції зміни напрямку руху, тимчасового зберігання або подальшого переміщення вантажів у межах однієї або декількох транспортних систем. Найбільш поширеними є гравітаційні елементи — зокрема жолоби, воронки, бункери, живильники, вагові пристрої та дозатори. Принцип їхньої роботи ґрунтується на переміщенні матеріалу вниз під впливом сили тяжіння [2].

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						17
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Бункери виступають як накопичувальні резервуари для сипких матеріалів. Вони вбудовуються у транспортно-технологічні системи та забезпечують проміжне зберігання з подальшою дозованою видачею матеріалу. Завантаження таких ємностей здійснюється через верхні або бокові отвори, а розвантаження — через спеціально обладнані випуски у днищі чи стінках. Рух вантажу всередині бункера забезпечується гравітаційними силами. При цьому важливо, щоб геометрія резервуара сприяла повному вивантаженню без залишків та уникненню застійних зон. Крім того, важливо забезпечити постійне надходження вантажу до випускного отвору без утворення порожнеч, які можуть ускладнити потік матеріалу. Розвантаження регулюється за допомогою затворних пристроїв, серед яких можуть використовуватися різні конструкції — засувки, рухомі лотки, обертові сектори, гусеничні або стрічкові транспортуючі механізми [3].

Живильники — це спеціалізовані механізми, які монтуються під випускними частинами бункерів чи воронок і відповідають за рівномірну та керовану подачу вантажу. Продуктивність подачі в них може регулюватися як зміною площі вихідного отвору, так і за рахунок зміни параметрів роботи самого пристрою. Живильниками часто слугують короткі конвеєри, а також обертові диски або барабани, встановлені під випусками. Дозування вантажу може здійснюватися як за обсягом, так і за масою [7].

Вантажі, що підлягають транспортуванню, умовно поділяються на дві основні категорії: насипні та штучні. До останніх належать окремі предмети різноманітної конфігурації — такі як цегла, ящики, металеві заготовки, вузли машин, комплектуючі тощо. Основні характеристики штучних вантажів — це їхні геометричні розміри, маса, форма, а також механічна міцність.

Насипні вантажі — це матеріали, які транспортуються у вільному сипкому стані. До цієї групи відносяться сипучі, зернисті, пилоподібні та кускові речовини, що зберігаються та переміщуються навалом. Серед типових представників цієї категорії — пісок, цемент, глина, зернові культури, овочева продукція, гравій, щебінь, вугілля тощо [7].

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						18
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Насипні матеріали мають низку характеристик, які необхідно враховувати під час вибору транспортувальних механізмів. Серед ключових параметрів — розмір та форма частинок (кусковатість), щільність, вологість, сипкість (рухомість часток), абразивність, а також міцність. Усі ці властивості впливають на конструкцію та експлуатаційні характеристики транспортного обладнання.

Для вантажів, розмір частинок яких перевищує 0,05 мм, застосовується метод грохочення (ситовий аналіз). Під час нього проба матеріалу пропускається через систему сит із різними калібрами отворів. Залишки, що залишаються на кожному ситі, зважують, а отримані значення виражають у відсотках від загальної маси, що дає можливість побудувати графік гранулометричного складу [9].

Ступінь однорідності насипного матеріалу за розміром частинок визначається коефіцієнтом однорідності, який розраховується як відношення найбільшого розміру частинки до найменшого у дослідженій вибірці.

Розмір частинок відіграє вирішальну роль при виборі габаритів основних елементів транспортувального обладнання — таких як лотки, воронки, завантажувальні та розвантажувальні ємності. Для матеріалів із дрібнодисперсною структурою (наприклад, пилоподібних), часто передбачаються спеціальні технічні рішення, що запобігають втратам вантажу та забрудненню навколишнього середовища [8].

Щільність вантажу — це співвідношення маси матеріалу до об'єму, який він займає. Розрізняють кілька видів щільності залежно від стану вантажу: вільно насипану, ущільнену (досягнуту шляхом вібрації чи механічного обтискання), а також щільність у природному стані (наприклад, у вигляді суцільного шару гірської породи або вугілля). Залежно від технології ущільнення, щільність може зростати на 5–50% у порівнянні з вихідною.

Для кількісного оцінювання змін об'єму матеріалу внаслідок його розрихлення використовують коефіцієнт розпушення, що визначається як відношення щільності вантажу в масиві до щільності того ж матеріалу в

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						19
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрихленому стані. Наприклад, у піску цей показник становить приблизно 1,12, а у залізної руди — до 1,6 [9].

Кут природного відкосу визначає нахил конічної поверхні, сформованої вільним насипанням матеріалу, відносно горизонтальної площини. Цей кут залежить від ступеня зчеплення та тертя між частинками. Наприклад, для рідини (вода) цей кут дорівнює нулю. Під час руху сипкого вантажу цей кут зменшується, і для розрахунків використовують модифіковане значення:

За ступенем рухливості частинок вантажі поділяють на три групи [8]:

- Високої рухливості — з кутом відкосу до 30° ;
- Середньої рухливості — $30\text{--}45^\circ$;
- Низької рухливості — понад 45° .

Абразивність вантажу — це здатність його частинок викликати зношення робочих поверхонь устаткування при їхньому взаємному переміщенні. Вона залежить від таких факторів, як твердість, форма та розмір зерен матеріалу. Згідно з класифікацією, всі матеріали розподіляються на чотири групи [8]:

- А — не абразивні (зерно, тирса, паковані вироби);
- В — слабоабразивні (вугілля, глина, пісок, цемент);
- С — середньоабразивні (руда, антрацит, кокс, щебінь);
- Е — сильноабразивні (кварцит, тверді мінерали, поліметалічні руди).

Під час проєктування транспортувальних систем слід обов'язково враховувати не лише параметри самого вантажу, але й характеристики маршруту переміщення. Лише комплексний підхід дозволяє обрати оптимальний тип конвеєра, що забезпечить ефективність та довговічність його експлуатації.

Однією з ключових вимог до електроприводу конвеєрної установки є можливість регулювання швидкості переміщення стрічки відповідно до фактичного навантаження, тобто до потоку матеріалу, який транспортується. У стабільному режимі експлуатації стрічка повинна рухатися з мінімальною лінійною швидкістю в межах $0,7\text{--}0,8$ м/с, що відповідає повзучому режиму [10].

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						20
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У випадках, коли конвеєрна система інтегрована до загального технологічного процесу, її автоматизація повинна узгоджуватись із автоматизованою системою керування всього виробництва. Як правило, для таких конвеєрних ліній система керування має забезпечувати:

- запуск і зупинку окремих конвеєрів у чіткій послідовності, що відповідає логіці виробничого процесу;
- регулювання швидкості транспортування;
- контроль і реалізацію технологічних та аварійних блокувань обладнання.

Несправність одного із вузлів може спричинити збій у роботі всього комплексу, тому до систем автоматизації висуваються підвищені вимоги щодо надійності та рівня захисту [11].

Умови експлуатації стрічкового конвеєра при транспортуванні абразивної гірської породи, такої як базальт, характеризуються наступними факторами [10]:

1. Підвищена зношуваність через абразивність матеріалу;
2. Великий обсяг вантажопотоку;
3. Інтенсивне запилення робочого простору.

Через високий рівень запиленості електродвигун, який приводить у дію конвеєр, повинен мати герметичне (закрите) виконання. Безперервний однонаправлений режим руху вимагає використання двигуна, який працює в тривалому, нереверсивному режимі.

Кусковий характер вантажу спричиняє динамічні удари під час завантаження, що може призводити до виходу з ладу таких елементів як завантажувальні вузли та роlikоопори. Оскільки стрічка є найдорожчим і найвразливішим елементом системи, важливо застосовувати моделі з підвищеною стійкістю до механічного зносу, зокрема при транспортуванні абразивних порід. У місці завантаження стрічки встановлюють ролики з гумовими прокладками або амортизуючі пневмокотки, які пом'якшують удари від великих шматків породи. Для холостої (зворотної) гілки стрічки

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						21
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуються ролики з гумовими дисками, які сприяють очищенню стрічки від залишків матеріалу і покращують її напрямок руху.

Цілі автоматизації роботи конвеєрних механізмів включають [10]:

- підвищення ефективності транспортування;
- забезпечення стабільності технологічного процесу;
- зниження рівня аварійності та пошкоджень.

Основні функції автоматичного контролю стрічкового конвеєра включають [10]:

1. Слідкування за положенням стрічки — недопущення її сходу з роликів, автоматичне повернення у центр, або аварійна зупинка при значному відхиленні.
2. Контроль натягу стрічки — підтримання оптимального натягу, щоб уникнути пробуксовування як при запуску, так і під час роботи.
3. Діагностика стану барабанів — перевірка стану підшипників, валів і контактної поверхні.
4. Виявлення пошкоджень стрічки — зупинка електроприводу у разі виявлення розривів або серйозних порізів.

Висновки

У цьому розділі було детально розглянуто принцип роботи дробарно-сортувального комплексу, що спеціалізується на виробництві щебеню з гірської породи. Описано весь шлях обробки базальтової маси — від початкового завантаження у вигляді великих уламків до отримання готової продукції внаслідок поетапного подрібнення та сортування. Особливу увагу приділено конструкції та технічним характеристикам стрічкових конвеєрів, а також вимогам до електроприводу, що враховують особливості вантажу, режим роботи, зносостійкість обладнання і рівень автоматизації.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						22
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА

Підбір типу стрічки, матеріалу армуючих прокладок та їх кількості здійснюється відповідно до стандартних рекомендацій довідкових джерел з урахуванням специфіки транспортованого матеріалу [10].

Враховуючи фізико-механічні властивості базальту, як основного вантажу, приймається армування стрічки тканинного типу БКНЛ-100 з двостороннім гумовим покриттям. Міцність такої прокладки на розрив становить 100 Н/мм, а її товщина – 1,2 мм. Загальна кількість прокладок у конструкції стрічки – 5. Товщина гумових обкладок становить: з робочого боку – 3 мм, з тильного – 1,5 мм. Попередньо визначена загальна товщина стрічки становить приблизно 10 мм.

Для транспортування сипких вантажів на робочій гілці конвеєра використовується жолобчата форма роlikоопор, тоді як на холостій гілці – плоска. Ширина стрічки розраховується за виразом [10]:

- $Q_{pQ_{\{p\}}}$ – розрахункова продуктивність, т/год,
- M – коефіцієнт типу роlikоопори,
- $K_{\alpha}=0,95K$ – поправочний коефіцієнт на кут нахилу конвеєра,
- $v=2v = 2$ м/с – швидкість руху стрічки,
- $\gamma=1,6$ – середня об'ємна маса вантажу.

Продуктивність уточнюється за формулою [12]:

$$Q_p = Q \cdot K_n \cdot K_t \cdot K_g$$

- Q – номінальна продуктивність;
- $K_n=1,25 \dots 2,0K$ – коефіцієнт нерівномірності завантаження;
- $K_t=0,8 \dots 0,95K$ – коефіцієнт використання часу;
- $K_g=0,96K$ – коефіцієнт технічної готовності.

З урахуванням отриманих даних приймається стрічка шириною 800 мм.

Конвеєрну трасу умовно розділяють на окремі відрізки, послідовно пронумеровані — починаючи з місця, де стрічка сходить із ведучого барабана, і далі по всьому замкненому шляху аж до точки повторного входження стрічки на той самий барабан [13].

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						23
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{1-2} = (q_{px} + q_{\text{л}})l_3w - q_{\text{л}}H$$

$$W_{3-4} = (q_{px} + q_{\text{л}})l_2w$$

$$W_{5-6} = (q_{pp} + q_{\text{л}} + q_{ep})l_2w$$

$$W_{7-8} = (q_{pp} + q_{\text{л}} + q_{ep})l_2w + (q_{\text{л}} + q_{ep})H$$

$$q_{ep} = \frac{Q_p \cdot g}{3,6 \cdot V} = \frac{30 \cdot 9,81}{3,6 \cdot 2} = 40,875 \text{ (H / м)},$$

$$q_{\text{л}} = 0,011 \cdot B \cdot \delta = 0,011 \cdot 800 \cdot 9 = 79,2 \text{ (H / м)},$$

$$q_{px} = \frac{m_x \cdot g}{l_x} = \frac{25 \cdot 9,81}{2,4} = 102,188 \text{ (H / м)},$$

$$q_{pp} = \frac{m_p \cdot g}{l_p} = \frac{25 \cdot 9,81}{1,2} = 286,125 \text{ (H / м)}.$$

$$W_{1-2} = (286,125 + 79,2) \cdot 18,66 \cdot 0,022 - 79,2 \cdot 5 = -321,536 \text{ (H)},$$

$$W_{3-4} = (286,125 + 79,2) \cdot 2 \cdot 0,022 = 7,981 \text{ (H)},$$

$$W_{5-6} = (102,188 + 79,2 + 40,875) \cdot 2 \cdot 0,025 = 20,31 \text{ (H)},$$

$$W_{7-8} = (102,188 + 79,2 + 40,875) \cdot 18,66 \cdot 0,025 + (79,2 + 40,875) \cdot 5 = 789,87 \text{ (H)}.$$

Процес розрахунку стартує від приводного барабана та здійснюється у напрямку холостої гілки конвеєра. Обчислення проводиться на основі формул, які підбираються відповідно до рекомендованих довідкових матеріалів. Значення натягу стрічки в першій контрольній точці обчислюється за відповідним розрахунковим виразом. Сегмент холостого ходу стрічки [10].

$$S_{сб} = S_1 = \frac{K_3 \Sigma W_i}{e^{f\alpha} - K_M K_3}$$

Опір переміщенню стрічки на прямих відрізках траси розраховується згідно з рекомендаціями довідкової літератури. Його значення залежить від умов експлуатації — зокрема, від кута охоплення вантажу та характеристик контактної поверхні між матеріалом і барабаном (у даному випадку маємо сталевий барабан та вологе середовище) [10].

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						24
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальний коефіцієнт, що враховує місцеві опори (включаючи місця переходів, завантаження/розвантаження та точки контакту з опорами), становить[13]:

$$\xi=1,08\div 1,1\backslash$$

Для подальших розрахунків приймається округлене значення:

$$\xi=1,1\backslash$$

Для забезпечення надійності конструкції до уваги береться додатковий коефіцієнт запасу. У розрахунках приймається [10]:

$$k=1,2k$$

$$S_1 = 1,2 \cdot \frac{W_{1-2} + W_{3-4} + W_{5-6} + W_{7-8}}{1,87 - 1,1 \cdot 1,2} =$$

$$= 1,2 \cdot \frac{-321,536 + 7,981 + 20,31 + 798,87}{1,87 - 1,1 \cdot 1,2} = 1083,546 \text{ (H)}$$

Частка 1–2: Навантаження визначається відповідно до умов руху стрічки по прямолінійному сегменту та обчислюється в ньютонах (Н).

Опукла роликів опора: У випадку, коли роликів опора має опуклу форму, спрямовану вниз, натяг стрічки на цій ділянці не виникає, оскільки геометрія не створює умов для появи тягового зусилля.

Робоча гілка стрічки: Частка 2–3 - Сила натягу визначається з урахуванням ваги матеріалу та опорів руху; результат подається в ньютонах (Н). Частка 3–4 - Аналогічно, для наступного сегменту обчислюється зусилля, яке долає сили тертя та інші опори; одиниця виміру — Н. Частка 4–5 - Зусилля розраховується з урахуванням конструктивних особливостей та конфігурації роликів системи на цій ділянці. Частка 5–6 - Проводиться визначення натягу, який необхідний для подолання опору руху стрічки з урахуванням наявних умов навантаження. Частка 6–7 - Виконується аналогічний розрахунок сили натягу на відповідному сегменті траси. Частка 7–8 - Завершальний відрізок у межах цього розрахункового блоку також підлягає визначенню сили, яка протидіє сумарному опору руху [15].

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						25
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок допустимого провисання на активній частині виконується з урахуванням умов переміщення сипких матеріалів [10].

$$h = 1,25 \cdot \frac{q_{zp} + q_l}{g \cdot S_{p \min}} \cdot l_p^2 \leq [h]$$

$$[h] = (0,025..0,0125) \cdot l_{pp} = 0,02 \cdot 1,2 = 0,024 \text{ (м)}$$

$$h = 1,25 \cdot \frac{40,875 + 79,2}{9,81 \cdot 800,791} \cdot 1,2^2 = 0,028 \text{ (м)}$$

$$S_{p \min} \geq [S_{p \min}] = K_e (q_{zp} + q_l) \cdot l_p \cdot \cos \beta =$$

$$= 5 \cdot (40,875 + 79,2) \cdot 1,2 \cdot \cos(15^\circ) = 695,901 \text{ (Н)}$$

$$S_{x \min} \geq 8 \cdot q_l \cdot l_x \cdot \cos \beta =$$

$$= 8 \cdot 79,2 \cdot 2,4 \cdot \cos(15^\circ) = 1468,825 \text{ (Н)}$$

У першу чергу визначається величина натягу стрічки в контрольній точці відповідно до схеми

$$T_4 = T_{зб} + S_2 + S_4 = 8733,3 + 762 + 770 = 10265,3 \text{ (Н)}$$

Щоб забезпечити зазначене зусилля натягу, необхідно прикласти противагу певної маси, величина якої розраховується [10]

$$G_{nn} = 2 \cdot T_4 = 2 \cdot 10265,36 = 20530,725 \text{ (Н)}$$

Найбільше значення натягу спостерігається у місці входу стрічки на ведучий барабан, і саме там визначається пікове навантаження.

$$T_{нб} = T_{зб} + F_{II} + m_{\Sigma} \cdot a_{дон} =$$

$$= 8733,362 + 3964,072 + 110,624 \cdot 0,35 = 12736,152 \text{ (Н)}$$

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						26
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок необхідної потужності приводу здійснюється з урахуванням сумарного опору руху стрічки, її швидкості та ККД привідної системи [12].

$$P_c = \frac{K_3(T_{нб} - T_{зб})V}{\eta} = \frac{1,2 \cdot (12736,152 - 8733,362) \cdot 2}{0,9} = 10674 \text{ (Вт)}$$

У процесі визначення повного опору при стабільному русі стрічки по всій довжині транспортної траси враховуються основні компоненти опору: тертя, маса вантажу, геометричні параметри та умови навколишнього середовища [10].

$$F_c = K_{оп} \cdot L \cdot (q_{гр} + q_{рх} + q_{рр} + 2 \cdot q_{л}) + q_{гр} \cdot H,$$

$$F_c = 0,28 \cdot 21,3 \cdot (40,88 + 102,19 + 286,13 + 2 \cdot 79,2) + 40,88 \cdot 5 = 3711 \text{ Н}$$

Висновки

У межах поточного розділу було здійснено комплексний інженерний аналіз елементів стрічкового конвеєра з урахуванням його експлуатаційних умов та характеристик транспортованого матеріалу. Передусім виконано підбір параметрів стрічки, який включав визначення її геометричних розмірів (зокрема ширини), типу конструкції та матеріалу виготовлення, що забезпечують її придатність до експлуатації в заданих умовах. Враховувалась специфіка транспортування сипких вантажів, що потребує особливої надійності стрічки та стійкості до зношування.

Додатково проведено обґрунтування вибору конструктивного типу роlikоопорної системи, яка забезпечує стійкість і надійну підтримку стрічки по всій довжині траси. З урахуванням конфігурації конвеєра, його довжини, кута нахилу та інших характеристик було здійснено тяговий розрахунок — покроковий процес визначення сумарного опору руху стрічки, що дозволив обчислити сили натягу у критичних точках маршруту її переміщення.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						27
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зокрема, розглянуто ключові вузли — зони входу й виходу стрічки на приводний барабан, де напруження досягає максимальних значень. В рамках цього аналізу визначено не лише величину необхідного натягу, а й підібрано оптимальний діаметр ведучого барабана, який гарантує достатнє зчеплення між стрічкою та поверхнею барабана для передачі крутного моменту без прослизання. Також був обраний ефективний тип натяжного пристрою, який стабілізує положення стрічки в умовах змінного навантаження.

На завершальному етапі розрахунків, враховуючи результати тягового аналізу та механічні характеристики системи, була визначена мінімально необхідна потужність електроприводу — асинхронного двигуна, який здатен забезпечити безперервну та енергоефективну роботу конвеєрного обладнання у встановлених режимах. Вибір двигуна базувався на сумарному опорі, швидкості руху стрічки, передавальному коефіцієнті редуктора та коефіцієнті корисної дії всієї привідної установки.

Таким чином, даний розділ охоплює повний спектр розрахункових процедур, що передують конструкторському проектуванню стрічкового конвеєра. Усі технічні рішення приймалися на основі об'єктивних інженерних розрахунків, з урахуванням практичного досвіду застосування аналогічного обладнання в гірничо-добувній та переробній промисловості

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						28
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З ВИБІР ДВИГУНА ТА СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Відповідно до попередньо визначеної потужності, необхідної для забезпечення стабільної та надійної роботи привідної станції стрічкового конвеєра, було здійснено технічно обґрунтований вибір електродвигуна. У якості приводу було прийнято рішення застосувати трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором моделі 4A160S6У3, який відповідає вимогам надійності, енергоефективності та можливості частотного регулювання [15].

Цей двигун має номінальну потужність 7,5 кВт, що забезпечує необхідний крутний момент для подолання тягових опорів конвеєрної системи в усталеному режимі роботи. Частота обертання його валу становить 1000 обертів за хвилину, що відповідає шести полюсам за частоти мережі 50 Гц. Робоча напруга електродвигуна – 380 В, при цьому він призначений для роботи в трифазній мережі змінного струму [11].

Конструктивно двигун виготовлений у кліматичному виконанні У3, що означає придатність до експлуатації в умовах помірного клімату з захистом від підвищеної вологості та пилу. Ступінь захисту корпусу відповідає стандарту IP54, що забезпечує достатню герметичність для роботи в промисловому середовищі з наявністю пилових та вологих домішок. Система охолодження реалізована за принципом зовнішнього вентилявання, а посадочне виконання відповідає стандарту IM1001, що передбачає горизонтальне кріплення двигуна на лапах.

Завдяки поєднанню достатньої потужності, помірної частоти обертання, стійкої конструкції та можливості інтеграції з частотним перетворювачем, дана модель двигуна є доцільним рішенням для приводу стрічкового конвеєра середньої продуктивності. Такий вибір забезпечує стабільну роботу системи транспортування з потенціалом до впровадження енергоефективного регулювання швидкості в залежності від навантаження [17].

На основі попередньо розрахованих параметрів навантаження, а також з урахуванням необхідного режиму роботи стрічкового конвеєра, визначаємо

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						29
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

доцільне значення передаточного числа редуктора. Це число відіграє ключову роль у формуванні відповідного крутного моменту на приводному валу конвеєра при заданій швидкості обертання двигуна.

З урахуванням технічних та конструктивних характеристик, у якості приводного елемента трансмісії обрано двоступеневий циліндричний редуктор типу 1Ц2У-100, для якого передаточне число становить $i = 12,5$. Таке значення забезпечує відповідне зменшення частоти обертання та підвищення крутного моменту на вихідному валу, що необхідно для подолання опору руху стрічки [15].

Наступним етапом є технічна верифікація обраного електродвигуна — перевірка його на відповідність вимогам експлуатації, зокрема за пусковими характеристиками, здатністю витримувати короткочасні перевантаження, а також тепловою стійкістю. Враховується, що в процесі запуску конвеєра двигун повинен забезпечити розвиток достатнього пускового моменту для подолання статичного тертя та інерційних навантажень, не виходячи при цьому за межі допустимого нагріву обмоток [16].

Для оцінки відповідності двигуна виконується розрахунок моменту опору, що діє на його валу, при відомому значенні передаточного числа редуктора. Момент опору на валу двигуна M_{dM} визначається за формулою [15]:

$$i_p = \frac{D \cdot n \cdot \pi}{60 \cdot V} = \frac{0,5 \cdot 973 \cdot 3,14}{60 \cdot 2} = 12,73 \approx 12,5$$

Розраховане значення крутного моменту порівнюється з номінальним та пусковим моментами електродвигуна. Якщо умови пуску забезпечують перевищення пускового моменту над моментом опору, а перевантажувальна здатність двигуна перебуває в межах допустимих величин, то обраний привід вважається технічно придатним до експлуатації в заданому режимі.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						30
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У результаті такого аналізу підтверджується ефективність спільної роботи двигуна та редуктора, а також відповідність обраної схеми приводу умовам експлуатації стрічкового конвеєра [15].

$$M_{CT} = \frac{k_3 \cdot F_{CT} \cdot D}{2 \cdot \eta \cdot i} = \frac{1,2 \cdot 3711,79 \cdot 0,5}{2 \cdot 0,9 \cdot 12,5} = 98,981 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{11000}{101,898} = 107,951 \text{ (Нм)}$$

$$(M_H > M_{CT} = 107,951 > 98,981)$$

В рамках аналізу працездатності електропривода стрічкового конвеєра необхідно здійснити перевірку обраного електродвигуна на відповідність вимогам перевантажувальної здатності. Цей етап критично важливий, оскільки в процесі експлуатації двигун піддається короткочасним, але інтенсивним навантаженням, особливо у динамічних режимах — під час запуску системи або її раптового гальмування [15].

Відомо, що для конвеєрних систем найбільші механічні навантаження виникають саме в моменти пуску навантаженого стрічкового конвеєра, а також під час аварійного або запланованого гальмування. У зв'язку з цим, для спрощення розрахунків припускається, що момент пуску дорівнює моменту гальмування — тобто розглядається найгірший з можливих сценаріїв дії максимального моменту інерції на валу двигуна [17].

Для виконання оцінки перевантажувальної здатності двигуна необхідно визначити значення динамічного крутного моменту, який прикладається до його вала у зазначених режимах. Цей момент враховує не тільки опір від маси переміщуваного вантажу, але й інерційні складові, що виникають через прискорення (або уповільнення) всіх обертових частин механізму.

Динамічний момент $M_{дин}$ на валу двигуна розраховується за формулою [15]

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						31
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{дин} = \frac{k_3 \cdot (F_{CT} + (m'_\Sigma \cdot a_{дон})) \cdot D}{2 \cdot \eta \cdot i} =$$

$$= \frac{1.2 \cdot (3711,793 + 110,624) \cdot 0.5}{2 \cdot 0.9 \cdot 12,5} = 100,14 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

$$P_H \geq P_c = 11000 \text{ Вт} \geq 10674 \text{ Вт}$$

У результаті комплексного техніко-розрахункового аналізу було підтверджено, що вибраний асинхронний електродвигун повністю відповідає технічним вимогам і експлуатаційним умовам стрічкового конвеєра. Зокрема, проведені обчислення динамічних і статичних режимів роботи приводу показали, що номінальні параметри двигуна дозволяють забезпечити як стійкий пуск системи, так і її стабільну роботу під навантаженням.

У ході дослідження особлива увага приділялася перевірці двигуна на перевантажувальну здатність, адже в реальних умовах виробництва пускові режими часто є найкритичнішими з точки зору навантаження на привід. Наприклад, при запуску повністю навантаженої стрічки або при екстреному гальмуванні системи можуть виникати динамічні навантаження, які значно перевищують номінальні робочі значення. Проведені розрахунки засвідчили, що обраний електродвигун має достатній запас моменту, що дозволяє ефективно долати подібні пікові навантаження без ризику перевантаження або перегріву [18].

Для ілюстрації можна навести типовий приклад: при пуску конвеєра, завантаженого рудною масою, динамічний момент на валу досягає приблизно 1,8–2,2 крат від номінального. Обраний двигун, модель 4A160S6Y3, за своїми характеристиками здатний забезпечити пусковий момент у межах до 2,4 крат від номінального, що підтверджує його придатність для роботи в умовах підвищених вимог до надійності.

Крім того, ураховано теплові характеристики двигуна — він розрахований на тривалий режим роботи з періодичними короткочасними перевантаженнями, що характерно для конвеєрного обладнання, особливо в

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						32
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умовах гірничо-збагачувального або дробильно-сортувального виробництва [19].

Таким чином, за результатами повного циклу перевірок — від механічних навантажень до термічної стійкості — можна зробити обґрунтований висновок, що обраний електродвигун є не лише достатньо потужним, а й енергетично та експлуатаційно ефективним рішенням. Його використання забезпечує надійність приводу, мінімізує ризики зупинок обладнання та відповідає сучасним вимогам до автоматизованих технологічних систем транспортування сипких матеріалів.

Вибір частотного перетворювача

У межах реалізації системи автоматизованого управління стрічковим конвеєром постала задача обробки аналогового сигналу, що надходить із тензOMETричного сенсора, який здійснює вимірювання маси вантажу на стрічці в реальному часі. Цей сигнал є критично важливим для формування адекватного керуючого впливу на електропривод, зокрема – для зміни частоти обертання двигуна з метою адаптації продуктивності конвеєра до поточного навантаження [17].

Традиційно, для реалізації подібного функціоналу використовується окремий програмований логічний контролер (ПЛК), який має вбудовані аналогові входи та забезпечує виконання заданої логіки управління. Проте враховуючи прагнення до раціоналізації витрат на технічне обладнання, було розглянуто альтернативне рішення, яке дозволяє уникнути необхідності використання зовнішнього ПЛК.

Як ефективна заміна була обрана модель частотного перетворювача ABB ACS550-01, що вирізняється тим, що вже у стандартному виконанні містить вбудований функціонально завершений логічний контролер, а також широкий набір аналогових і цифрових входів/виходів. Така архітектура дозволяє не лише підключити тензOMETричний сенсор безпосередньо до пристрою, але й реалізувати алгоритм регулювання швидкості обертання двигуна прямо всередині перетворювача, без застосування зовнішніх обчислювальних або керуючих модулів [15].

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						33
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для прикладу, аналоговий вхід частотного перетворювача може бути налаштований на зчитування сигналу з датчика навантаження, а вбудований ПЛК — запрограмований на виконання логіки, за якою швидкість обертання приводу зменшується або збільшується залежно від рівня заповнення конвеєрної стрічки. Окрім основної функції регулювання, пристрій може також реалізовувати обмеження перевантаження, автоматичний пуск і зупинку, контроль зносу обладнання, а також аварійні відключення у разі перевищення допустимих параметрів [19].

Таким чином, використання перетворювача частоти типу ABB ACS550-01 дозволяє не лише скоротити витрати на додаткове обладнання, а й підвищити рівень інтеграції та адаптивності системи керування, що позитивно впливає на надійність та економічність експлуатації конвеєрного комплексу в цілому.

Датчика ваги

Конвеєрні тензометричні ваги моделі «ВКТ-3» призначені для точного визначення маси сипучих матеріалів, які рухаються стрічковим конвеєром. Ця система забезпечує безперервний моніторинг як миттєвої ваги вантажу, що знаходиться на транспортуючій стрічці в будь-який момент часу, так і накопиченої загальної кількості матеріалу за певний період. Використання ваг «ВКТ-3» дозволяє отримати високоточні дані про обсяги транспортування, що є важливим для автоматизації виробничих процесів і контролю якості продукції [19].

Висновки

У цьому розділі було здійснено вибір асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, моделі 4A1160S11611Y3, який характеризується синхронною швидкістю обертання магнітного поля статора, а також має номінальну механічну потужність, що відповідає вимогам заданої системи. Для керування даним двигуном обрано частотний перетворювач відомої компанії ABB — модель ACS512550-01 з потужністю 11 кВт. Цей пристрій виділяється

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						34
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

широким набором вхідних та вихідних інтерфейсів, що дозволяє інтегрувати його у складні автоматизовані системи. Окрім того, у базовій комплектації він оснащений вбудованим програмованим логічним контролером (ПЛК), який у нашому випадку використовується для точного опрацювання аналогового сигналу, що надходить від тензOMETричного датчика ваг «ВКТ-3». Така конфігурація забезпечує ефективний контроль і регулювання процесу вимірювання ваги сипучого матеріалу на конвеєрі.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						35
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ АД

Далі буде проаналізована математична модель асинхронного двигуна, сформульована у системі координат, яка спирається на взаємодію поточкозчеплень обмоток статора та електричних струмів, що протікають у роторі. Такий підхід дозволяє більш точно описати динаміку електромагнітних процесів у машині, враховуючи взаємозв'язок між магнітними потоками та електричними параметрами, що визначають роботу двигуна в реальному часі. Використання цієї системи координат є ключовим для побудови адекватних моделей керування та імітаційних розрахунків, що відображають поведінку асинхронного двигуна в різних режимах експлуатації [19].

$$\begin{aligned}\dot{\psi}_{1d} &= -\alpha\psi_{1d} + \omega_0\psi_{1q} + \alpha_1L_m i_{2d} + u_{1d} \\ \dot{\psi}_{1q} &= -\alpha\psi_{1q} - \omega_0\psi_{1d} + \alpha_1L_m i_{2q} + u_{1q}, \\ \dot{i}_{2d} &= -\gamma_1 i_{2d} + \omega_2 i_{2q} + \alpha_1\beta_1\psi_{1d} - \beta_1 p_n \omega \psi_{1q} - \beta_1 u_{1d}, \\ \dot{i}_{2q} &= -\gamma_1 i_{1q} - \omega_2 i_{2d} + \alpha_1\beta_1\psi_{1q} + \beta_1 p_n \omega \psi_{1d} - \beta_1 u_{1q}, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\psi_{1q} i_{2d} - \psi_{1d} i_{2q}) - M_c \right] \\ \dot{\Theta}_0 &= \omega_0\end{aligned}\tag{4.1}$$

де: $(\psi_{1d}, \psi_{1q})^T, (i_{2d}, i_{2q})^T, (u_{1d}, u_{1q})^T$ – у представленій математичній моделі застосовується векторне описання ключових фізичних параметрів, таких як поточкозчеплення, електричні струми і напруги, що виникають в обмотках статора асинхронного двигуна. Одночасно враховується кутова швидкість обертання ротора, яка є важливим параметром динаміки системи. Кутова швидкість разом із кутовим положенням обертової системи координат (d-q), що використовується для значного спрощення аналізу електромагнітних процесів, визначається відносно нерухомої системи координат (a-b). Крім того, у моделі враховується параметр частоти ковзання, який характеризує відмінність між швидкістю руху обертового магнітного поля статора і фактичною швидкістю обертання ротора. Включення цих параметрів дозволяє

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						36
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

отримати точне та комплексне уявлення про роботу асинхронного двигуна в різних режимах функціонування [20].

Змінні, які використовуються у рівнянні (4.1), піддаються спеціальним перетворенням, що сприяють більш зручному та ефективному аналізу математичної моделі. Ці перетворення виконані відповідно до певної методики і представлені у наступній формалізованій математичній формі, що дозволяє полегшити подальші розрахунки і забезпечити більшу наочність при дослідженні динамічних характеристик системи [20]:

$$x^{(d-q)} = e^{-j\Theta_0(t)} \cdot x^{(a-b)}, e^{-j\Theta_0} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_0(t) & \sin \Theta_0(t) \\ -\sin \Theta_0(t) & \cos \Theta_0(t) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

У рамках загального підходу до формулювання задачі автоматизованого управління асинхронним електродвигуном, орієнтованого на підтримання заданих цільових параметрів, таких як кутова швидкість ротора та амплітуда вектора потокозчеплення, що виникає в обмотці статора, основні керовані вихідні величини представляються у вигляді відповідних змінних. Ці змінні служать фундаментом для побудови системи регулювання, що забезпечує необхідний рівень точності та стабільності в роботі двигуна відповідно до поставлених технічних вимог [21]:

$$\begin{pmatrix} \omega \\ |\Psi_1| \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \omega \\ (\Psi_{1d}^2 + \Psi_{1q}^2)^{1/2} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Враховуючи, що вектор стану, описаний у рівнянні (4.1), не може бути виміряний безпосередньо, розглянута задача керування приймає форму повністю відкритої (розімкненої) системи. У цьому випадку регулювання визначених у виразі (4.3) вихідних параметрів здійснюється шляхом впливу на двокомпонентний вектор напруги, що подається на обмотку статора асинхронного двигуна. При цьому передбачається, що задані величини ω_s

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						37
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(еталонна кутова швидкість обертання ротора) та $|\Psi_s|$ (еталонна амплітуда вектора потокозчеплення статора) служать орієнтирами, яких потрібно досягти під час роботи приводу. Отже, основним завданням системи регулювання є створення умов для стабільного підтримання цих заданих параметрів, що гарантує ефективне та точне функціонування двигуна в заданому режимі експлуатації [20-23].

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\Psi} = 0 \quad (4.4)$$

$$\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$$

$$\tilde{\Psi} = |\Psi| - \Psi^* \quad (4.5)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\Psi}_{1q} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\Psi}_{1d} = 0 \quad (4.6)$$

$$\tilde{\Psi}_{1q} = \Psi_{1q}$$

$$\tilde{\Psi}_{1d} = \Psi_{1d} - \Psi^* \quad (4.7)$$

Слід відзначити, що перша з умов, наведена у рівнянні (4.7), відповідає орієнтації магнітного поля відповідно до вектора потокозчеплення, що існує в обмотці статора. Важливо акцентувати увагу на тому, що одночасне виконання вимог, визначених у рівняннях (4.4) та (4.6), можливе лише за відсутності навантаження на асинхронний двигун, тобто в разі, коли зовнішній механічний момент дорівнює нулю. У такій ситуації, у сталому робочому режимі, струми ротора зменшуються до мінімальних значень, практично наближаючись до нуля.

Беручи це до уваги, завдання частотного керування можна сформулювати так: необхідно визначити такі керуючі напруги, які забезпечать умови, за яких на валу двигуна відсутнє зовнішнє механічне навантаження, тобто момент, що прикладається до ротора, дорівнює нулю. Це забезпечить оптимальний режим роботи двигуна без додаткових механічних впливів [23].

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						38
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\lim_{t \rightarrow \infty}(\tilde{\omega}, \tilde{\Psi}_{1d}, \tilde{\Psi}_{1q}, \tilde{i}_{2d}, \tilde{i}_{2q}) = 0 \text{ при } M_c = 0 \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\omega}} &= \mu p_n \left[\tilde{\Psi}_{1q} \tilde{i}_{2d} - (\psi^* + \tilde{\Psi}_{1d}) \tilde{i}_{2q} \right] - \frac{M_c}{J} \\ \dot{\tilde{\Psi}}_{1d} &= -\alpha_1 \tilde{\Psi}_{1d} + \omega_0 \tilde{\Psi}_{1q} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2d} - \alpha_1 \psi^* + u_{1d} \\ \dot{\tilde{\Psi}}_{1q} &= -\alpha_1 \tilde{\Psi}_{1q} - \omega_0 \tilde{\Psi}_{1d} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2q} - \omega_0 \psi^* + u_{1q} \\ \dot{\tilde{i}}_{2d} &= -\gamma_1 \tilde{i}_{2d} + (\omega_0 - \omega p_n) \tilde{i}_{2q} + \alpha_1 \beta_1 \tilde{\Psi}_{1d} - \beta_1 p_n \omega \tilde{\Psi}_{1q} + \alpha_1 \beta_1 \psi^* - \beta_1 u_{1d} \\ \dot{\tilde{i}}_{2q} &= -\gamma_1 \tilde{i}_{2q} - (\omega_0 - \omega p_n) \tilde{i}_{2d} + \alpha_1 \beta_1 \tilde{\Psi}_{1q} + \beta_1 p_n \omega \tilde{\Psi}_{1d} + \beta_1 p_n \tilde{\omega} \psi^* + \\ &+ \beta_1 p_n \omega^* \psi^* - \beta_1 u_{1q} \\ \dot{\tilde{\theta}}_0 &= \omega_0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\mu = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} \frac{1}{J}$$

$$u_{1d} = \alpha_1 \psi^*$$

$$u_{1q} = \omega_0 \psi^* \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\omega}} &= \mu p_n \left[\tilde{\Psi}_{1q} \tilde{i}_{2d} - (\psi^* + \tilde{\Psi}_{1d}) \tilde{i}_{2q} \right] - \frac{M_c}{J} \\ \dot{\tilde{\Psi}}_{1d} &= -\alpha_1 \tilde{\Psi}_{1d} + \omega^* p_n \tilde{\Psi}_{1q} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2d} \\ \dot{\tilde{\Psi}}_{1q} &= -\alpha_1 \tilde{\Psi}_{1q} - \omega^* p_n \tilde{\Psi}_{1d} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2q} \\ \dot{\tilde{i}}_{2d} &= -\gamma_1 \tilde{i}_{2d} - \tilde{\omega} \tilde{i}_{2q} + \alpha_1 \beta_1 \tilde{\Psi}_{1d} - \beta_1 p_n \omega^* \tilde{\Psi}_{1q} - \beta_1 p_n \tilde{\omega} \tilde{\Psi}_{1q} \\ \dot{\tilde{i}}_{2q} &= -\gamma_1 \tilde{i}_{2q} + \tilde{\omega} \tilde{i}_{2d} + \alpha_1 \beta_1 \tilde{\Psi}_{1q} + \beta_1 p_n \omega^* \tilde{\Psi}_{1d} + \beta_1 p_n \tilde{\omega} \tilde{\Psi}_{1d} + \beta_1 p_n \psi^* \tilde{\omega} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$V = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\mu} \tilde{\omega}^2 + \frac{1}{L_m} (\tilde{\Psi}_{1d}^2 + \tilde{\Psi}_{1q}^2) + \frac{1}{\beta_1} (\tilde{i}_{2d}^2 + \tilde{i}_{2q}^2) \right] \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{\alpha_1}{L_m} (\tilde{\Psi}_{1d}^2 + \tilde{\Psi}_{1q}^2) + 2\alpha_1 (\tilde{\Psi}_{1d} \tilde{i}_{2d} + \tilde{\Psi}_{1q} \tilde{i}_{2q}) + \\ &+ \omega^* p_n (\tilde{\Psi}_{1d} \tilde{i}_{2q} - \tilde{\Psi}_{1q} \tilde{i}_{2d}) - \frac{\gamma_1}{\beta_1} (\tilde{i}_{2d}^2 + \tilde{i}_{2q}^2) \end{aligned} \quad (4.13)$$

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						39
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\dot{\mathbf{V}} = \dot{\mathbf{V}}_1 + \dot{\mathbf{V}}_2 \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_1 = & -\frac{\alpha_1}{L_m} \rho_1 (\tilde{\psi}_{1d}^2 + \tilde{\psi}_{1q}^2) + 2\alpha_1 (\tilde{\psi}_{1d} \tilde{i}_{2d} + \tilde{\psi}_{1q} \tilde{i}_{2q}) - \\ & - \left(\alpha_1 L_m + \rho_2 \frac{R_2 L_1}{L_m} \right) (\tilde{i}_{2d}^2 + \tilde{i}_{2q}^2) \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_2 = & -\frac{\alpha_1}{L_m} (1 - \rho_1) (\tilde{\psi}_{1d}^2 + \tilde{\psi}_{1q}^2) + \omega^* p_n (\tilde{\psi}_{1d} \tilde{i}_{2q} - \tilde{\psi}_{1q} \tilde{i}_{2d}) - \\ & - (1 - \rho_2) \frac{R_2 L_1}{L_m} (\tilde{i}_{2d}^2 + \tilde{i}_{2q}^2) \end{aligned}, \quad (4.16)$$

де $0 < (\rho_1, \rho_2) < 1$.

$$\rho_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{L_1^2}{L_m^2} \right) \rho_2} \quad (4.17)$$

$$|\omega^* p_n| < 4 \left[\frac{\left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{L_1^2}{L_m^2} \right) \rho_2}{1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{L_1^2}{L_m^2} \right) \rho_2} \right] (1 - \rho_2) \frac{R_1 R_2}{L_m^2} \quad (4.18)$$

За умови виконання зазначених критеріїв, відповідні керуючі сигнали утримуються в межах допустимих значень, що гарантує стабільність системи. Аналогічно, згідно з заданими рівняннями, їхні похідні також залишаються обмеженими, що свідчить про відсутність неконтрольованих коливань або розбігання параметрів. Виконавши лінеаризацію математичної моделі системи у точці рівноваги, яка співпадає з початком координат і відповідає умові , можна отримати її опис у вигляді канонічної, або стандартної, форми представлення. Такий підхід спрощує подальший аналіз та проектування системи керування, дозволяючи застосовувати класичні методи теорії автоматичного управління [21]:

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						40
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{pmatrix} \dot{\tilde{\psi}}_{1d} \\ \dot{\tilde{\psi}}_{1q} \\ \dot{\tilde{i}}_{2d} \\ \dot{\tilde{i}}_{2q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha_1 \tilde{\psi}_{1d} + \omega^* p_n \tilde{\psi}_{1q} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2d} \\ -\omega^* p_n \tilde{\psi}_{1d} - \alpha_1 \tilde{\psi}_{1q} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2q} \\ \alpha_1 \beta_1 \tilde{\psi}_{1d} - \beta_1 p_n \omega^* \tilde{\psi}_{1q} - \gamma_1 \tilde{i}_{2d} \\ \beta_1 p_n \omega^* \tilde{\psi}_{1d} + \alpha_1 \beta_1 \tilde{\psi}_{1q} - \gamma_1 \tilde{i}_{2q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \beta_1 \psi^* p_n \end{pmatrix} \tilde{\omega} \quad (4.19)$$

$$\dot{\tilde{\omega}} = -\mu p_n \psi^* \tilde{i}_{2q}$$

У цьому випадку функція Ляпунова, яка була визначена у рівнянні (4.12), набуває конкретного, чітко структурованого вигляду. Враховуючи, що матриця системи відповідає критеріям Гурвіца при виконанні нерівності (4.18), можна стверджувати про локальну експоненційну стійкість точки рівноваги лінійаризованої моделі, поданої у рівнянні (4.19). Аналогічно, ця стабільність поширюється і на початкову нелінійну систему, описану рівнянням (4.11), за умови, що підтверджено у роботі [10].

З практичної точки зору це означає, що за дотримання умови, консервативна нерівність (4.18) виступає гарантом асимптотичного регулювання системи поблизу точки рівноваги. При цьому забезпечується стабільне збереження величини модуля вектора потокозчеплення, а також правильна орієнтація магнітного поля за вектором потокозчеплення статора. Важливо зауважити, що ця умова є достатньою — вона впливає з застосування класичного методу Ляпунова, який використовується для аналізу стійкості динамічних систем [15].

Проте, якщо умова не виконується, асимптотичне регулювання параметрів системи порушується. У цьому випадку поведінка системи у відповідь на зовнішні збурення описується рішеннями нелінійної системи (4.11). Водночас навіть у таких умовах система зберігає локальну стійкість, якщо амплітуда збурень залишається обмеженою.

Для визначення точних фізичних значень миттєвих напруг, які необхідно прикладати до обмоток асинхронного двигуна для реалізації заданого режиму роботи, слід скористатися математичними співвідношеннями, представленими

у рівняннях (4.2) та (4.10). Ці рівняння дозволяють здійснити перехід від узагальненої векторної моделі керування до конкретних електричних параметрів, що реалізуються безпосередньо на фазах двигуна. Таким чином, з їхньою допомогою можна здійснити розрахунок фазних напруг, необхідних для точного керування електромеханічною системою згідно з заданими динамічними характеристиками [15].

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0(t) & -\sin \theta_0(t) \\ \sin \theta_0(t) & \cos \theta_0(t) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \psi^* \\ \omega^* p_n \psi^* \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

$$\dot{\theta}_0 = \omega^* p_n$$

Варто особливо відзначити, що для успішного впровадження алгоритму частотного керування, наведеного у формулі (4.21), необхідно мати точне значення параметра ψ^* , яке можна з легкістю визначити шляхом проведення стандартних вимірювальних процедур. Примітно, що реалізація цього алгоритму не передбачає необхідності безпосереднього вимірювання струмів у обмотках статора, а також не вимагає миттєвого визначення кутової швидкості ротора, що суттєво полегшує його практичне застосування.

З метою гармонізації запропонованого алгоритму частотного керування (4.21) з методиками, які часто використовуються у спеціалізованій технічній літературі та галузевих нормах, доцільно представити формулу для розрахунку модуля напруги, що прикладається до обмоток статора. Це забезпечить однозначне трактування результатів та їх коректне порівняння з існуючими підходами [17]:

$$U_{1m} = \left(u_{1d}^2 + u_{1q}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \psi^* \sqrt{\alpha_1^2 + (\omega^* p_n)^2} \quad (4.22)$$

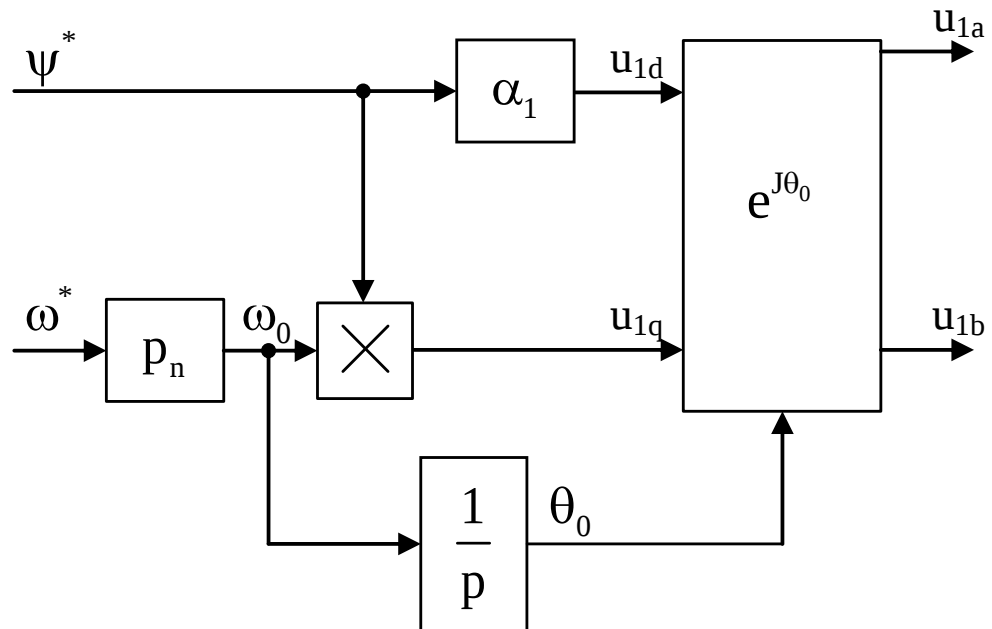


Рисунок 4.1 - Структурна схема U/f

Під час формування експлуатаційних характеристик асинхронного двигуна у діапазоні робочих швидкостей, які перевищують встановлені номінальні параметри, виникає необхідність обов'язкового контролю прикладеної напруги. Ця напруга повинна бути обмежена на рівні, що не перевищує її номінальне значення, з метою забезпечення стабільності роботи та запобігання можливим перевантаженням чи ушкодженням електричного приводу. Досягнення такого обмеження реалізується через зменшення відповідної проєкції вектора напруги, що орієнтована вздовж визначеної осі у системі координат двигуна. Регулювання здійснюється відповідно до спеціального співвідношення, яке визначає пропорційну корекцію напруги з урахуванням робочої частоти і параметрів двигуна, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання та підтримувати ефективність роботи електроприводу на високих швидкостях [17].

$$u_{1d} = \alpha_1 \psi^*$$

$$u_{1q} = \begin{cases} \psi^* \omega^* p_n, & \forall (\psi^* \omega^* p_n) < \sqrt{U_{na}^2 - u_{1d}^2} \\ \sqrt{U_{na}^2 - u_{1d}^2}, & \forall (\psi^* \omega^* p_n) \geq \sqrt{U_{na}^2 - u_{1d}^2} \end{cases}, \quad (4.23)$$

Під час роботи асинхронного двигуна в діапазоні частот, що знаходяться нижче від його номінальних значень, спостерігається значне зниження критичного крутного моменту. Це явище пояснюється тим, що у статорному струмі виникає складова, яка відповідає за створення обертового моменту, що в свою чергу спричиняє ослаблення магнітного поля електромашини. В результаті цього процесу мотор втрачає здатність ефективно протистояти перевантаженням, що негативно позначається на його експлуатаційних параметрах, таких як стабільність обертів та енергоспоживання.

Для точного вимірювання критичного моменту і параметрів струму в обмотках статора використовуються сучасні прилади, зокрема цифрові тензометричні датчики моменту та багатофункціональні електричні аналізатори, наприклад, пристрої Fluke 435 або HIOKI PW3198. Ці інструменти дозволяють реєструвати миттєві значення струму, напруги та моменту, що є необхідним для коректного аналізу динамічних характеристик двигуна при різних режимах роботи [23].

Для ілюстрації: при зниженні частоти живлення з номінальних 50 Гц до 30 Гц, критичний момент може зменшуватися більш ніж на 30%, що призводить до суттєвого зниження продуктивності приводу. Використання вимірювальних приладів у лабораторних умовах або в режимі онлайн-моніторингу дозволяє своєчасно виявити та компенсувати ці зміни шляхом адаптивного регулювання параметрів живлення.

Для компенсації цього ефекту в області низьких швидкостей доцільно штучно підвищувати рівень магнітного потоку, підтримуючи тим самим стабільність роботи приводу. З метою встановлення коректного взаємозв'язку між заданим значенням магнітного потоку та кутовою частотою обертання ротора, доцільно переформулювати вираз для критичного моменту, наведений у рівнянні (5.2), із врахуванням амплітудного значення напруги, що прикладається до обмотки статора [22].

Беручи до уваги формулу для модуля вектора напруги статора, яка наведена у рівнянні (4.22), а також застосування алгоритму частотного регулювання згідно з виразом (4.10), і припускаючи, що кутова швидкість

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						44
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ротора дорівнює $\omega = \omega_1$, можна отримати уточнене значення критичного моменту, що дозволить більш точно оцінити експлуатаційні можливості двигуна у даному режимі [25].

$$M_k = \frac{3p_n U_{1m}^2}{4\omega^* p_n \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2} \right)} \quad (4.24)$$

$$M_k = \frac{3p_n \Psi^* \left(\alpha_1^2 + (\omega^* p_n)^2 \right)}{4\omega^* p_n \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 \cdot (\omega^* p_n)^2} \right)} \quad (4.25)$$

$$M_{kn} = \frac{3p_n \Psi^* \left(\alpha_1^2 + \omega_{0n}^2 \right)}{4\omega^* p_n \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 \cdot \omega_{0n}^2} \right)} \quad (4.26)$$

$$M_k = M_{kn} \quad (4.27)$$

$$\Psi^* = \Psi_n^* \sqrt{\frac{\omega^* p_n z \left(\alpha_1^2 + \omega_{0n}^2 \right)}{\omega_{0n} z_n \left(\alpha_1^2 + (\omega^* p_n)^2 \right)}}, \quad (4.28)$$

$$\text{де } z = \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 (\omega^* p_n)^2} \right),$$

$$z_n = \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 \omega_{0n}^2} \right).$$

Варто підкреслити, що в практичних умовах рівень ефективності компенсації зниження перевантажувальної здатності асинхронного двигуна суттєво залежить від особливостей його характеристики намагнічування. Зокрема, при спробах збільшити критичний момент у зоні низьких обертів,

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						45
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може виникати явище насичення магнітної системи машини, яке зумовлене зростанням магнітного потоку. Це явище обмежує можливості подальшого збільшення потоку, що накладає певні технічні обмеження на ефективність регулювання та загальну працездатність двигуна в таких режимах роботи [15].

Висновки

У цьому розділі викладено методологію побудови математичної моделі системи частотного регулювання асинхронного двигуна, яка ґрунтується на підтримці постійного лінійного співвідношення між прикладеною напругою та частотою живлення. Детально проаналізовано принцип роботи компенсаційного механізму, що забезпечує збереження перевантажувальної здатності електричного двигуна під час експлуатації в режимах, коли робоча частота є нижчою за номінальне значення. Основним засобом досягнення цієї компенсації виступає штучне збільшення рівня магнітного потоку в машині, що дозволяє підтримувати ефективність та надійність роботи приводу при знижених частотах.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						46
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ АД

У цьому розділі детально описується методика розробки системи частотного керування асинхронним двигуном із застосуванням сучасного частотного перетворювача. Основою цієї системи є трифазний інвертор, який живиться від мережі змінного струму і забезпечує гнучке регулювання параметрів живлення двигуна. Для контролю та аналізу роботи перетворювача і двигуна застосовуються спеціалізовані прилади, такі як осцилографи високої точності (наприклад, Keysight DSOX3104T), цифрові вольтметри та амперметри, а також вимірювачі гармонік (Fluke 434), що дозволяють оцінити якість живлення та коректність формування вихідних сигналів інвертора. Завдяки такому поєднанню апаратних засобів забезпечується ефективне та надійне керування частотою обертання двигуна, що дає змогу адаптувати роботу електроприводу під різні експлуатаційні умови та оптимізувати енергоспоживання [17].

Для подальших аналітичних та інженерних розрахунків приймаються базові технічні характеристики електродвигуна, які слугують відправною точкою для побудови моделі електропривода. В якості номінального значення потужності двигуна використовується величина $P_n = 1,1$ кВт, що відповідає типовому значенню для двигунів загальнопромислового призначення. Коефіцієнт корисної дії електродвигуна, що визначає ефективність перетворення електричної енергії у механічну, приймається рівним $\eta_d = 0,75$. Це значення вказує на те, що 75% спожитої енергії використовується для виконання корисної роботи, а решта втрачається на нагрівання, втрати в магнітному колі та інші паразитні процеси. Живлення двигуна здійснюється від трифазної електричної мережі з лінійною напругою $U_L = 380$ В та частотою $f = 50$ Гц, що є стандартним для промислових мереж у більшості європейських країн. Кількість фаз живлення становить три, що забезпечує рівномірне навантаження на мережу та стабільні умови роботи електроприводу [21].

Всі ці параметри враховуються при побудові математичної моделі системи частотного регулювання, а також у процесі вибору частотного перетворювача, інвертора та елементів захисту й контролю [25].

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						47
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ (В)};$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos(\varphi)} = \frac{11000}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 22,15 \text{ (А)}.$$

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ (В)};$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 22,15 = 31,32 \text{ (А)}.$$

$$I_{MAX} = k_{ov1} \cdot I_{na} = 1,6 \cdot 31,32 = 50,112 \text{ (А)}.$$

$$I_{dc} = \frac{k_{ov1} \cdot P_n}{U_{dcn} \cdot \eta \cdot \eta_{inv}} = \frac{1,6 \cdot 11000}{540 \cdot 0,875 \cdot 0,93} = 40,05 \text{ (А)},$$

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{40,05} = 13,5 \text{ (Ом)}.$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k_p \cdot m \cdot f \cdot R_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,4 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 13,5} = 0,1966 \text{ (мФ)},$$

$$R = \frac{U_{dcmax}}{I_{pmax}} = 22 \text{ (Ом)}.$$

З метою реалізації точного вимірювання струмових характеристик у системі частотного керування було обрано струмовий датчик типу ACS712ELCTR-30A, змонтований на платі GY-712, який широко застосовується в системах керування силовими навантаженнями. Цей сенсор забезпечує надійний контроль струму в колі завдяки вбудованому ефекту Холла та цифровій обробці сигналу. Заявлене виробником номінальне значення струму становить 30 А, а максимальний діапазон вимірювання сягає ± 225 А, що дозволяє застосовувати його не лише у номінальних, але й у перевантажувальних режимах роботи приводу [27].

Для моніторингу напруги на шині постійного струму, яка є виходом після випрямлення мережевого живлення та входом на інвертор, використовується напруговий датчик типу LV 25-NP, який дозволяє реалізувати високоточний вимір напруги у високовольтних колах з гальванічною розв'язкою між первинним і вторинним колом. Цей прилад працює за принципом

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						48
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

трансформаторного ефекту, що забезпечує безпечну передачу сигналів на обчислювальний модуль або мікроконтролер.

Для забезпечення коректної роботи LV 25-NP необхідно підібрати баластний резистор, який обмежує струм у первинному колі та створює відповідну напругу на вході вимірювального блоку. Розрахунок цього опору було здійснюється за законом Ома [5].

Висновок

У цьому розділі було детально розглянуто процес підбору та обґрунтування вибору ключових компонентів, які формують структуру системи керування асинхронним електродвигуном. Особливу увагу приділено вибору частотного перетворювача (наприклад, ABB ACS11513550-01-11A), який забезпечує плавне регулювання частоти живлення двигуна, а також підбору відповідного датчика струму типу A1CS712 для контролю електричних параметрів у режимі реального часу.

Крім того, у систему інтегровано тензометричний конвеєрний датчик ваги ВКТ-3, що дозволяє реалізувати безперервний контроль маси продукції на стрічці транспортера, що є критично важливим для забезпечення точності дозування в автоматизованих виробничих процесах.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						49
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА ДАНИМИ КАТАЛОГУ

У цьому розділі здійснено техніко-експлуатаційне обґрунтування вибору конкретного типу асинхронного електродвигуна, який застосовується як виконавчий механізм у складі системи частотно-регульованого електропривода. Вибраний електродвигун належить до серії 4AA512116B12У3, яка є представником компактних трифазних асинхронних машин із короткозамкненим ротором. Ці двигуни широко використовуються в промисловості завдяки своїм надійним експлуатаційним характеристикам, стійкості до коливань навантаження та сумісності з системами автоматизації.

Основні технічні дані, згідно з паспортом виробника, для даної моделі мають наступний вигляд [17]:

- Потужність при номінальному режимі: 0,12 кіловата;
- Стандартна робоча напруга: 380 вольт (живлення від трифазної мережі змінного струму);
- Робоча частота електромережі: 50 герц;
- Номінальне значення електричного струму: близько 0,43 ампера;
- Конструктивне виконання з одним полюсом: двополюсний варіант ($p = 1$);
- Синхронна швидкість обертання: 3000 обертів за хвилину;
- Реальна (фактична) швидкість вала під навантаженням: приблизно 2800 об/хв;
- Енергетична ефективність (коефіцієнт корисної дії): орієнтовно 67 відсотків;
- Коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)$: приблизно 0,8;
- Клас термічної стійкості обмотки: категорія F;
- Рівень захисту корпусу: IP54 відповідно до міжнародного стандарту IEC 60529;
- Маса обладнання: орієнтовно 4,5 кг.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						50
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Цей електродвигун конструктивно відповідає кліматичному виконанню УЗ (відповідно до класифікації ГОСТ 15150), що допускає його експлуатацію в умовах із помірним кліматом і забезпеченим захистом від потрапляння пилу та вологи [15].

Обраний тип двигуна ідеально підходить для побудови систем автоматизованого регулювання швидкості обертання за допомогою частотного перетворювача. Зокрема, він сумісний із сучасними моделями інверторів, такими як ABB ACS150, Siemens Micromaster 420 або Delta VFD. Завдяки можливості векторного керування струмом, забезпечується плавний пуск, захист від перевантажень та зменшення пускових струмів, що особливо важливо при інтеграції в промислові технологічні лінії [18].

$$\omega_{0n} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314,159 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right)$$

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314,159}{3} = 104,72 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right)$$

$$\omega_n = \omega_{xx}(1 - S_n) = 314,159 \cdot (1 - 0,027) = 101,892 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right)$$

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{11000}{101,892} = 107,957 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 2 \cdot 107,957 = 215,914 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

$$U_n = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ (В)}$$

$$U_n = 220 \text{ В.}$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{11000}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 22,148 \text{ (А)}$$

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ (В)}$$

$$U_{na} = 311 \text{ В.}$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 22,148 = 31,323 \text{ (А)}$$

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						51
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Psi_{1XX} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314.159} = 0.99 \text{ (Вб)}$$

У процесі створення математичної моделі асинхронного електродвигуна (АД) особливе значення має правильний вибір схеми заміщення, яка дозволяє найбільш достовірно відтворити електромагнітні процеси, що протікають у реальній машині. У даному випадку побудова моделі здійснена на основі еквівалентної Т-подібної схеми заміщення, яка зображена на рисунку 6.1. Однак у більшості технічних джерел та паспортних даних двигуна характеристики подаються відповідно до π -подібної (Г-подібної) схеми, поданої на рисунку 6.2 [17].

Оскільки конструктивна структура та розподіл елементів у цих схемах різняться, для забезпечення адекватного моделювання виникає потреба у перерахунку електричних параметрів, щоб адаптувати їх до Т-подібної структури моделі. Цей процес виконується за допомогою спеціальної методики еквівалентного перетворення, яка ґрунтується на збереженні сумарних активних та реактивних опорів у колі, що забезпечує фізичну відповідність моделі до реальної машини [17].

Для переходу від π -схеми до Т-схеми використовується наступна послідовність дій[17]:

1. Обчислення сумарних значень активних і реактивних опорів у гілках π -схеми, що відповідають обмотці статора, магнітному колу та ротору.
2. Розподіл еквівалентних параметрів між елементами Т-схеми, з урахуванням електромагнітного балансу.
3. Застосування відповідних формул перерахунку.
4. Уточнення отриманих значень шляхом застосування емпіричних коефіцієнтів або табличних даних, наведених у нормативній документації, зокрема згідно зі стандартами.

Реалізація цього підходу дозволяє підвищити точність моделювання динамічних та усталених режимів роботи асинхронного двигуна, що, у свою

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						52
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чергу, відкриває можливості для точнішого розрахунку алгоритмів регулювання — як у системах частотного керування, так і при реалізації методів векторного керування [19].

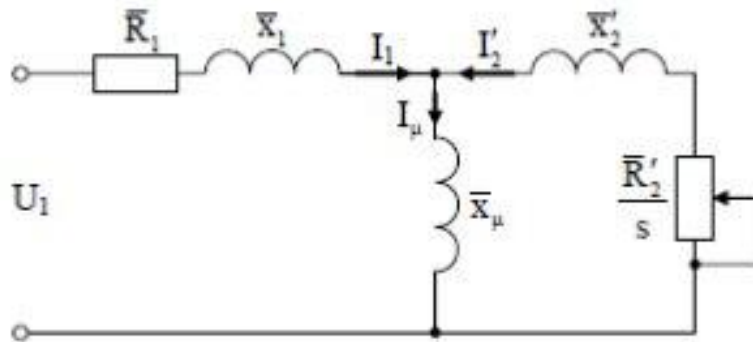


Рисунок 6.1 – Т-подібна схема

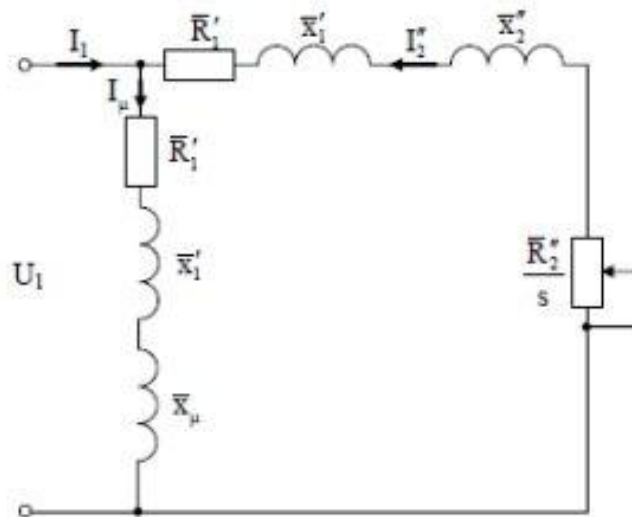


Рисунок 6.2 – Г-подібна схема

$$c_1 = \frac{X_{\mu\Gamma} + \sqrt{X_{\mu\Gamma}^2 + 4 \cdot X'_{1\Gamma} \cdot X_{\mu\Gamma}}}{2 \cdot X_{\mu\Gamma}} = \frac{3 + \sqrt{3^2 + 0,11 \cdot 3}}{2 \cdot 3} = 1,035$$

$$X_{1\Gamma} = \frac{X'_{1\Gamma}}{c_1} = \frac{0,11}{1,035} = 0,106$$

$$R_{1\Gamma} = \frac{R'_{1\Gamma}}{c_1} = \frac{0,16}{1,035} = 0,071$$

$$X'_{2T} = \frac{X''_{2\Gamma}}{c_1} = \frac{0,15}{1,035} = 0,14$$

$$R'_{2T} = \frac{R''_{2\Gamma}}{c_1} = \frac{0,03}{1,035} = 0,028$$

$$X_1 = X_{1T} \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0,106 \cdot \frac{220}{22,15} = 1,055 \text{ (Ом)}$$

$$R_1 = R_{1T} \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0,07 \cdot \frac{220}{22,15} = 0,7 \text{ (Ом)}$$

$$X'_2 = X'_{2T} \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0,14 \cdot \frac{220}{22,15} = 1,39 \text{ (Ом)}$$

$$R'_2 = R'_{2T} \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0,028 \cdot \frac{220}{22,15} = 0,278 \text{ (Ом)}$$

$$X_\mu = X_{\mu\Gamma} \cdot \frac{U_n}{I_n} = 3 \cdot \frac{220}{22,15} = 29,8 \text{ (Ом)}$$

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{\omega_{0n}} = \frac{1,055}{314,159} = 0,003359 \text{ (Гн)}$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X'_2}{\omega_{0n}} = \frac{1,39}{314,159} = 0,004424 \text{ (Гн)}$$

$$L_m = \frac{X_\mu}{\omega_{0n}} = \frac{29,8}{314,159} = 0,095 \text{ (Гн)}$$

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0,00336 + 0,09485 = 0,098 \text{ (Гн)}$$

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						54
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_m = 0,00442 + 0,09485 = 0,099 \text{ (Гн)}$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0,7}{0,098} = 7,131 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \right)$$

$$\sigma_1 = L_2 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right) = 0,099 \cdot \left(1 - \frac{0,095^2}{0,098 \cdot 0,099} \right) = 0,007668 \text{ (Гн)}$$

$$\beta_1 = \frac{L_m}{L_1 \cdot \sigma_1} = \frac{0,095}{0,98 \cdot 0,0077} = 125,953$$

$$\gamma_1 = \frac{R_2'}{\sigma_1} + \alpha_1 \cdot L_m \cdot \beta_1 = \frac{0,0278}{0,0076} + 7,131 \cdot 0,0945 \cdot 125,953 = 124,44 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \right)$$

$$\alpha = \frac{R_2'}{L_2} = \frac{0,278}{0,099} = 2,8 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \right)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right) = 0,098 \cdot \left(1 - \frac{0,0948^2}{0,098 \cdot 0,099} \right) = 0,007586 \text{ (Гн)}$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0,0948}{0,099 \cdot 0,00759} = 125,953$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0,7}{0,0076} + 2,78 \cdot 0,0949 \cdot 125,95 = 125,95 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \right)$$

Вижче наведено перетворення параметрів між Г-подібною та Т-подібною схемами заміщення асинхронного двигуна. Для забезпечення точності математичного моделювання електромагнітних процесів в асинхронному двигуні, що моделюється за Т-подібною еквівалентною схемою заміщення, необхідним є проведення перерахунку параметрів, які в паспортних та каталожних даних зазвичай наведені для Г-подібної (π-подібної) схеми [20].

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						55
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнти перерахування між схемами заміщення. Процедура перетворення параметрів включає застосування спеціальних коефіцієнтів, що дозволяють зберегти енергетичну еквівалентність між елементами обох схем. В основі перерахунку лежать наступні співвідношення: Активний опір обмотки статора, Активний опір магнітного кола (втрати на перемагнічування), Реактивний опір намагнічування, Реактивний опір розсіювання статора, Реактивний опір розсіювання ротора, Представлення параметрів у відносних одиницях.

У системі відносних одиниць параметри Т-подібної схеми нормуються на базові значення, що обираються відповідно до умов номінального режиму роботи двигуна (наприклад, базова потужність, напруга, частота). Це дозволяє спростити порівняння характеристик різних машин.

Після виконання нормування параметри повертаються до абсолютної форми для подальшого використання в симуляційних пакетах (наприклад, MATLAB/Simulink) [21].

Ці дані є ключовими для формування повноцінної моделі електроприводу, здатної враховувати динамічні явища у системах частотного керування.

Далі наведено дослідження динамічних властивостей електроприводу стрічкового транспортера на основі математичного моделювання та чисельного експерименту

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						56
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

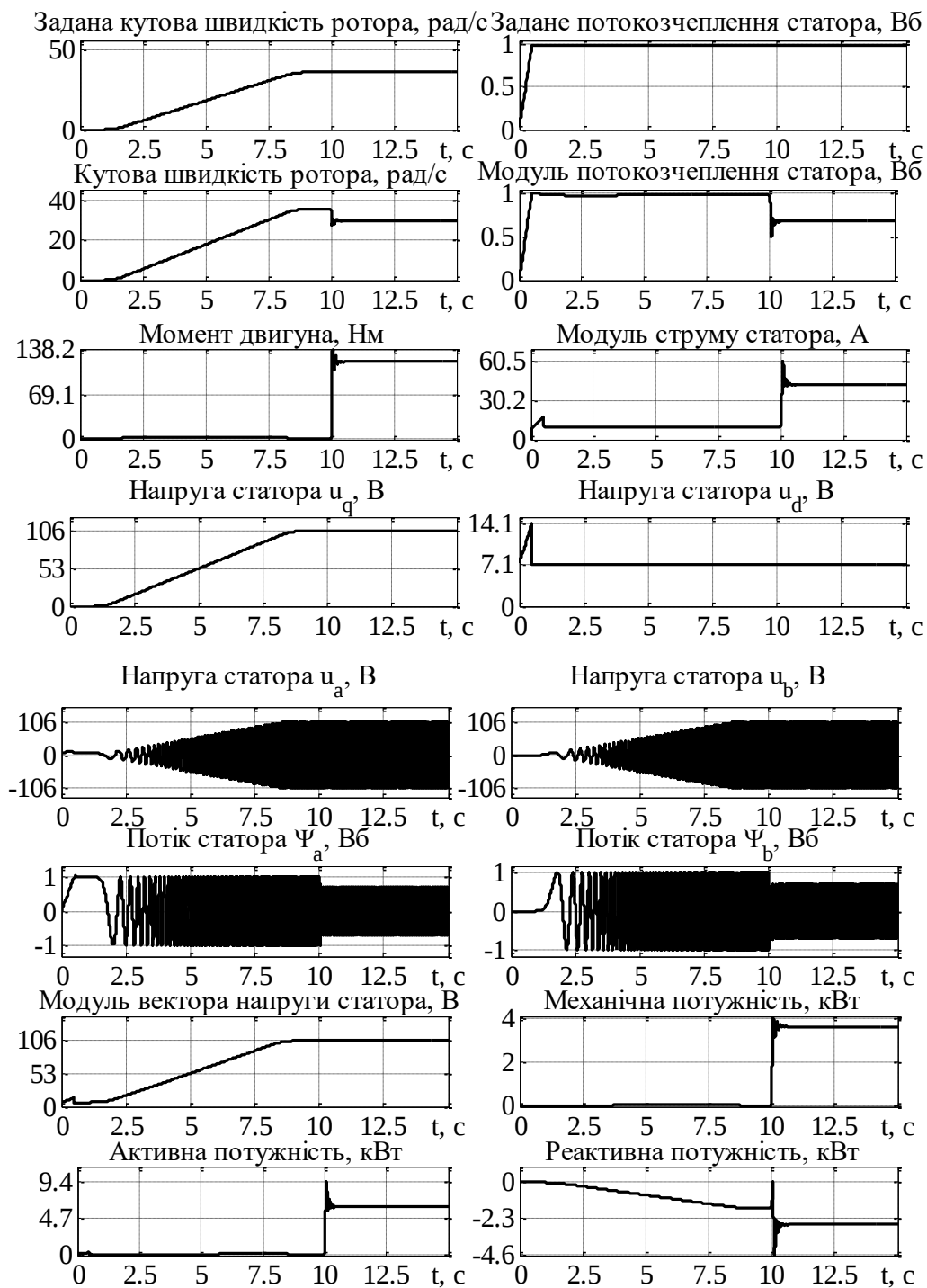


Рисунок 6.3 – Динаміка системи керування частотою при реалізації команди на зміну швидкості обертання $\omega^* = 0,35\omega_n = 35,66$ рад/с

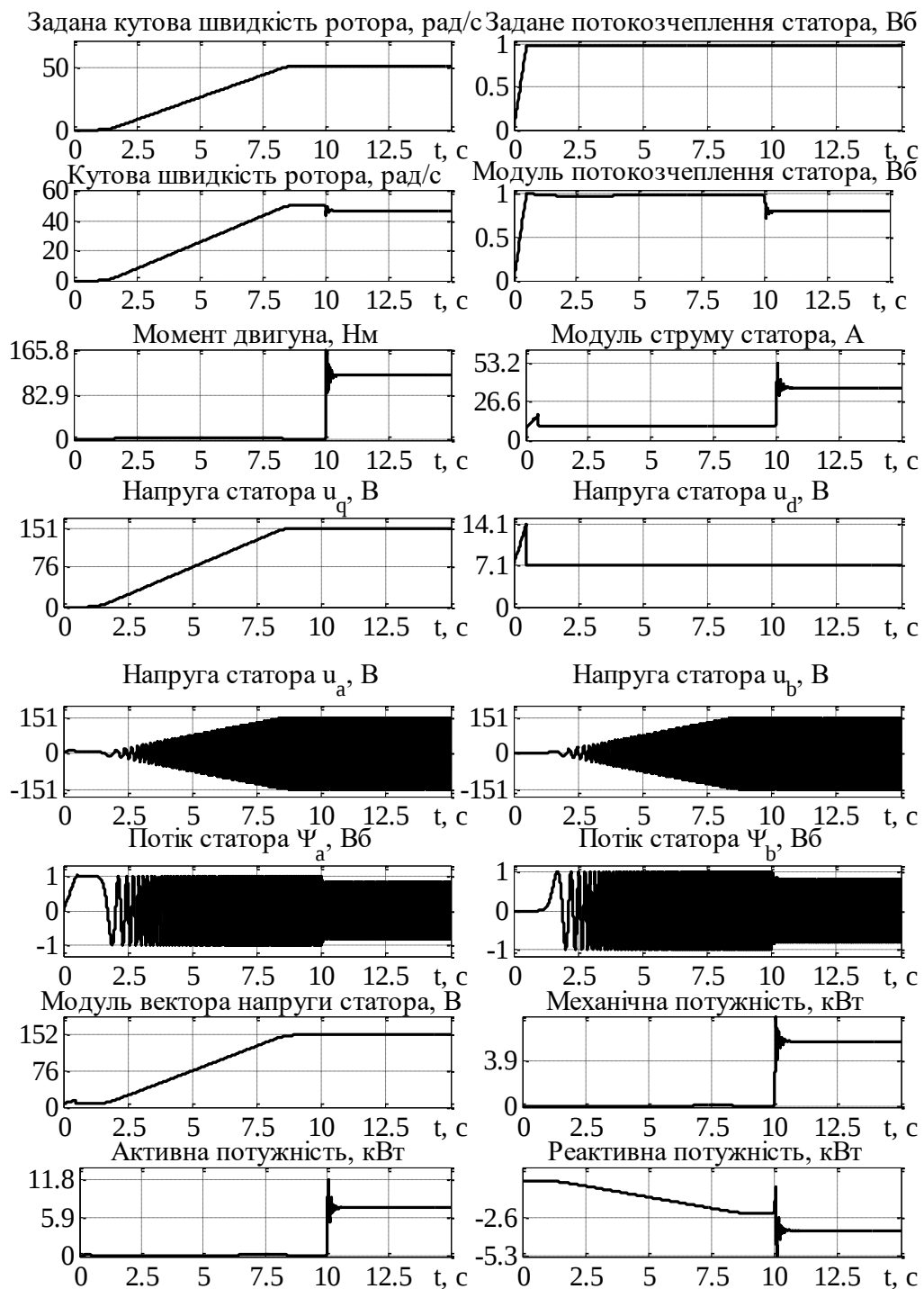


Рисунок 6.4 – Графічний аналіз перехідних режимів асинхронного електропривода при реалізації частотного регулювання зі змінною швидкістю завдання $\omega^* = 0,5\omega_n = 50,95$ рад/с

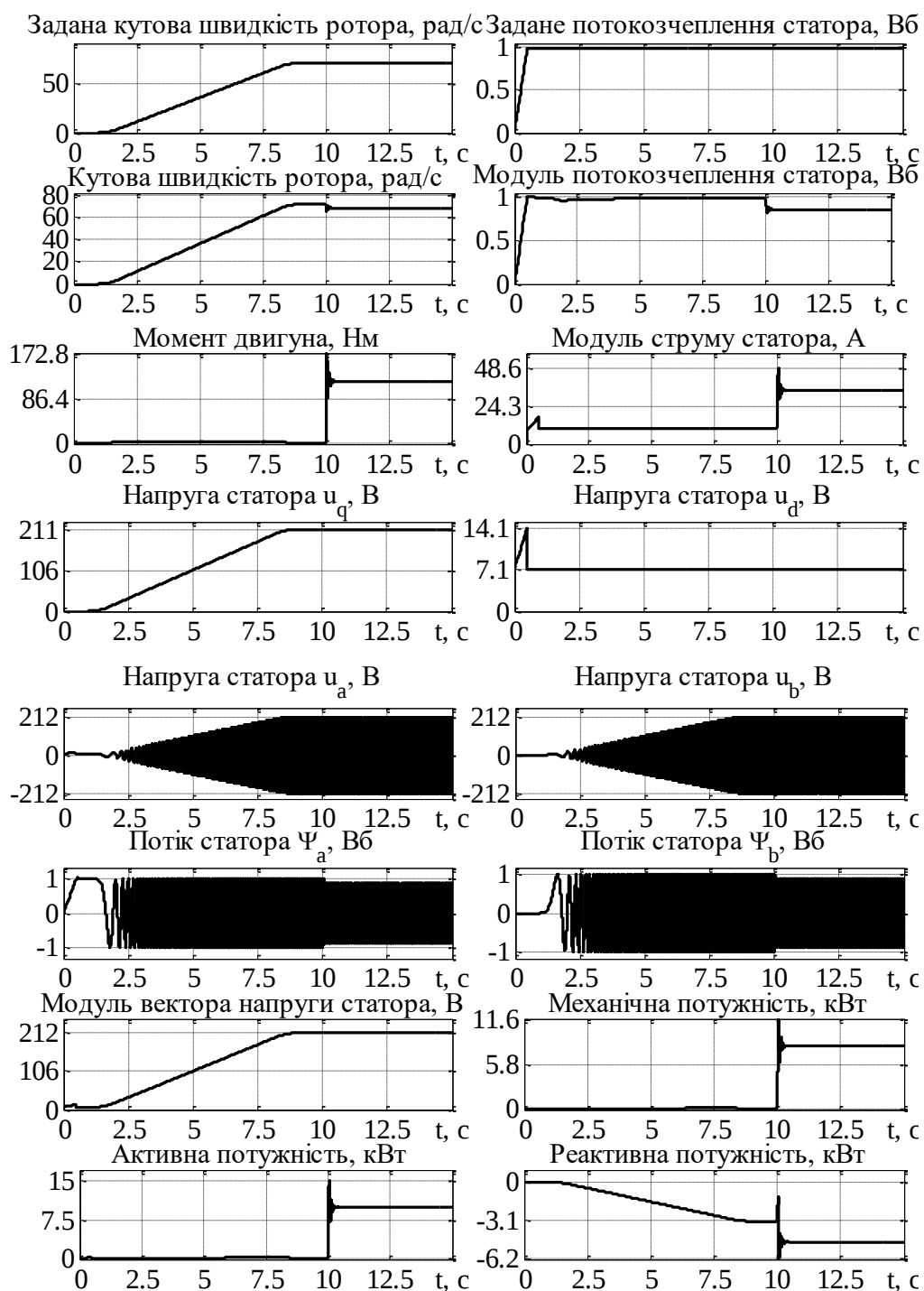


Рисунок 6.5 – Перехідні характеристики електродвигуна в умовах частотно-регульованого керування із застосуванням сигналу завдання на швидкість обертання $\omega^* = 0,7\omega_n = 71,33$ рад/с

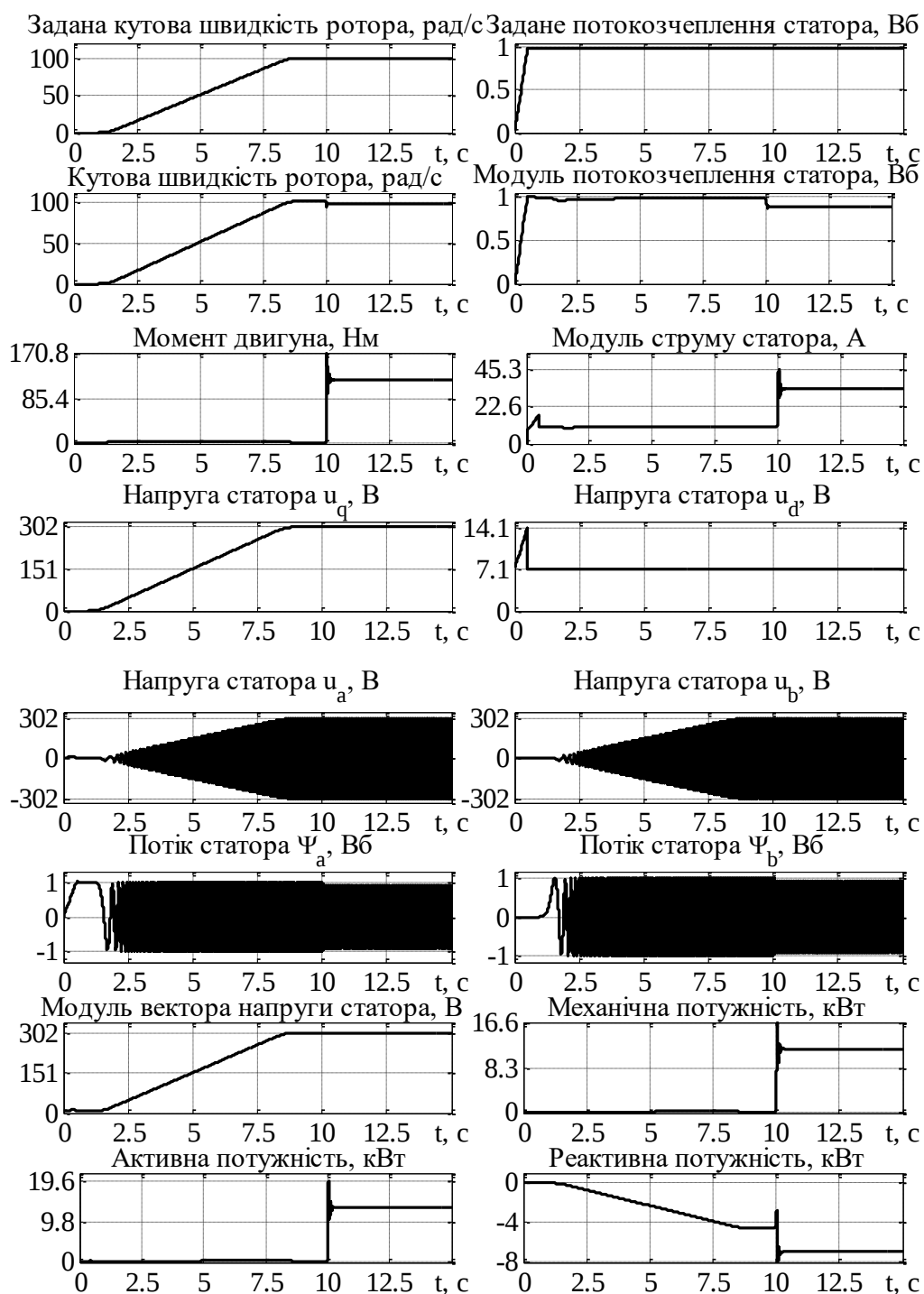


Рисунок 6.6 – Результати моделювання перехідних характеристик асинхронного електродвигуна під час частотно-регульованої роботи з контролем швидкості валу $\omega^* = \omega_n = 101,898$ рад/с

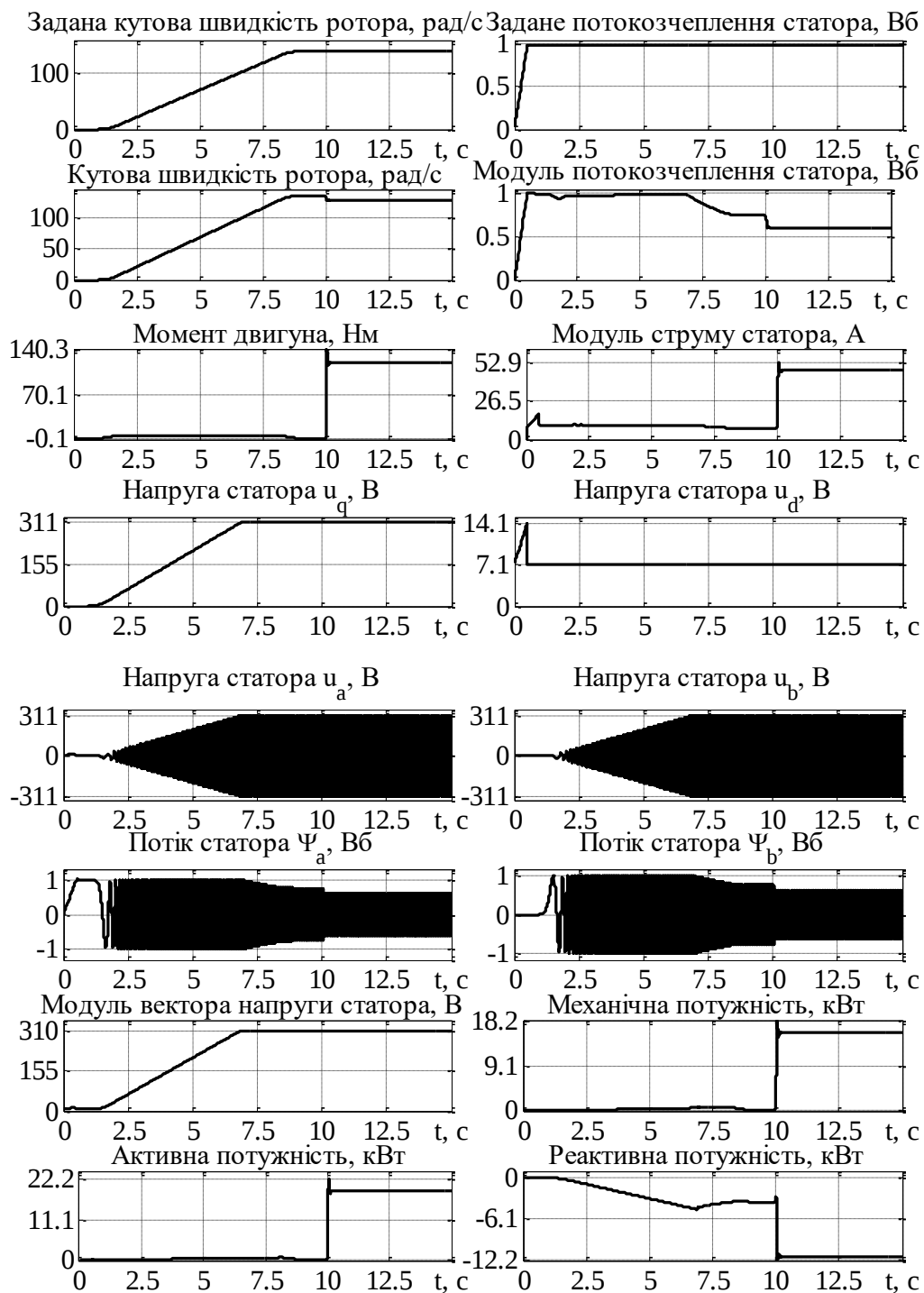


Рис 6.7 – Результати моделювання перехідних характеристик асинхронного електродвигуна під час частотно-регульованої роботи з контролем швидкості валу $\omega^* = 1,35 \omega_n = 137,562$ рад/с

Висновки

У зазначеному розділі здійснено розрахунок ключових показників асинхронного електродвигуна, а також встановлено параметри його Т-подібної замісної схеми. Проведено моделювання динамічних станів пристрою при варіаціях швидкості, що відрізняються від стандартної номінальної величини

Під час використання скалярного (частотного) способу керування у фазах асинхронного двигуна формуються гармонічні струми, що сприяє підтриманню постійного співвідношення між максимальним крутним моментом двигуна та навантажувальним моментом на валу. Інакше кажучи, при зміні частоти амплітуда прикладеної напруги регулюється таким чином, щоб зберегти сталу пропорцію між максимальною величиною крутного моменту і актуальним навантаженням. Це співвідношення в технічній літературі відоме як перевантажувальна здатність.

У випадку, коли перевантажувальна здатність залишається сталою протягом всього процесу регулювання, основні експлуатаційні характеристики асинхронного двигуна, зокрема номінальний коефіцієнт потужності та коефіцієнт корисної дії (ККД), демонструють високу стабільність і практично не зазнають змін. Така стабільність забезпечується завдяки підтримці оптимального співвідношення між максимальним крутним моментом двигуна і моментом навантаження на валу, що дозволяє зберігати ефективність роботи пристрою на всьому діапазоні регулювання частоти обертання.

Скалярний метод керування є одним із найбільш розповсюджених способів регулювання роботи електродвигунів завдяки своїй відносній простоті та здатності забезпечувати ефективне управління основними параметрами двигуна без необхідності в складних додаткових налаштуваннях чи складній електроніці. Ця технологія особливо приваблива тим, що дозволяє експлуатувати пристрої з мінімальним втручанням оператора, навіть якщо використовується базова заводська конфігурація, що значно спрощує впровадження та обслуговування системи керування. Водночас важливо зазначити, що скалярний підхід має суттєві технічні обмеження, особливо помітні при роботі в низькочастотному діапазоні обертання двигуна. У таких

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						62
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умовах точність регулювання швидкості суттєво знижується, що ставить під сумнів ефективність даного методу в застосуваннях, де потрібна висока ступінь контролю і точності в управлінні швидкістю руху. Саме через ці обмеження скалярне керування не завжди може бути рекомендоване для складних задач із жорсткими вимогами до параметрів динамічної роботи двигуна.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						63
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Саме на стадії сортування конвеєри відчують найбільші коливання навантаження, що призводить до нерівномірного розподілу матеріалу на стрічці та, як наслідок, обмежує тривалість роботи електродвигунів у режимі максимальної розрахункової потужності. До основних факторів, які викликають таку нерівномірність, належать періодичні технологічні паузи у виробничому процесі, нестабільна подача сировини, а також варіації в продуктивності дробарного устаткування, що ускладнює підтримання стабільності та ефективності роботи конвеєрних механізмів.

Впровадження частотного перетворювача як інноваційного інструменту для регулювання швидкості обертання електродвигуна створює широкі можливості для значного покращення функціонування привідних систем і ефективного усунення низки типових експлуатаційних проблем. Зокрема, такий підхід дає змогу суттєво зменшити надлишкові крутні моменти та коливання струму, які негативно впливають на знос електричного обладнання, тим самим істотно продовжуючи термін служби двигуна та підвищуючи його надійність в умовах інтенсивної роботи. Окрім цього, завдяки використанню частотного перетворювача вдається підтримувати крутний момент практично на номінальному рівні шляхом стабілізації статичного моменту, що позитивно позначається на динамічних характеристиках приводу, сприяючи більш плавній і стабільній роботі всієї системи. Однією з ключових переваг є підвищена адаптивність системи керування — вона дозволяє швидко і гнучко змінювати алгоритми управління обладнанням та технологічними процесами, що особливо важливо в умовах постійної мінливості виробничих параметрів. Додатково зниження теплових втрат у приводі, яке досягається завдяки оптимізованому плавному регулюванню швидкості, суттєво підвищує енергоефективність системи та знижує потребу у додатковому охолодженні, що позитивно впливає на загальні експлуатаційні витрати. Запровадження частотного перетворювача значно спрощує автоматизацію технологічного процесу, забезпечуючи безперервну та надійну роботу системи без

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						64
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідності постійного контролю або втручання персоналу. Врешті-решт, такий підхід істотно подовжує термін служби механічних елементів конвеєра, зокрема стрічки, яка є не лише найбільш вразливою, а й однією з найдорожчих деталей у конструкції, що має безпосередній вплив на зниження експлуатаційних витрат та підвищення загальної економічної ефективності системи.

У цьому випадку застосування скалярного методу керування можна вважати цілком виправданим і доцільним заходом для модернізації стрічкових конвеєрних систем. Особливо актуальним цей підхід є тоді, коли мінімальна лінійна швидкість, так звана «повзуча» швидкість, що приблизно дорівнює 0,7 м/с, використовується в умовах холостого ходу або при низькій інтенсивності подачі матеріалу на стрічку. Водночас впровадження векторного методу керування відкриває значні перспективи, оскільки дозволяє суттєво розширити діапазон регулювання швидкості електроприводу. Це, у свою чергу, позитивно впливає на загальну економічну ефективність системи, підвищуючи її адаптивність до різних виробничих режимів. Проте слід враховувати, що використання векторного керування значно ускладнює процедуру налаштування частотного перетворювача, а також підвищує вимоги до експлуатації обладнання. Внаслідок цього необхідне залучення додаткових технічних ресурсів, а також кваліфікованого персоналу, що призводить до збільшення витрат на впровадження, технічне обслуговування та підтримку системи в робочому стані.

					ЕМКС 410001 000 ПЗ	Арк.
						65
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		