

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


(підпис)

Інна НЕФЬОДОВА
(ім'я, прізвище)

« 05 » грудня 2024 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти другий (магістерський)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

освітньо-професійна Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

тема «Синтез електромеханічної системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна із перетворювачем частоти»

Виконав(ла)

здобувач(ка) групи БД-П23мг
(шифр групи)

Сергій ІОНЦЕВ
(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

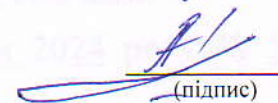
к.ф.-м.н., доц. Інна НЕФЬОДОВА
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

Рецензент роботи

д.т.н., проф. Олексій ЧОРНИЙ
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)


(підпис)


(підпис)


(підпис)

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

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет/ІНІ Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут

Кафедра Електромеханічних та комп'ютерних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Інна НЕФЬОДОВА

(підпис)

(ім'я, прізвище)

«08» жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)

Іонцев Сергій Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Синтез електромеханічної системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна із перетворювачем частоти

керівник роботи Нефьодова Інна Віталіївна, к. ф.-м. н., доцент

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

затверджені наказом по університету від «08» жовтня 2024 року № 5101-5/3236

2. Строк подання здобувачем роботи «02» грудня 2024 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити: В пояснювальній записці необхідно відобразити аналітичний огляд та опис технологічного процесу, формулювання вимог до електроприводу, енергосиловий розрахунок параметрів технологічного об'єкта, обґрунтування вибору потужності двигуна, вибір електродвигуна та силового електрообладнання, математична модель електромеханічного об'єкта, розрахунок статичних та динамічних параметрів електроприводу, синтез системи керування та дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи шляхом моделювання.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Огляд літературних джерел, нових розробок, опублікованих даних та іншої інформації, пов'язаної з темою роботи
2	Обґрунтування теоретичної бази обраної проблеми.
3	Характеристика об'єктів галузі: стан і стратегії розвитку
4	Дослідження синтезу електромеханічної системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна із перетворювачем частоти
5	Розробка електромеханічної системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна із перетворювачем частоти
6	Оформлення першого варіанту тексту, подання його на ознайомлення науковому керівнику
7	Усунення недоліків, написання остаточного варіанту тексту, оформлення дипломної роботи
8	Подання роботи на кафедру, перевірка на плагіат та зовнішнє рецензування роботи
9	Захист дипломної роботи у ЕК

5. Дата видачі завдання «08» жовтня 2024 р.

Здобувач(ка)



(підпис)
Сергій ІОНЦЕВ

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи



(підпис)
Інна НЕФЬОДОВА

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У рамках виконання завдання зі спроектування автоматизованої системи електроприводу було проведено аналітичний огляд, в якому детально розглянуті основні конструктивні елементи та сфери їх застосування. Було здійснено аналіз існуючих технічних рішень у сфері електроприводу, а також проаналізовано технологічні умови і сформульовані вимоги до електроприводу. На основі цих вимог та ознайомлення з діючими в світовій практиці системами було обрано: асинхронний двигун у поєднанні з частотним перетворювачем.

Проведений розрахунок потужності електроприводу дозволив вибрати двигун, після чого була виконана перевірка його пускового моменту та надійності від перевантажень. Оскільки двигун відповідав усім вимогам, він був обраний для подальших розрахунків електричних параметрів та основних елементів силового контуру, що призвело до вибору відповідного перетворювача частоти.

Крім того, у дипломному проекті надано опис векторного керування асинхронним електроприводом. Представлено математичну модель асинхронного двигуна в стаціонарній системі координат, а також алгоритм прямого векторного керування та його структурну схемуп. Завдяки цьому, в програмі MATLAB Simulink була змодельована робота електромеханічної системи при номінальному навантаженні, а також в режимах з різними значеннями моментів навантаження.

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН,
ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, СИНТЕЗ

ABSTRACT

As part of the task of designing an automated electric drive system, an analytical review was conducted, which examined in detail the main structural elements and their areas of application. An analysis of existing technical solutions in the field of electric drives was carried out, as well as an analysis of technological conditions and the formulation of requirements for the electric drive. Based on these requirements and familiarization with the systems operating in world practice, the following was selected: an asynchronous motor in combination with a frequency converter.

The calculation of the power of the electric drive made it possible to select the motor, after which its starting torque and reliability against overloads were checked. Since the motor met all the requirements, it was selected for further calculations of electrical parameters and main elements of the power circuit, which led to the selection of the appropriate frequency converter.

In addition, the diploma project provides a description of vector control of an asynchronous electric drive. A mathematical model of an induction motor in a stationary coordinate system is presented, as well as a direct vector control algorithm and its structural diagram. Thanks to this, the operation of the electromechanical system at nominal load, as well as in modes with different values of load moments, was simulated in the MATLAB Simulink program.

ELECTROMECHANICAL SYSTEM, INDUCTION MOTOR, VECTOR CONTROL, FREQUENCY CONVERTER, SYNTHESIS

ВСТУП

Вибір електроприводу обумовлений режимом його роботи, який може бути виключно руховим, виключно генераторним або зі знакозмінним навантаженням. Для багатьох механізмів безперервної дії зазвичай використовують асинхронні двигуни з контактними кільцями. Основні вимоги до електроприводу - це плавний пуск і гальмування, що є необхідними через великі інерційні маси механічного обладнання. Час пуску та гальмування, який варіюється від 10 до 30 секунд, визначається технічним завданням.

Потужність двигуна розраховується згідно з максимальним тяговим зусиллям і швидкістю (2-4 м/с), враховуючи збільшення моменту на валу під час перехідних процесів. Однією з характерних рис є значний статичний момент спокою, який часто перевищує номінальний, особливо через підвищення в'язкості мастила. Система керування має забезпечувати підтримання або зміну механічних змінних (момент, швидкість, прискорення) відповідно до заданих законів з необхідною точністю, з урахуванням обмежень на електричні і механічні величини для всіх режимів роботи.

Асинхронні двигуни з фазним ротором (АТ) активно використовуються в електроприводах. Основними вимогами залишаються плавний пуск і гальмування, що є наслідком великих мас механічного обладнання та навантаження канатів під час різких змін швидкості. Час пуску і гальмування (10-30 с) також визначається технічним завданням. Потужність двигуна розраховується за максимальним тяговим зусиллям на канаті та швидкістю руху, враховуючи збільшення моменту на валу через момент інерції під час перехідних процесів. Перед вибором електроприводу обов'язково необхідно визначити робочий режим: лише руховий (підйом вантажу), тільки генераторний (опуск вантажу) або зі знакозмінним навантаженням (по черзі підйом і спуск).

1. КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ІЗ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ ТА ЧАСТОТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

Підвісні канатні дороги (ПКД) – це транспортні системи, де канат, що підвішений на опорах над землею, виконує функції тяги та перенесення вантажів.

Класифікація підвісних канатних доріг здійснюється за такими критеріями:

- 1) За призначенням: вантажні та пасажирські;
- 2) За характером руху вантажонесучих елементів: кільцеві та маятникові;
- 3) За конструкцією: одноканатні та двоканатні.

Однією з основних характеристик одноканатних вантажних підвісних доріг є те, що несучі та тягові функції виконує несуче-тяговий канат, який закріплений у формі кільця (див. рисунок 1.1). Вагонетки, які завантажені, пересуваються по жорсткому рейковому шляху до виходу зі станції, де вони з'єднуються з тяговим канатом та продовжують рух по вантажній гілці до розвантажувальної станції Б (див. рисунок 1.1).

Незважаючи на те, що вагонетки здійснюють кільцевий рух, на відрізку між станціями А та Б вони не спираються на гнучкий підвісний шлях, а підвішені до безперервно рухомого несуче-тягового каната, рухаючись разом із ним. [3].

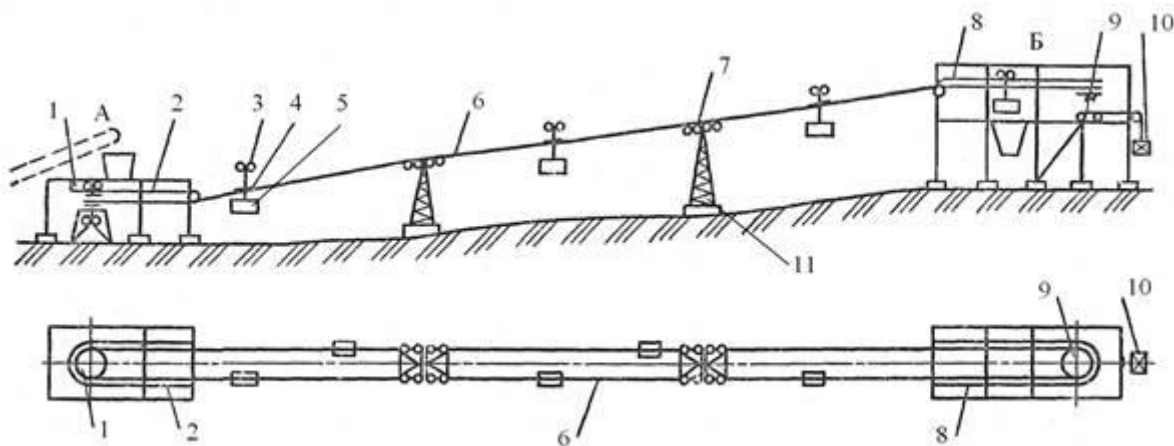


Рисунок 1.1 - Одноканатна підвісна канатна дорога з кільцевим рухом

1 – фрикційний привод; 2, 8 – рельсові колії; 3 – ходові колеса;
4 – зажимний апарат; 5 – вагонетки; 6 – канат; 7 – баланси́рні роликові
батареї; 9 – кінцевий шків; 10 – вантаж натяжного пристрою; 11 – опори

При прибутті вагонеток на станцію вони автоматично відключаються від каната і пересуваються по жорсткому рейковому шляху, опираючись на ходові колеса. Коли вагонетки виходять з рейкового шляху, відбувається автоматичне зчеплення з канатним затискним апаратом. Несуче-тяговий канат приводиться в рух за допомогою фрикційного приводу з канатоведучим шківом.

Однією з характерних рис двоканатних вантажних підвісних доріг з кільцевим рухом є гнучкі підвісні шляхи – несучі канати, по яких переміщаються вагонетки між станціями, використовуючи тяговий канат, закріплений у вигляді кільця. На вантажній станції А вагонетки звільняються від тягового каната за допомогою вимикача та завантажуються з бункера. Після цього вони знову переходять на жорсткий рейковий шлях, що з'єднує несучі канати вантажної та холостої гілок. Вагонетки розвантажуються в бункер, обводять оборотний шків тягового каната, підключаються до нього та

повертаються до станції А по канату, що несе холосту гілку. Кінці несучих канатів натягнуті на станції Б вантажами, тоді як на станції А вони закріплені.

В односмуговій двоканатній підвісній дорозі, як видно на рисунку 1.3, маятниковий (реверсивний) рух виконує лише одна вагонетка, яка рухається по несучому канату. Несучий канат закріплений до якоря і натягнутий контрвантажем, що забезпечує необхідну підтримку та стабільність системи. Тяговий канат, подібно до доріг з кільцевим рухом, підводиться до приводу на одній зі станцій, а на другій станції натягується контрвантажем. Це дозволяє вагонетці здійснювати реверсивний рух, переміщуючись між станціями та виконуючи завантаження і розвантаження вантажів відповідно до потреб. Така конструкція забезпечує ефективність і надійність роботи підвісної дороги, дозволяючи зменшити енергетичні витрати та підвищити продуктивність.

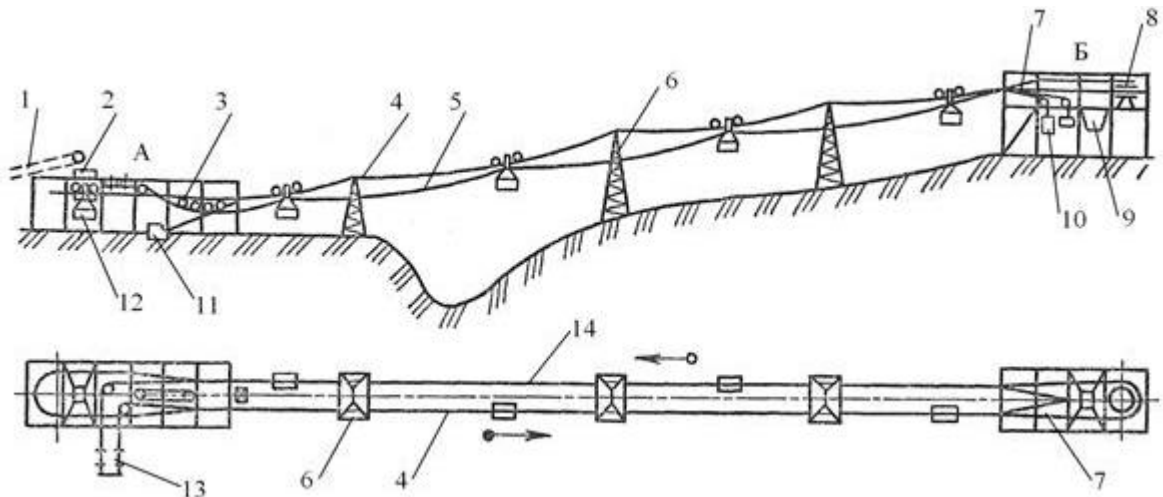


Рисунок 1.2 - Двоканатна вантажна підвісна дорога з кільцевим рухом

1 - завантажувальний конвеєр; 2, 9 - бункер; 3, 7 - рейковий шлях; 4, 14 - несучі канати; 5 - тяговий канат; 6 - опори; 8 - оборотний шків; 10 - вантажі натягача; 11 - закріплюють якоря; 12 - вагонетки; 13 - фрикційний привід

Як привід для односмугових двоканатних підвісних доріг іноді використовують лебідку з барабаном, на якому закріплені два кінці каната – набігаючий та збігаючий. У даній конструкції натягач не потрібний, що



1. функційний принцип; 2. шкір; 3. 5. тваровий конст; 4. людський конст;

6. КОМПОНЕНТЫ 7. РЕЗУЛЬТАТЫ

1. ВНЕШНИЙ ОПТИМАЛЬНЫЙ СИСТЕМУ КОРУВАННЯ

- Ці етапи дозволять розробити сучасну систему електроприводу для підвісної канатної дороги, яка не лише відповідатиме сучасним вимогам безпеки, але й забезпечить високу продуктивність та надійність у роботі. А правильний вибір системи керування двигуном забезпечить точне і ефективне

управління, розрахунок привідного двигуна може гарантувати, що система зможе витримувати навантаження, а розрахунок силових елементів забезпечить стабільність і безпеку в експлуатації. Математична модель дозволить краще зрозуміти поведінку системи, а моделювання при різних режимах роботи допоможе виявити потенційні проблеми та оптимізувати роботу системи.

Таким чином, комплексний підхід до розробки електроприводу для підвісної канатної дороги забезпечить не лише ефективність, але й довговічність та безпеку експлуатації.

Висновки до розділу:

У цьому розділі був проведений всебічний аналітичний огляд основних типів підвісних канатних доріг (ПКД) та їх класифікації. Детально розглянуті ключові конструктивні елементи ПКД, такі як канати, станції, опори та кабіни, а також їх функціональні особливості.

Класифікація підвісних канатних доріг охоплює різні типи, включаючи одноканатні, двоканатні, гірські та міські, що дозволяє визначити їх відповідність певним умовам експлуатації. Водночас проаналізовано сфери застосування ПКД, такі як туристичні, гірськолижні, міські та промислові рішення.

На основі зазначених матеріалів вдалося сформулювати вимоги до електроприводу, враховуючи особливості конструкцій підвісних канатних доріг. Цей аналіз створює основу для подальшого проектування та розробки ефективної системи електроприводу, яка відповідатиме специфічним вимогам підвісних канатних доріг.

2. АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Вибір електроприводу для канатної дороги вимагає попереднього визначення його режиму роботи, що залежить від ухилів траси та завантаження під час робочого періоду. Електропривод може функціонувати в різних режимах, але зазвичай для канатних доріг використовують асинхронні двигуни з контактними кільцями. При розрахунку потужності важливо врахувати збільшення моменту на валу через інерційні маси приводу під час перехідних процесів.

Канатні дороги також мають великий статичний момент спокою, який часто перевищує номінальний через різні фактори, такі як загустіння мастила в деталях, що отримують тертя. Це слід враховувати при проектуванні електроприводу, щоб забезпечити надійну та ефективну роботу в усіх режимах.

Управління системою підвісної канатної дороги вимагає контролю за електроприводом таким чином, щоб механічні змінні (момент двигуна, швидкість і прискорення механізму) підтримувалися на необхідному рівні або змінювалися за заданими законами з відповідною точністю. Оскільки накладені обмеження на змінні електромеханічної системи, керування повинно забезпечувати контроль електричних і механічних величин, дотримуючись допустимих значень для всіх режимів роботи.

Таким чином, спільне завдання керування рухом електропривода підкреслює необхідність регулювання змінних електромеханічної системи для забезпечення її ефективного функціонування за наступними критеріями:

- Забезпечення плавного пуску з обмеженням прискорення та ривка ($M_p \leq M_n$)
- Мінімальний час перехідних процесів (не більше 2с.)
- Забезпечення реверсу електроприводу;
- Мінімальні витрати енергії в процесі регулювання

- Мінімальна похибка швидкості ($\leq 5\%$);
- Забезпечення широкого діапазону регулювання швидкості механізму 10:1
- Мінімальне динамічне навантаження в механічних частинах
- Максимальна точність в динамічних та статичних режимах
- Відсутність коливань та перерегулювання

До того ж система електроприводу повинна включати в себе наступні види захисту:

- Від перевищення швидкості;
- Від струмових перевантажень;
- Від зникнення напруги в ланцюзі управління і силовий ланцюга;
- Від неправильного чергування фаз.

Для вибору електроприводу підвісної канатної дороги важливо попередньо визначити його режими роботи, що залежать від нахилів траси та завантаження. Для електроприводу канатних доріг, як і для інших механізмів безперервного транспорту, широко використовуються асинхронні двигуни (АТ) з фазним ротором.

Основні вимоги до електроприводу канатних доріг включають плавний пуск і гальмування системи. Ці вимоги обумовлені, передусім, великими масами механічного обладнання дороги та перевантаженнями канатів, які виникають при різких змінах швидкості. Час пуску та гальмування електроприводу для кожної канатної дороги визначається технічним завданням, в середньому цей час становить 10-30 секунд.

Потужність приводного двигуна розраховується на основі максимального тягового зусилля на канаті та швидкості руху, що забезпечує ефективну і надійну роботу системи. При розрахунку потужності двигунів канатних доріг, особливо маятникового типу, необхідно враховувати збільшення моменту на валу за рахунок моменту інерції приводу в перехідних процесах.

При виборі електроприводу для канатної дороги важливо попередньо визначити режим його роботи, враховуючи ухили траси та завантаження протягом робочого періоду. Електропривод може функціонувати в кількох режимах: виключно в руховому режимі, здійснюючи підйом вантажів; тільки в генераторному режимі, виконуючи спуск вантажів; або в режимі зі знакозмінним навантаженням, коли двигун працює як в генераторному, так і в руховому режимі при зміні навантаження протягом робочої зміни.

У випадку, коли електропривод працює виключно в руховому режимі, застосовують асинхронний двигун (АД) з фазним ротором і відносно просту схему управління, що включає багатоступеневий пусковий реостат. Управління пуском двигуна здійснюється за допомогою командоконтролера, контакти якого інтегровані в ланцюги котушок реверсивних контакторів та контакторів прискорення. Контроль за пуском двигуна виконується електромагнітними реле часу, котушки яких живляться від випрямлячів.

Розглянемо пускові характеристики асинхронного електроприводу канатної дороги. Пуск двигуна здійснюється в вісім ступенів, що дозволяє знизити коливання моменту двигуна при перемиканні і зменшити коливання прискорення при пуску. Для розглянутої діаграми пусковий момент M коливається в межах 1,1 ... 1,7, тобто відхилення моменту від середнього значення складають 21,5%. При повністю введеному в ланцюг ротора асинхронний двигун розвиває момент менше номінального. Перші дві ступені пуску служать для вирівнювання люфтів у редукторі та ослаблень у канатах і використовуються лише короткочасно під час автоматичного пуску.

Застосування асинхронного електроприводу на канатних дорогах виправдане під час спуску вантажів, оскільки це дозволяє реалізувати рекуперацію енергії в мережу. Пуск двигуна канатної дороги з активним навантаженням можна здійснити простим підняттям гальмівних колодок. Коли швидкість досягає синхронної або близької до неї, двигун підключається до мережі.

Однак безпека такої установки значною мірою залежить від правильності роботи відцентрового реле, яке контролює момент включення. Неправильне функціонування реле або його несправність можуть призвести до серйозних аварій, тому зазвичай цей метод пуску не використовується. Натомість застосовується звичайний реостатний пуск двигуна. Після завершення пуску опір шунтується, і двигун, працюючи в режимі рекуперації, забезпечує гальмування спускаємого вантажу.

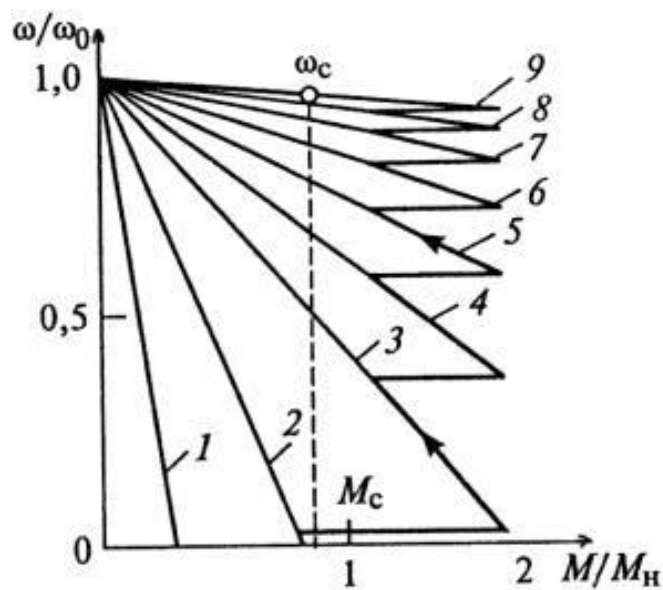


Рисунок 2.1 - Пускова діаграма реостатного пуску електропривода

Процес гальмування канатної дороги при зупинці має свої особливості, що відрізняють його від звичайного. Якщо відключити двигун від мережі і накласти гальмівні колодки, вся енергія рухомих мас повинна бути погашена в гальмівному пристрої. Це значно ускладнює механічну частину гальм та може знижувати надійність їх роботи.

Щоб уникнути зазначених проблем, на канатних дорогах з активним навантаженням використовується динамічне гальмування. Гальмівні колодки накладаються при швидкості, що становить приблизно 1% від номінальної. Режим динамічного гальмування не лише забезпечує безпечне зупинення, але

й дозволяє досягти зниженої швидкості, необхідної для проведення ремонтних і налагоджувальних робіт. [7]

Система Г-Д (гальмування-дослідження) відповідає високим вимогам щодо надійності роботи канатних доріг, особливо при знакозмінному навантаженні та точності зупинки. Ця система забезпечує безпечне і ефективне гальмування, що є критично важливим для експлуатації канатних доріг у різних умовах.

Система Г-Д активно використовується на багатьох об'єктах промислових підвісних канатних доріг у країнах СНД, що підтверджує її надійність та ефективність. Завдяки своїй конструкції та технології, вона дозволяє досягати необхідних стандартів безпеки та продуктивності, що робить її популярним вибором для різних видів канатного транспорту..

Управління системою Г-Д може здійснюватися за допомогою магнітних підсилювачів МУ-В і МУ-Н. Ці підсилювачі живлять обмотку збудження генератора, яка розділена на дві рівні частини і включена в симетричну бруківку. Всі сигнали, що стосуються пуску та гальмування дороги, подаються до керуючих обмоток МУ.

Завдяки цим підсилювачам також здійснюється формування статичних та динамічних характеристик електроприводу. У схемі використовуються від'ємні зворотні зв'язки за швидкістю та струмом з відсічкою, що дозволяє забезпечити стабільність і точність роботи системи.

Сигнал, пропорційний швидкості, подається від тахометричного генератора, що забезпечує контроль за швидкістю руху. Крім того, сигнал на вузол струмообмеження надходить з компенсаційної обмотки, що сприяє захисту системи від перевантажень і підвищує її надійність.

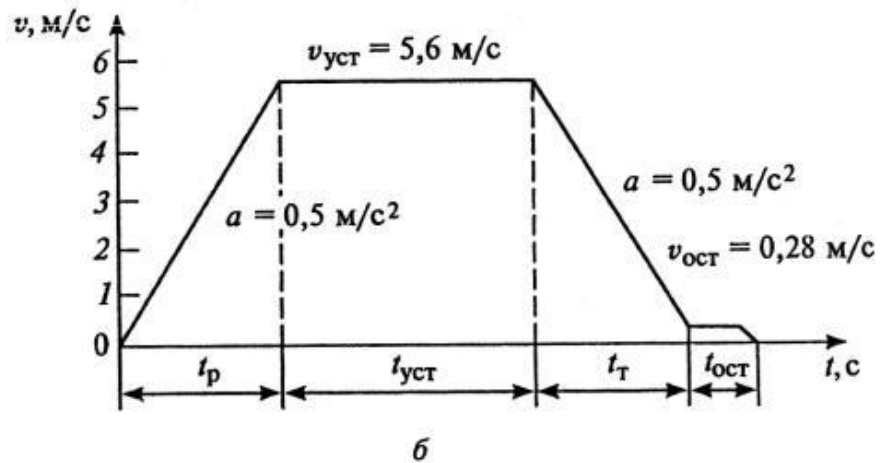
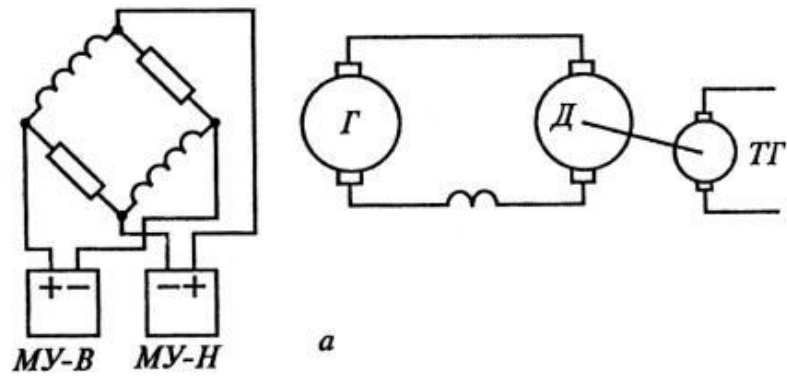


Рисунок 2.2 - Спрощена схема з системою генератор - двигун (а) і діаграма швидкості (б)

Висока безпека та надійність роботи канатної дороги з системою Г-Д забезпечуються завдяки наявності ряду захисних і блокувальних ланцюгів. Ці механізми створюють додатковий рівень захисту, що дозволяє оперативно реагувати на можливі аварійні ситуації та запобігати небезпечним умовам експлуатації.

Щодо електроприводів, найбільш розповсюдженим типом електроприводу для підвісних канатних доріг (ПКД) є регульований привод змінного струму, що базується на асинхронних і синхронних двигунах. Ці двигуни забезпечують необхідну потужність і контроль швидкості, що є критично важливими для безпечного та ефективного функціонування канатної дороги. Регульовані приводи дозволяють точно налаштовувати робочі

параметри, що сприяє оптимізації роботи системи в різних умовах навантаження. [3].

Для установок, де немає потреби в регулюванні швидкості руху та моменту під час пуску, використовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, оснащені подвійною білячою кліткою або глибоким пазом. Ці двигуни характеризуються підвищеним пусковим моментом, що дозволяє їм ефективно запускатися без значних коливань моменту.

Ключовою перевагою асинхронних двигунів є їх здатність забезпечувати відносно стабільний пусковий момент протягом процесу запуску, що зменшує ризик перевантаження системи. Крім того, асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором характеризуються нижчим рівнем нагріву під час тривалого пуску, що підвищує їх надійність і довговічність в експлуатації. Завдяки цим властивостям вони є ідеальними для використання в умовах, де стабільність роботи та зниження теплових навантажень є критично важливими.

Переваги:

- простота роботи;
- простота експлуатації.

Недоліки:

- малий коефіцієнт зчеплення між канатом та барабаном;
- висока ймовірність проковзування канату відносно барабану.

Проблема пуску потужних підвісних канатних доріг успішно вирішується за рахунок використання асинхронних двигунів з фазним ротором. Цей тип двигунів дозволяє значно знизити пускові струми, що є критично важливим для запобігання перевантаження електромережі та зменшення ризику пошкодження обладнання під час старту.

Асинхронні двигуни з фазним ротором також забезпечують формування необхідної характеристики привода, що дозволяє адаптувати роботу системи до специфічних умов експлуатації. Завдяки цим двигунам можна досягти плавного та контрольованого пуску, що підвищує загальну надійність і безпеку роботи канатної дороги. Це робить їх ідеальним вибором для потужних установок, де важливі як економічність, так і ефективність роботи.

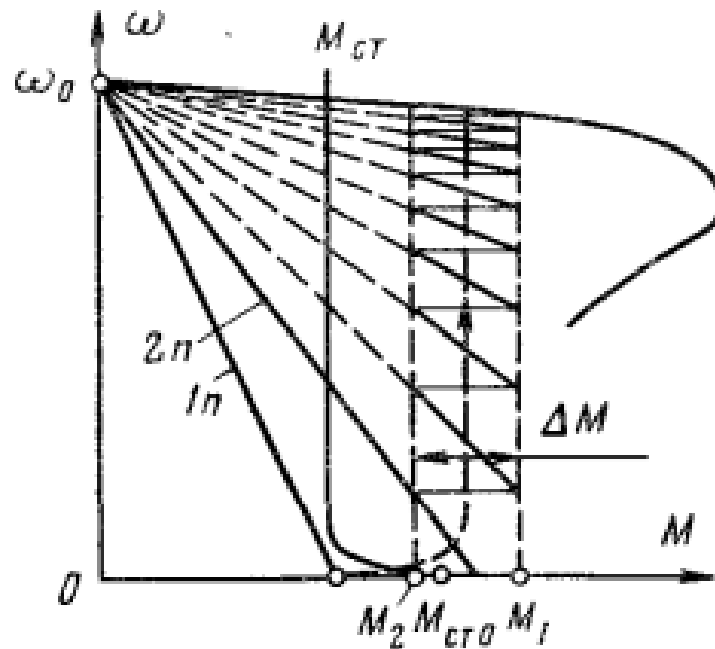


Рисунок 2.3 – Формування процесу пуску канатної дороги

Переваги:

- забезпечення плавного пуску;
- відносно не складна система керування;
- можливість руху на низькій швидкості.

Недоліки:

- велика кількість контактної апаратури, що різко знижує надійність роботи системи керування;
- складні умови експлуатації.

При реостатному способі керування асинхронним двигуном плавність пуску досягається лише за рахунок збільшення кількості пускових ступенів, що може стати обмеженням у певних випадках. Натомість схема керування асинхронним двигуном з тиристорним комутатором в колі ротора має істотні переваги.

Ця схема забезпечує практично ідеальне підтримання струму ротора та моменту двигуна на постійному рівні під час перехідних процесів. Це дозволяє досягти більш плавного та контрольованого пуску, що знижує механічні навантаження на обладнання і підвищує загальну надійність системи. Використання тиристорного комутатора забезпечує ефективне регулювання пускових характеристик двигуна, роблячи цю технологію більш гнучкою та адаптивною до різних умов експлуатації.

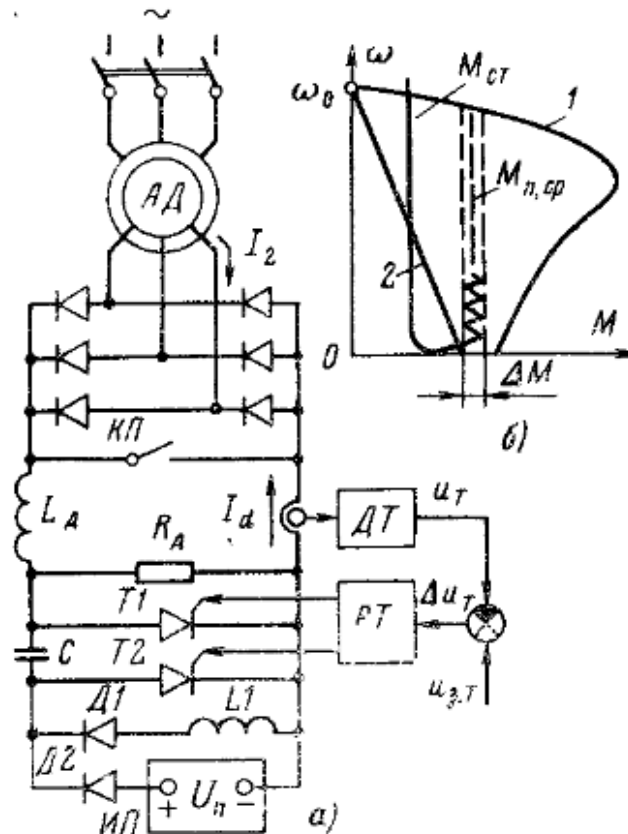


Рисунок 2.4 – Схема (а) і механічна характеристика (б) асинхронного ЕП з тиристорним комутатором

Переваги:

- забезпечення плавного пуску;
- можливість руху на низькій швидкості

Недоліки:

- Складність системи керування;
- Необхідність постійного виміру сигналів з датчиків.

В електроприводах підвісних канатних доріг (ПКД), де існують підвищені вимоги до плавності пуску, використовуються системи, які забезпечують передачу руху від нерегульованого синхронного або асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором на механізм через регульовану муфту. Це може бути гідравлічна, порошкова або електромагнітна муфта.

Схема електроприводу з електромагнітною муфтою ковзання дозволяє досягти високої плавності пуску, оскільки електромагнітна муфта здатна регулювати зусилля, що передається на механізм, завдяки чому зменшується механічне навантаження на двигун і механізм. Механічні характеристики такої системи зазвичай включають графіки залежності моменту та швидкості, які демонструють, як муфта реагує на зміни навантаження і швидкості обертання.

Для точного аналізу та кращого розуміння роботи цієї системи корисно звернутися до рисунка 2.5, де відображені відповідні механічні характеристики, які допомагають візуалізувати переваги використання електромагнітної муфти в електроприводах з підвищеними вимогами до плавності пуску.

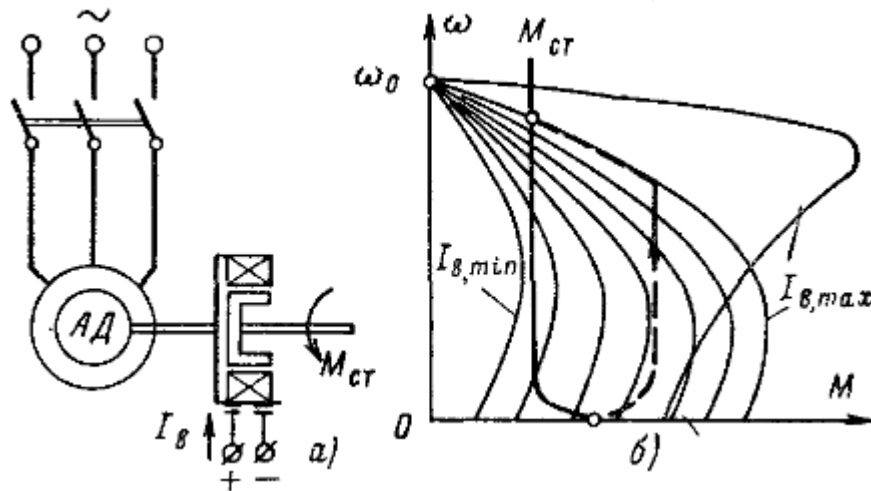


Рисунок 2.5 – Схема (а) і механічна характеристика (б) асинхронного ЕП з електромагнітною муфтою ковзання

Момент, що передається муфтою визначається її магнітним потоком або струмом збудження I_g , регулювання якого в функції швидкості забезпечує необхідне значення пускового моменту.

Переваги:

- Простота і надійність ЕП;
- Простота керування;
- Полегшені умови пуску двигуна при незбудженій муфті;
- Можливість плавної зміни жорсткості механічної характеристики, завдяки чому просто забезпечується рівномірний розподіл навантаження між двигунами при багатодвигунному ЕП.

Недоліки:

- Підвищені втрати ковзання в муфті;
- Значні габарити привода.

Головним елементом схеми частотного керування трифазним асинхронним двигуном є блок перетворювача частоти і напруги (ПЧН), позначений як М (рис. 1.1). На вхід цього блоку подається змінна напруга U_1 частотою f_1 .

Керування роботою перетворювача частоти напруги (ПЧН) здійснюється за допомогою керуючого сигналу U_k , який надходить із керуючого пристрою (КП). Значення цього сигналу безпосередньо впливає на вихідні параметри ПЧН, зокрема на вихідну напругу $U_{\text{вих}}$ та частоту $f_{\text{вих}}$.

Трифазна вихідна напруга $U_{\text{вих}}$, яка підтримує певне співвідношення з частотою $f_{\text{вих}}$, подається на обмотки статора двигуна М. Це забезпечує необхідні рівні частоти обертання n_2 та обертаючого моменту М двигуна. Таким чином, система частотного керування дозволяє точно регулювати роботу двигуна, що є важливим для оптимізації його продуктивності та енергоефективності в різних умовах експлуатації.

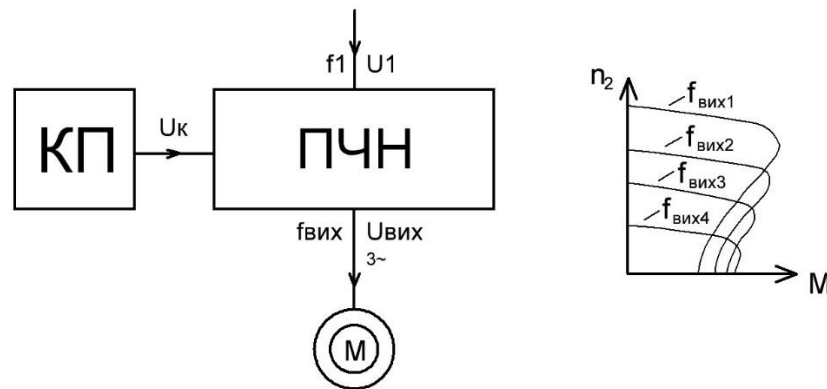


Рисунок 2.6 - Структурна схема та механічні характеристики

Жорсткість механічних характеристик асинхронного двигуна при частотному керуванні залишається незмінною, як показано на рисунку 2.6. Однак при значному зменшенні вихідної частоти $f_{\text{вих}}$ може спостерігатися деяке зниження максимального моменту (перевантажувальної здатності) двигуна. Це зниження пояснюється впливом активного опору обмотки статора. Щоб компенсувати цей вплив, можна збільшити підведену напругу, що дозволяє зберегти максимальний момент двигуна на всьому діапазоні регулювання частоти обертання.

У сучасних пристроях частотного керування переважно використовуються статичні перетворювачі напруги і частоти, які базуються на безконтактних елементах, таких як тиристори. Більшість цих перетворювачів працює за принципом перетворення трифазного змінного струму в постійний, а потім – знову в змінний струм необхідної частоти.

На рисунку 2.7 представлена структурна схема розімкненої системи частотного керування електроприводом змінного струму. З керуючого пристрою (КП) на перетворювач напруги і частоти (ПНЧ) подаються два сигнали: сигнал U_u , який надходить на керований випрямляч (КВ) і визначає величину вихідної напруги, та сигнал U_f , що надходить на керований інвертор (КІ) і визначає частоту змінного струму на виході.

Існують також більш складні замкнуті системи частотного керування, що використовують зворотні зв'язки за напругою, струмом і частотою обертання ротора двигуна. Зворотній зв'язок за частотою обертання забезпечує найбільшу жорсткість механічних характеристик керованого двигуна, що підвищує стабільність його роботи в різних умовах експлуатації.

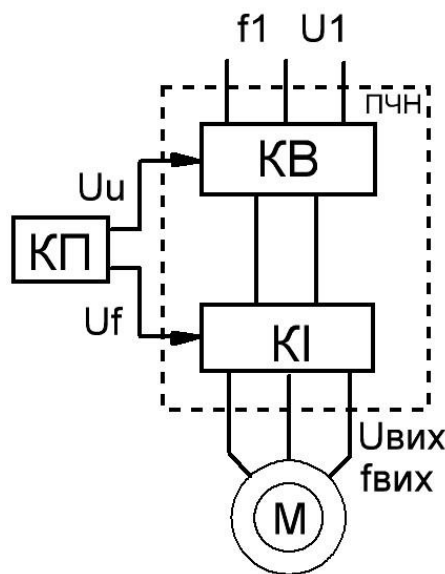


Рисунок 2.7 - Структурна схема розімкненої системи частотного керування

Завдяки високим показникам електропривод застосовується в різноманітних галузях: на транспорті, металургійному виробництві, у верстатобудуванні і т.д.

Переваги:

- Висока точність регулювання швидкості;
- Плавний старт і плавне обертання двигуна у всьому діапазоні частот;
- Швидка реакція на зміну навантаження: при зміні навантаження практично не відбувається зміни швидкості;
- Збільшений діапазон управління і точність регулювання;
- Знижуються втрати на нагрів і намагнічування, підвищується ККД електродвигуна.

Недоліки:

- Необхідність завдання параметрів електродвигуна;
- Великі коливання швидкості при постійному навантаженні;
- Велика обчислювальна складність.

З розвитком сучасної силової електроніки та обчислювальної техніки приводи змінного струму стали значно дешевшими, що робить асинхронні двигуни конкурентоспроможними в порівнянні з двигунами постійного струму. Найбільш поширеним видом приводу є короткозамкнений асинхронний електродвигун, який характеризується простотою конструкції та найменшими капітальними вкладеннями.

Цей тип двигуна використовується в широкому діапазоні потужностей від найменших до декількох тисяч кіловат. Він відрізняється високою надійністю та зручністю в обслуговуванні, що робить його ідеальним вибором для багатьох промислових застосувань.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором особливо успішно використовуються для пуску підвісних канатних доріг. Вони забезпечують плавний пуск канатної дороги та мають важливу перевагу можливість руху на

низьких швидкостях, що є особливо важливим для безпеки та комфорту пасажирів.

Крім того, використання асинхронних двигунів дозволяє обмежити пускові струми, що знижує навантаження на електричну мережу, та забезпечує формування необхідної механічної характеристики електроприводу. Це робить їх ще більш привабливими для різних галузей промисловості та інфраструктури.

Для керування механічними координатами двигуна (швидкість обертання і момент на валу) в електроприводі застосовують три основні методи:

- Зміна напруги прикладеної до двигуна, при цьому частота напруги живлення постійна;
- Зміна амплітуди і частоти прикладеної напруги - скалярний управління;
- Векторне керування.

Теоретично найкращий спосіб керування координатами електроприводу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором полягає в зміні частоти напруги живлення, одночасно впливаючи на її амплітуду. Цей метод називається скалярним управлінням. Сьогодні його реалізують за допомогою перетворювача частоти на основі автономного інвертора.

Скалярне управління дозволяє плавно змінювати швидкість обертання ротора асинхронного двигуна. В залежності від навантажувальних характеристик виконавчого механізму, застосовують різні закони формування частоти та амплітуди напруги, що подається до двигуна. Найпоширенішим з цих законів є закон $(U/f = \text{const})$, який забезпечує оптимальне співвідношення між напругою та частотою для підтримки стабільної роботи двигуна.

Таким чином, усі зазначені переваги в поєднанні з простотою та сучасністю системи керування електроприводом надають вагомі аргументи

для вибору системи: асинхронний двигун з короткозамкненим ротором у комбінації з частотним перетворювачем як привідної станції для підвісної канатної дороги. Ця комбінація забезпечує високу ефективність, надійність і безпеку в експлуатації.

Висновки до розділу:

Проведений аналіз існуючих рішень щодо систем електроприводу, в результаті якого сформульовані вимоги до електроприводу. Встановлено, що в сучасній світовій практиці для електроприводів підвісних канатних доріг використовуються асинхронні двигуни з короткозамкнутим та фазним ротором. Обидва типи двигунів демонструють високі показники якості; однак асинхронні двигуни, зокрема, краще піддаються управлінню з використанням перетворювачів частоти.

Виходячи з вищезазначених вимог та проведеного аналізу, було обрано систему: асинхронний двигун у поєднанні з частотним перетворювачем. Ця система забезпечує оптимальне управління, що дозволяє реалізувати завдання автоматизації та провести розрахунок електромеханічної системи підвісної канатної дороги. Вибір даної конфігурації сприятиме підвищенню ефективності, надійності та безпеки функціонування системи.

3. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ

3.1. Вибір двигуна

Вхідні параметри траси для розрахунку наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Вхідні дані

Продуктивність P , <i>ваг/год</i>	1700
Швидкість v , <i>м/хв</i>	7
Вага одного метра канату m_k , <i>кг/м</i>	2,39
Вага підвіски з гондолою m_n , <i>кг</i>	340
Кут обхвату приводного барабана α_n , <i>градуси</i>	180
Кут обхвату натяжного барабана α_n , <i>градуси</i>	180
Довжина ділянки 1-2 та 9-10 – l_{12} та l_{910} , <i>м</i>	20
Довжина ділянки 2-3 та 8-9 – l_{23} та l_{89} , <i>м</i>	450
Довжина ділянки 3-4 та 7-8 – l_{34} та l_{78} , <i>м</i>	250
Довжина ділянки 4-5 та 6-7 – l_{45} та l_{67} , <i>м</i>	300
Кут нахилу до горизонту ділянки 1-2 та 9-10 – β_{12} та β_{910} , <i>градуси</i>	0
Кут нахилу до горизонту ділянки 2-3 та 8-9 – β_{23} та β_{89} , <i>градуси</i>	30
Кут нахилу до горизонту ділянки 3-4 та 7-8 – β_{34} та β_{78} , <i>градуси</i>	0
Кут нахилу до горизонту ділянки 4-5 та 6-7 – β_{45} та β_{67} , <i>градуси</i>	20
Коефіцієнт опору кареток на горизонтальній ділянці ω	0,027
Коефіцієнт опору на роликівих та поворотних опорах k_1	1,055
Коефіцієнт опору на вертикальному вигині φ_2	1,024
Коефіцієнт опору на вертикальному вигині φ_4	1,017
Висота першого підйому h_1 , <i>м</i>	125
Висота другого підйому h_2 , <i>м</i>	117

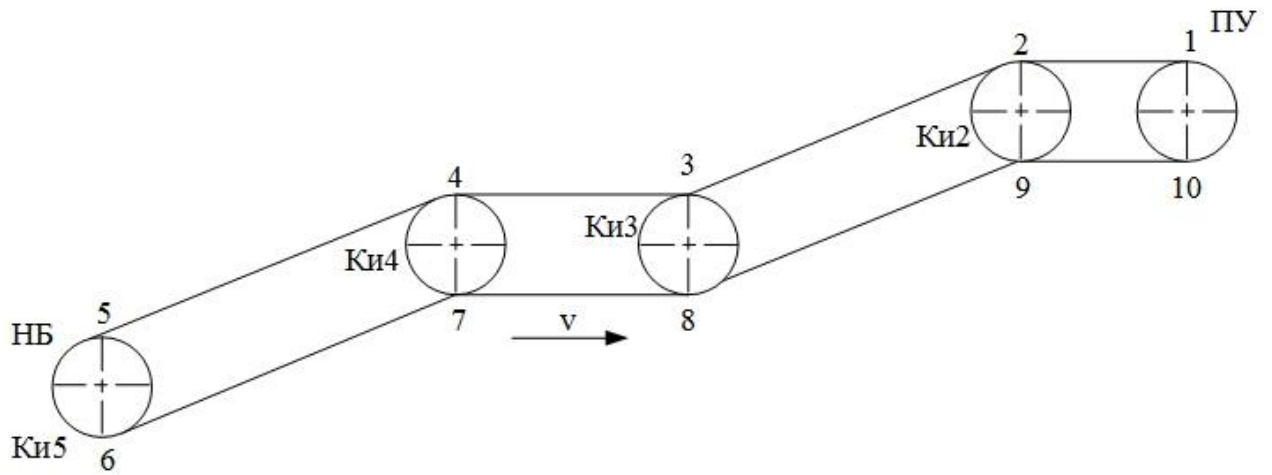


Рисунок 3.1– Профіль схеми підвісної канатної дороги

Виходячи з довжини траси підвісної канатної дороги та її завантаженості, ми обираємо тяговий канат подвійної завивки, який має лінійний контактор типу 6х19+1 ЛК-Р відповідно до стандарту ГОСТ 2688-55. Діаметр цього каната складає 25 мм, а його розривне зусилля дорівнює 36 550 кг.

Згідно заданої продуктивності та швидкості визначимо крок підвіски:

$$t_{n.min} = \frac{a_{max} + \Delta}{\cos \beta} = \frac{4500 + 9000}{\cos 30} = 14892,3(мм), \quad (3.1)$$

де $a_{max} = 4500$ - максимальна довжина вагону-гондоли

$\Delta = 9000$ - рекомендована додаткова відстань між двома підвісками

$\cos \beta$ - найбільший кут нахилу на ділянках вигину в вертикальній площині

Отже беремо крок підвіски рівний:

$$\begin{aligned} t_n &\geq t_{n.min} \\ t_n &= 15(м) \end{aligned}$$

Визначаємо швидкість за умови виконання заданої продуктивності та з обраним кроком підвіски:

$$v = \frac{P \cdot t_n}{3600} = \frac{1700 \cdot 15}{3600} = 7,08 (\text{м} / \text{хв}) \quad (3.2)$$

Як видно з розрахунку, швидкість відповідає заданій, що підтверджує правильність вибору кроку підвіски, який відповідає заданим умовам продуктивності. Загальний вигляд кабіни-гондоли представлений на рисунку 3.2.

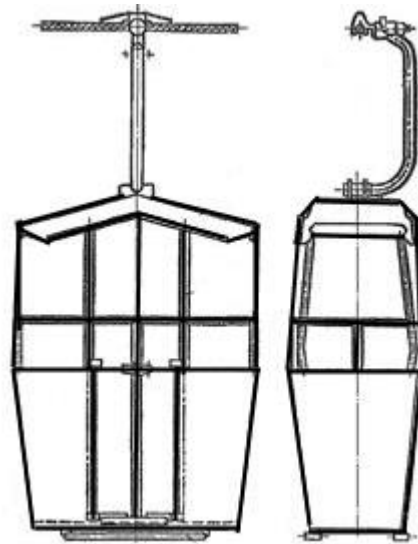


Рисунок 3.2 – Загальний вид кабіни-гондоли

Знайдемо погону маси ходової частини підвісної канатної дороги:

- Ненавантажена кабіна-гондола:

$$q_0 = m_{\kappa} + \frac{m_n}{t_n} = 2,39 + \frac{340}{15} = 25 \text{ (кг/м)}, \quad (3.3)$$

- Кабіна-гондола з пасажирями:

$$q = q_0 + \frac{m_3}{t_n} = 25 + \frac{480}{15} = 57 \text{ (кг/м)}, \quad (3.4)$$

де $m_3 = 6 \text{ чоловік} \cdot 80 \text{ кг} = 6 \cdot 80 = 480 \text{ (кг)}$,

Тоді в точці 6 ми матимемо найменший натяг в замкнутому контурі:

$$S_6 = S_{\min} = (q_0 + m_3) \cdot g = (25 + 480) \cdot g = 4954,05 \text{ (H)} \quad (3.5)$$

Розрахуємо натяг по контуру для інших точок:

$$S_7 = \varphi_7 \cdot (\varphi_7 \cdot S_6 + q \cdot l_{67} \cdot \omega \cdot g + q \cdot h_1 \cdot g) = 1.017 \cdot (1.017 \cdot 4954,05 + 57 \cdot 300 \cdot 0.027 \cdot 9.81 + 57 \cdot 125 \cdot 9.81) = 80814.68 \text{ (H)} \quad (3.6)$$

$$S_8 = S_7 + q \cdot l_{78} \cdot \omega \cdot g = 80814.68 + 57 \cdot 250 \cdot 0.027 \cdot 9.81 = 84589.07 \text{ (H)} \quad (3.7)$$

$$S_9 = \varphi_9 \cdot (\varphi_9 \cdot S_8 + q \cdot l_{89} \cdot \omega \cdot g + q \cdot h_2 \cdot g) = 1.024 \cdot (1.024 \cdot 84589.07 + 57 \cdot 450 \cdot 0.027 \cdot 9.81 + 57 \cdot 117.5 \cdot 9.81) = 162934.372 \text{ (H)} \quad (3.8)$$

$$S_{10} = S_9 + q \cdot l_{910} \cdot \omega \cdot g = 162934.372 + 57 \cdot 20 \cdot 0.027 \cdot 9.81 = 163236.324 \text{ (H)} \quad (3.9)$$

$$S_5 = S_6 / k_1 = 4954.05 / 1.055 = 4695,781 \text{ (H)} \quad (3.10)$$

$$S_4 = 1/\varphi_4 \cdot (1/\varphi_4 \cdot S_5 - q_0 \cdot l_{54} \cdot \omega \cdot g + q_0 \cdot h_1 \cdot g) = 1/1.017 \cdot (1/1.017 \cdot 4695.781 - 25 \cdot 300 \cdot 0.027 \cdot 9.81 + 25 \cdot 125 \cdot 9.81) = 32730,592 \text{ (H)} \quad (3.11)$$

$$S_3 = S_4 - q_0 \cdot l_{34} \cdot \omega \cdot g = 32730.592 - 25 \cdot 200 \cdot 0.027 \cdot 9.81 = 31406,242 \text{ (H)} \quad (3.12)$$

$$S_2 = 1/\varphi_2 \cdot (1/\varphi_2 \cdot S_3 - q_0 \cdot l_{23} \cdot \omega \cdot g + q_0 \cdot h_1 \cdot g) = 1/1.024 \cdot (1/1.024 \cdot 31406.242 - 25 \cdot 450 \cdot 0.027 \cdot 9.81 + 25 \cdot 117 \cdot 9.81) = 55063,106 \text{ (H)} \quad (3.13)$$

$$S_1 = S_2 - q_0 \cdot l_{12} \cdot \omega \cdot g = 55063.106 - 25 \cdot 20 \cdot 0.027 \cdot 9.81 = 54930,671(\text{Н}) \quad (3.14)$$

По отриманим даним будуюмо діаграму натягу підвісної канатної дороги:



Рисунок 3.3 – Діаграма натягу

Визначаємо тягові зусилля на приводній станції:

$$w_0 = S_{10} - S_1 + (k_1 - 1) \cdot (S_{10} + S_1) = 163236.324 - 54930,671 + (1.055 - 1) \cdot (163236.324 + 54930,671) = 120304.947(\text{Н}) \quad (3.15)$$

Згідно табличних даних [3] тяговий коефіцієнт становить $e^{\alpha\mu} = 2.38$, а згідно заданих кутів та розрахунків натягу в точках розрахований тяговий коефіцієнт рівний - $e^{\alpha\mu} = \frac{S_{10}}{S_1} = 2.51$, що є більше табличного, а отже

задовольняє умови.

Потужність електроприводу розраховуємо по наступній формулі:

$$P_p = \frac{w_0 \cdot v}{\eta} = \frac{120304.947 \cdot 7,08}{0,9} = 946.398 \text{ (кВт)} \quad (3.16)$$

Врахуємо коефіцієнт динамічної складової та випадкових збурень - $\kappa_{\eta} = 1,15$, [3] тоді потужність становитиме:

$$P_0 = \kappa_{\eta} \cdot P_p = 1,15 \cdot 946.398 = 1088.358 \text{ (кВт)} \quad (3.17)$$

Оскільки режим роботи є довготривалим, навантажувальна діаграма не будувалась. На основі отриманих результатів обираємо асинхронний двигун з фазним ротором типу АОД-1250-4У1 з номінальною потужністю 1250 кВт. Параметри двигуна наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Паспортні дані двигуна АОД-1250-4У1

Номінальна потужність	$P_{2n} = 1250(\text{кВт})$
Номінальна частота обертання	$n = 1500(\text{об} / \text{хв})$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0,955$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0,89$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2,2$
Номінальне ковзання	$s_n = 0.94(\%)$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50(\text{Гц})$

3.2 Перевірка двигуна

По пусковому моменту:

Виберемо привідний барабан з діаметром 1 м.

Розрахунок передаточного числа редуктора:

$$i_p = \frac{D \cdot n_n \cdot \pi}{60 \cdot V} = \frac{1 \cdot 1500 \cdot 3.14}{60 \cdot 7.0} = 11,21 \quad (3.18)$$

Зі стандартного ряду передатних чисел редуктора беремо $i_p = 11,2$

Розрахунок необхідного моменту:

$$M = \frac{w_0 \cdot D}{2 \cdot i_p} = \frac{120304.947 \cdot 1}{2 \cdot 11,2} = 5370.75 H \cdot m \quad (3.19)$$

Розрахунок номінального моменту двигуна:

$$M_H = \frac{P_d \cdot 30}{n_n \cdot \pi} = \frac{1250000 \cdot 30}{1500 \cdot 3.14} = 7961.78 H \cdot m \quad (3.20)$$

$$M_H \geq M$$

$$7961.78 \geq 5370.75 H \cdot m$$

Двигун задовольняє умови по пусковому моменту.

По перевантажувальній здатності:

Так як в мережі можуть виникати коливання напруги, які становлять 10%, тоді мінімальний момент двигуна буде рівний 0.84 от номінального:

$$M_{c_max} = k_s \cdot M_c = 1.3 \cdot 5370.75 = 6981.975 H \cdot m \quad (3.21)$$

$$0.8 \cdot \lambda \cdot M_H \geq M_{c_max}$$

$$0.8 \cdot 2.2 \cdot 7961.78 \geq 6981.975 H \cdot m$$

$$14012.73 \geq 3363.276 H \cdot m$$

Отже двигун задовольняє умови по перевантажувальній здатності.

Висновки до розділу

На основі проведеного розрахунку потужності електроприводу був обраний двигун АОД-1250-4У1 потужністю 1250 кВт. Також була виконана перевірка обраного двигуна за пусковим моментом та перевантажувальною здатністю. Отримані результати дають можливість вирішити задачу створення математичної моделі системи.

4. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Кутова частота напруги статора

$$\omega_0 = 2\pi f; \omega_0 = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.159(\text{рад} / \text{с}) \quad (4.1)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_0}{p}; \omega_{xx} = \frac{314.159}{2} = 157.07(\text{рад} / \text{с}) \quad (4.2)$$

Номінальна швидкість двигуна

$$\omega_n = \omega_{xx}(1 - S_n); \omega_n = 157.07(1 - 0.0094) = 155.59(\text{рад} / \text{с}) \quad (4.3)$$

Номінальний момент двигуна

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n}; M_n = \frac{1250000}{155.59} = 8033.93(\text{Нм}) \quad (4.4)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності λ)

$$M_k = \lambda M_n; M_k = 2.2 \cdot 8033.93 = 17674.65(\text{Нм}) \quad (4.5)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора

$$U_n = \frac{U_l}{\sqrt{3}}; U_n = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464(\text{В}) \quad (4.6)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \phi}; I_n = \frac{1250000}{3 \cdot 3464 \cdot 0.955 \cdot 0.89} = 141.51(\text{А}) \quad (4.7)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора

$$\begin{aligned} U_{na} &= \sqrt{2} \cdot U_n; U_{na} = \sqrt{2} \cdot 3464 = 4898.83(B) \\ I_{na} &= \sqrt{2} \cdot I_n; I_{na} = \sqrt{2} \cdot 141.51 = 200.12(A) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Амплітудні значення потокозчеплення статора при холостому ході та $R_1=0$

$$\psi_{xx} = \frac{U_{na}}{\omega_0}; \psi_{xx} = \frac{4898.83}{314} = 15.6(B\bar{b}) \quad (4.9)$$

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Математична модель асинхронного двигуна (АД) записана з використанням параметрів Т-подібної схеми заміщення, яка показана на рисунку 4.1. Приведені параметри, що відповідають Г-подібній схемі заміщення, зображені на рисунку 4.2.

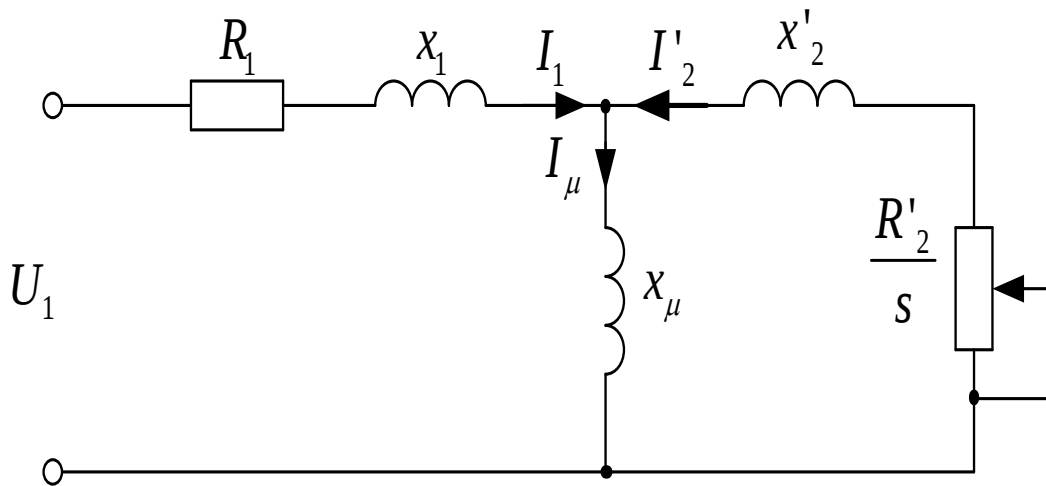


Рисунок 4.1. - Т- подібна схема заміщення асинхронного двигуна

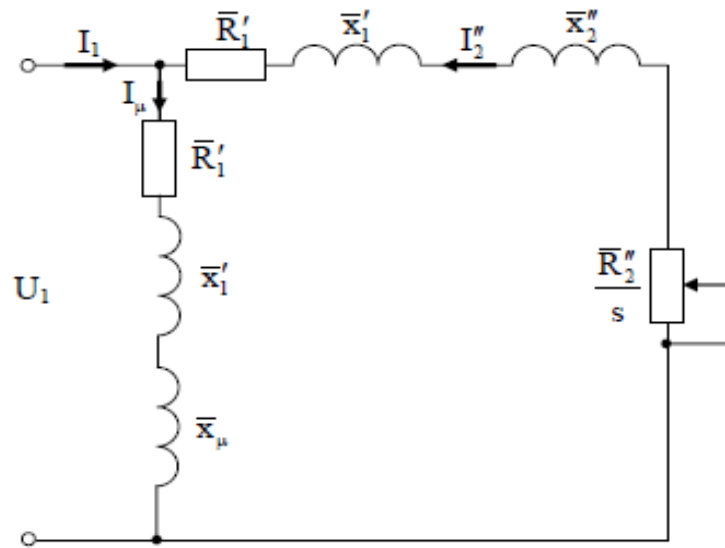


Рисунок 4.2 - Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами:

$$c_1 = \frac{x\mu + \sqrt{x\mu^2 + 4x\mu \cdot x_1'}}{2x\mu}; c_1 = \frac{3.54 + \sqrt{3.54^2 + 4 \cdot 0.0086 \cdot 3.54}}{2 \cdot 3.54} = 1.002 \quad (4.10)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= \frac{\bar{x}_1'}{c_1} = \frac{0.0086}{1.002} = 0.008579 & \bar{R}_1 &= \frac{\bar{R}_1'}{c_1} = \frac{0.00146}{1.002} = 0.001456 \\ \bar{x}_2' &= \frac{\bar{x}_2''}{c_1^2} = \frac{0.0013}{1.002^2} = 0.001294 & \bar{R}_2' &= \frac{\bar{R}_2''}{c_1^2} = \frac{0.00145}{1.002^2} = 0.001443 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться:

$$\begin{aligned}
x_{1a} &= \frac{x_1 Un}{In}; x_{1a} = \frac{0.008579 \cdot 3464}{141.51} = 0.21(Ом); \\
R_{1a} &= \frac{R_1 Un}{In}; R_{1a} = \frac{0.001456 \cdot 3464}{141.51} = 0.036(Ом); \\
x_{2a}' &= \frac{x_2' Un}{In}; x_{2a}' = \frac{0.001294 \cdot 3464}{141.51} = 0.032(Ом); \\
R_{2a} &= \frac{R_2 Un}{In}; R_{2a} = \frac{0.001443 \cdot 3464}{141.51} = 0.035(Ом); \\
x_{\mu a} &= x_{\mu} \frac{Un}{In}; x_{\mu a} = 3.54 \cdot \frac{3464}{141.51} = 86.654(Ом)
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$\begin{aligned}
L_{1\sigma} &= \frac{x_{1a}}{\omega_0}; L_{1\sigma} = \frac{0.21}{314.159} = 6.688 \cdot 10^{-4} (Гн); \\
L_{2\sigma} &= \frac{x_{2a}'}{\omega_0}; L_{2\sigma} = \frac{0.032}{314.159} = 1.009 \cdot 10^{-4} (Гн);
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_{\mu} = \frac{x_{\mu a}}{\omega_0}; L_{\mu} = \frac{86.654}{314.159} = 0.276(Гн); \tag{4.14}$$

Індуктивності статора і ротора:

$$\begin{aligned}
L_1 &= L_{\mu} + L_{1\sigma}; L_1 = 0.276 + 6.688 \cdot 10^{-4} = 0.277(Гн); \\
L_2 &= L_{\mu} + L_{2\sigma}; L_2 = 0.276 + 1.009 \cdot 10^{-4} = 0.276(Гн);
\end{aligned} \tag{4.15}$$

На основі розрахунків обчислюються значення параметрів $\alpha, \alpha_1, \beta, \gamma, \sigma$:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{R_2}{L_2}; \alpha = \frac{0.035}{0.276} = 0.128 \text{ (Ом / Гн)}; \\
\alpha_1 &= \frac{R_1}{L_1}; \alpha_1 = \frac{0.036}{0.277} = 0.129 \text{ (Ом / Гн)}; \\
\sigma &= \frac{(L_1 \cdot L_2 - L_\mu^2)}{L_2}; \sigma = \frac{(0.277 \cdot 0.276 - 0.276^2)}{0.276} = 7.696 \cdot 10^{-4} \text{ (Гн)}; \\
\beta &= \frac{L_\mu}{L_2 \cdot \sigma}; \beta = \frac{0.276}{0.276 \cdot 7.696 \cdot 10^{-4}} = 1.299 \cdot 10^3 \text{ (1 / Гн)}; \\
\gamma &= \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_\mu \cdot \beta; \gamma = \frac{0.036}{7.696 \cdot 10^{-4}} + 0.128 \cdot 0.276 \cdot 1.299 \cdot 10^3 = 92.186 \text{ (Ом / Гн)}; \\
\mu &= 1.5 \cdot \frac{L_\mu}{L_2 \cdot p_n}; \mu = 1.5 \cdot \frac{0.276}{0.276 \cdot 2} = 0.75;
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Результати розрахунків параметрів двигуна АОД-1250-4У1 зведені в таблицю 4.2. [8]

Таблиця 4.2

Параметри двигуна АОД-1250-4У1

P_{2n} , кВт	1250	R_1 , Ом	0.036
ω_{xx} , рад/с	157.08	R_2 , Ом	0.035
ω_n , рад/с	155.59	L_1 , Гн	0.277
M_n , Нм	8033,93	L_2 , Гн	0.276
M_k , Нм	17674,65	L_μ , Гн	0.276
λ	2.2	α , Ом/Гн	0.128
I_{na} , А	141.59	α_1 , Ом/Гн	0.129
ψ_{1xx} , Вб	15.602	μ	0.75
η	0.955	β , 1/Гн	1299
$\cos\phi$	0.89	γ , Ом/Гн	92.186
J_d , кг·м ²	1.84	σ , Гн	0.0007696

Типова функціональна схема сучасного електроприводу змінного струму, побудованого на основі перетворювача частоти з ланкою постійного струму, зображена на рисунку 4.3. Як видно з наведеного рисунка, основою асинхронного електроприводу є перетворювач частоти, який об'єднує в собі функції перетворювача та керуючого пристрою згідно з класичним визначенням електроприводу.

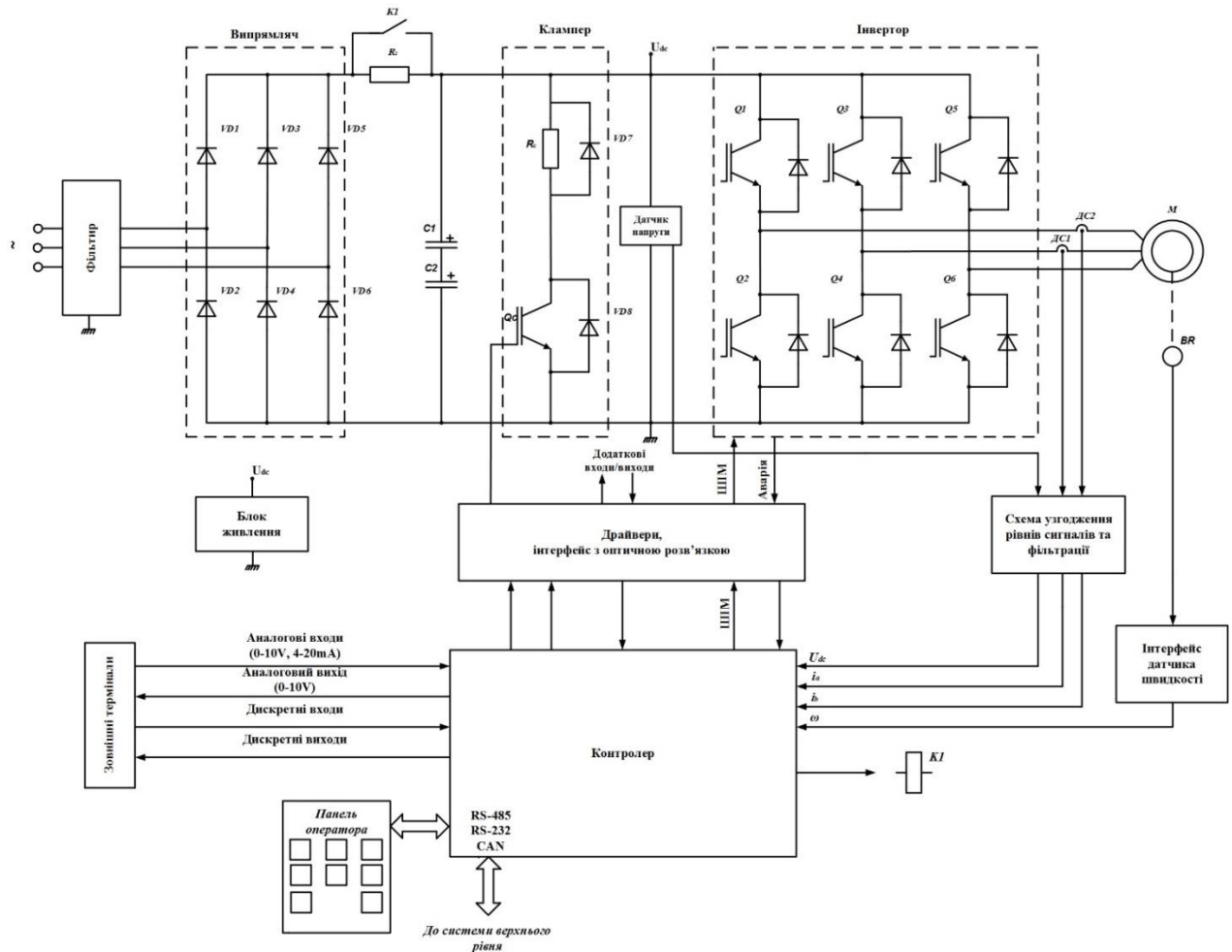


Рисунок 4.3 - Функціональна схема асинхронного електроприводу

Зазвичай або стандартно перетворювач ділять на дві основні складові:

1) Силова частина, до якої входять:

- Вхідний фільтр

- Некерований випрямляч
 - Зарядне коло
 - Ємність фільтру випрямляча
 - Клампер
 - Датчик напруги ланки постійного струму
 - Інвертор
 - Датчики вихідного струму
 - Схеми драйверів та гальванічної розв'язки сигналів керування ключами інвертора і клампера
 - Блок живлення
- 2) Керуючий контролер, до якого входять:
- Власне цифровий контролер, який, як правило, базується на цифровому сигнальному процесорі
 - Схеми узгодження сигналів

Для розрахунку основних елементів перетворювача необхідно мати значення наступних параметрів: напруга і кількість фаз мережі живлення, потужність двигуна, ККД двигуна, номінальний струм двигуна.

Прийmemo, що система живиться від 3-х фазної мережі з напругою $U_{\text{мер.}} = 6000(\text{В})$

Максимальне значення струму в фазі двигуна визначається перевантажувальною здатністю електроприводу K_p , яка в загальному випадку залежить від конкретного типу механізму і дорівнює орієнтовно $K_p = (1.1-1.3)$ для турбомеханізмів, $K_p = (1.2-2)$ - для екструдерів, конвеєрів, підйомно-транспортних механізмів, $K_p = (2-3)$ - для високо-динамічних механізмів, таких як роботи, приводи подачі і інші [9].

Прийнявши перевантажувальну здатність $K_p = 1.5$, розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача.

$$U_{\phi n} = \frac{U_{\pi}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464.1(B) \quad (4.17)$$

$$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{3 \cdot U_{\phi n} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{1250 \cdot 10^3}{3 \cdot 3464.1 \cdot 0.955 \cdot 0.89} = 141.51(A) \quad (4.18)$$

$$I_{\max} = K_{\Pi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_n = 1.5 \cdot \sqrt{2} \cdot 141.51 = 299.29(A) \quad (4.19)$$

Перетворювач живиться від трифазної мережі на напругу 6000 В через вхідний багатообмотковий трансформатор, який знижує напругу до 630 В, що подається на багаторівневий інвертор.

Максимальна напруга в ланці постійного струму сучасних перетворювачів визначається допустимою напругою встановлених електролітичних конденсаторів фільтра і становить приблизно 750 В для перетворювачів з трифазним живленням.

При виборі IGBT для автономних інверторів напруги їх максимально-допустима напруга колектор-емітер має бути мінімум в 1.5 разів вище, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму, тобто:

$$U_{к.е.} > 1.5 \cdot U_{dc} = 1.5 \cdot 750 = 1125(B) \quad (4.20)$$

IGBT транзистори, що випускаються сучасною промисловістю, мають стандартний ряд максимальних напруг колектор-емітера: 250, 600, 1200, 1700, 3300, 4500, 6500 В

Вибір IGBT може бути здійснений на сайтах виробників за таким критерієм:

$$I_c > I_{\max}, U_{ce \max} > U_{к.е.}$$

де I_c та $U_{ce \max}$ — відповідно тривалий струм колектора і напруга колектор-емітер, зазначені в паспортних даних IGBT. Обов'язковою є умова наявності

антипаралельного діода, який в більшості випадків є вбудованим в один корпус з транзистором і не вимагає окремого розрахунку.

Для побудови силової частини перетворювача зручно використовувати так звані IGBT-модулі, які в одному корпусі містять 3, 6 або 7 транзисторів з антипаралельними діодами та вбудованим випрямлячем. Ці модулі забезпечують високу ефективність, компактність і простоту монтажу, що робить їх популярними рішеннями для сучасних електроприводів і перетворювачів частоти. Вибираємо по каталогу IGBT модуль типу 5SNG 0300Q170300 з параметрами $I_c = 300A, U_{к.е.} = 1200B$. [10]

Ємність випрямляча визначається за формулою:

$$C = \frac{1}{2\pi K_p m f R_0}$$

де K_p – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги, який для перетворювачів частоти вибирають в діапазоні (0.02-0.05), m - число фаз випрямляча, f - частота напруги мережі живлення, R_0 - еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму.

Для визначення R_0 розрахуємо значення струму ланки постійного струму з урахуванням перевантаження.

$$I_{dc} = \frac{K_{II} P_n}{U_{dc} \eta_{inv} \eta_{\partial e}} = \frac{1.5 \cdot 1250 \cdot 10^3}{750 \cdot 0.97 \cdot 0.955} = 2698.76(A) \quad (4.21)$$

де $\eta_{inv} = 0.97$ – ККД інвертора напруги.

Тоді еквівалентний опір навантаження розраховується як:

$$R_0 = \frac{U_{dc}}{I_{dc}} = \frac{750}{2698.76} = 0.277 \text{ Ом} \quad (4.22)$$

Розрахункове значення ємності фільтра для $K_p = 0.05$ буде рівне:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 0.05 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 0.277} = 76687 \text{ мкФ} \quad (4.23)$$

Вибираємо по каталогу конденсатори типу E91F421VNT172MUA5T [11] ємністю $C = 160000$ мкФ і максимальною напругою 450 В. Потрібна ємність і робоча напруга фільтра досягається послідовним включенням двох конденсаторів і чотирьох паралельних гілок. При цьому сумарна ємність буде 80000 мкФ.

Розрахуємо зарядний опір:

$$R_z = 2 \cdot \frac{U_{dc}}{I_{vd}} = 2 \cdot \frac{750}{150} = 10 \text{ Ом} \quad (4.24)$$

Зі стандартного ряду резисторів виберемо $R_z = 10$ Ом. [12]

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика типу LV-25-1200 [13], схема підключення якого показана на рисунку 4.4.

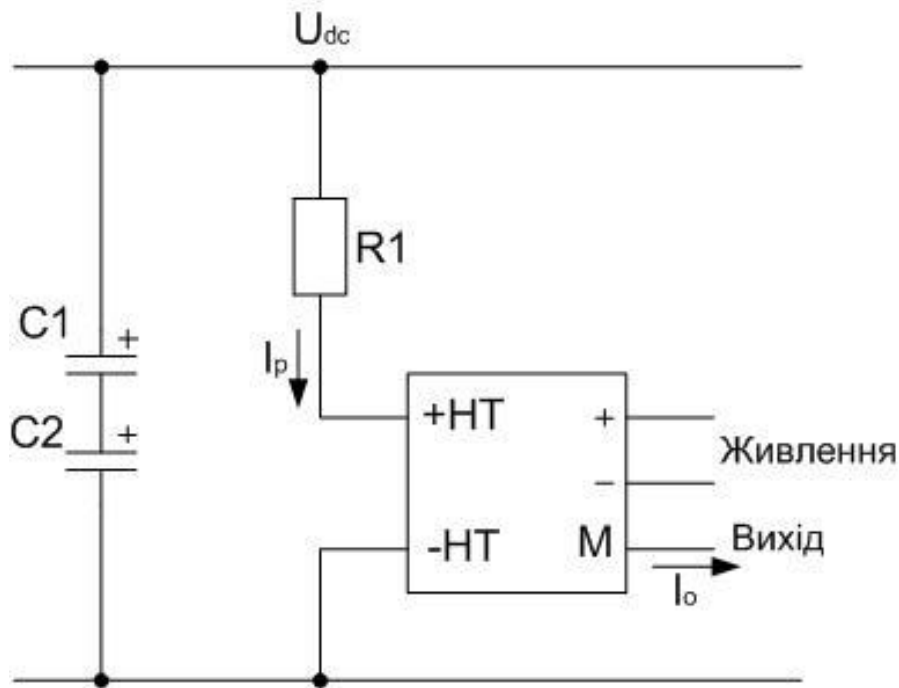


Рисунок 4.4 – Підключення датчика напруги

В документації на датчик напруги зазначено, що максимальний струм первинного ланцюга $I_{p\max} = 6.7 \text{ мА}$. Тому значення опору резистора R1 одно:

$$R_1 = \frac{U_{dc\max}}{I_{p\max}} = \frac{750}{0.0067} = 111940 \text{ Ом} \quad (4.25)$$

Зі стандартного ряду резисторів виберемо $R1=120 \text{ кОм}$.

Вибір датчиків струму здійснюється з урахуванням максимального струму, який необхідно вимірювати. Важливо, щоб вимірюваний діапазон датчика був значно більшим за максимально допустимий струм в системі. Для вимірювання струмів на виході перетворювача використовують значення максимального струму.

Обираємо датчик типу HAL 300-S, номінальний струм якого становить 300 А, а діапазон виміру складає 900 А. Цей датчик забезпечує точні

вимірювання в зазначеному діапазоні, що робить його підходящим для використання в даній системі. [14]

При виборі перетворювача частоти необхідно звернути увагу на споживання електричного струму двигуном, оскільки потужність двигуна визначається значенням максимальної сили струму. Оскільки двигун працює в складних режимах експлуатації і має невеликий час розгону, можуть виникати ситуації, коли двигун зазнає значних перевантажень. Внаслідок цього спостерігається істотне зростання струму, який перевищує номінальне значення.

Тому при виборі двигуна потрібно враховувати перевантажувальну здатність перетворювача частоти і використовувати частотний перетворювач з потужністю, що перевищує номінальну потужність двигуна. Перетворювач частоти повинен містити векторний метод керування, оскільки він є незамінним у випадках, коли необхідна швидка реакція швидкості на зміни навантаження (при різких коливаннях навантаження не відбувається стрибків швидкості).

Отже, виходячи з вище зазначених вимог, обираємо перетворювач частоти фірми АВВ марки ACS 5060-A1A-M5 [15].

Висновки до розділу:

У цьому розділі проведено розрахунок електричних параметрів обраного електродвигуна та основних елементів силового контуру. Також виконано розрахунок і вибір основних елементів силової частини перетворювача частоти, зокрема: IGBT-модулів, конденсаторів, датчиків струму і напруги. Обрано перетворювач частоти фірми АВВ марки ACS 5060-A1A-M5 потужністю ($P_n = 1700$) кВт, який відповідає вимогам і повністю сумісний з обраним вище двигуном АОД-1250-4У1 для приводу в русі підвісної канатної дороги.

5. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Функціональна схема замкнутої системи автоматичного керування підвісною канатною дорогою приведена на рисунку 5.1.

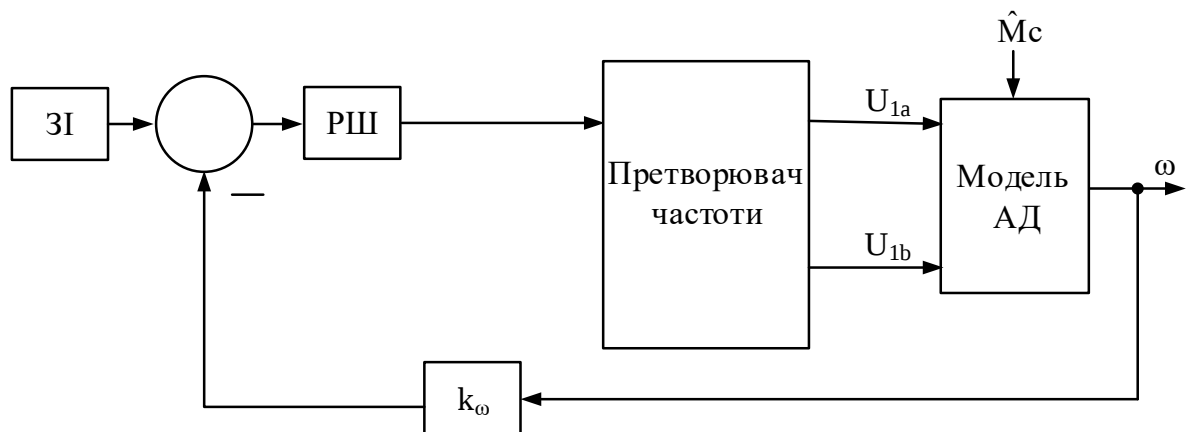


Рисунок 5.1 – Функціональна схема управління підвісною канатною дорогою.

На функціональній схемі використовуються наступні позначення: $3I$ – задатчик інтенсивності; $PШ$ – регулятор швидкості.

Сучасні системи векторного управління пройшли значний шлях розвитку і наразі є найбільш поширеними серед систем електроприводу змінного струму. За допомогою таких систем можна просто і ефективно керувати складними об'єктами, такими як асинхронний двигун, що значно розширює область його застосування та майже повністю витісняє двигуни постійного струму з автоматизованих керованих приводів.

Це насамперед пов'язано з розвитком силової електроніки, яка дозволяє створювати надійні та відносно дешеві перетворювачі, а також з розвитком швидкодіючої мікроелектроніки, здатної реалізувати алгоритми управління

різної складності. Таким чином, високоякісний асинхронний векторний електропривод (АВП) на сьогодні є фактично технічним стандартом.

Для моделювання систем керування асинхронним двигуном (АД) прийнято використовувати математичну модель, яка формується у стаціонарній системі координат (a-b). У цій системі координат параметри двигуна, такі як напруга, струм і обертовий момент, аналізуються у вигляді векторів, що дозволяє спростити обчислення та реалізацію алгоритмів керування. Запис математичної моделі в даній системі дозволяє більш точно відображати динаміку роботи двигуна, що є важливим для розробки ефективних методів управління його процесами. Використання стаціонарної системи координат (a-b) також сприяє підвищенню точності векторного управління та оптимізації роботи електроприводу [9]:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, & M &= \mu(\psi_{2a}i_{1b} - \psi_{2b}i_{1a}), \\ \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma}u_{1a}, \\ \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma}u_{1b}, \\ \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b},\end{aligned}\tag{5.1}$$

де ω - кутова швидкість ротора;

$(i_{1a}, i_{1b})^T$ - компоненти вектора струму статора в системі координат (a-b);

$(\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$ - компоненти вектора потокозчеплень ротора;

$(u_{1a}, u_{1b})^T$ - компоненти вектора напруги статора;

M_c - момент навантаження.

Додаткові константи, виражені через параметри двигуна:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{R_2}{L_2}; \\
\sigma &= L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \\
\beta &= \frac{L_m}{\sigma L_2}; \\
\gamma &= \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta \\
\mu &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2}
\end{aligned}
\tag{5.2}$$

де R_1, R_2, L_1, L_2 – активні опори та індуктивності статора і ротора відповідно; L_m – індуктивність намагнічуючого контуру;

p_n – кількість пар полюсів двигуна.

Алгоритм векторного керування АД, як правило, проектується та записується в синхронній системі координат з швидкістю ω_0 (рисунок 5.2).

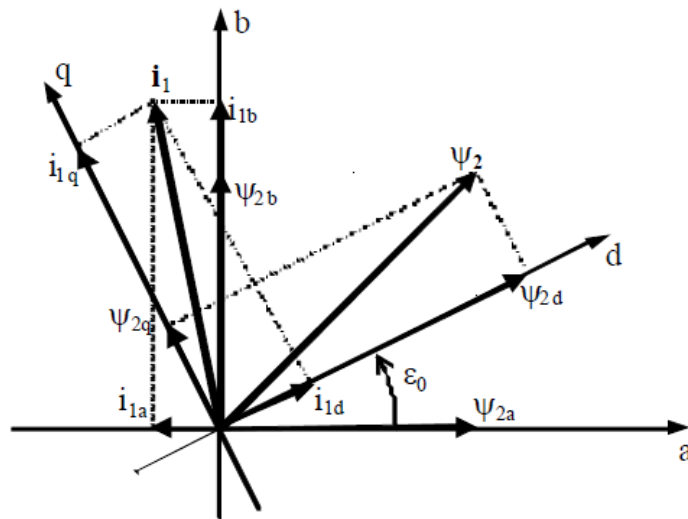


Рисунок 5.2 – Векторна діаграма АД

Перехід між системами (d-q) та (a-b) відбувається наступним чином за формулами (5.3)

$$\begin{aligned}
x_{dq} &= e^{-j\varepsilon_0} x_{ab} \\
x_{ab} &= e^{j\varepsilon_0} x_{dq} \\
e^{-j\varepsilon_0} &= \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_0) & \sin(\varepsilon_0) \\ -\sin(\varepsilon_0) & \cos(\varepsilon_0) \end{bmatrix} \\
e^{j\varepsilon_0} &= \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_0) & -\sin(\varepsilon_0) \\ \sin(\varepsilon_0) & \cos(\varepsilon_0) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

де ε_0 - кутове положення системи координат (d-q) відносно стаціонарної (a-b);

x_{yz} – двовимірний вектор.

Припускається, що для моделі АД, заданої (5.1), виконується наступне:

- струми статора та кутова швидкість ротора доступні для вимірювання;
- параметри АД відомі і незмінні;
- момент навантаження невідомий, постійний та обмежений;
- Задані траєкторії кутової швидкості ω^* і потокозчеплення $\psi^* > 0$ є обмеженими функціями з обмеженою першою та другою похідними по часу.

В умовах цих припущень відбувається проектування алгоритму прямого векторного керування що забезпечує:

- Глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій швидкості – потокозчеплення, тобто,

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0, \lim_{x \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0$$

при умові обмеженості всіх внутрішніх похідних.

- асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \psi_q = 0$$

- асимптотичну лінеаризацію підсистеми швидкості до лінійної повністю керованої форми;
- асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними та електромагнітними координатами АД.

Отож перетворювач частоти з алгоритмом прямого векторного керування АД можна описати наступними математичними рівняннями:

Спостерігач магнітного потоку АД:

$$\begin{aligned} |\dot{\hat{\psi}}| &= -\alpha |\hat{\psi}| + \alpha L_m i_d \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = \omega + L_m \frac{i_q}{|\hat{\psi}|} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Регулятор потоку:

$$\begin{aligned} i_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_{\psi} \tilde{\psi} - x_{\psi}) \\ \dot{x}_{\psi} &= k_{\psi i} \tilde{\psi} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Регулятор струму по осі(d):

$$u_d = \sigma (\gamma i_d^* - \omega_0 i_q - \alpha \beta |\hat{\psi}| + i_d^* - k_{id} \tilde{i}_d - x_d) \quad (5.6)$$

$$\dot{x}_d = k_{ii} \tilde{i}_d$$

$$i_d^* = \frac{1}{\alpha L_m} \left\{ \alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - k_{\psi} \left[-(\alpha + k_{\psi}) \tilde{\psi} + \alpha L_m \tilde{i}_d - x_{\psi} \right] - \dot{x}_{\psi} \right\} \quad (5.7)$$

Регулятор швидкості:

$$\begin{aligned} i_q^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} (-k_{\omega} \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^*) \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Модифікований регулятор струму по осі (q):

$$u_q = \sigma \left[\gamma i_q^* + \omega_0 i_d + \beta \omega \psi^* + i_{q1}^* - k_{iq} \tilde{i}_q - \frac{1}{\psi^*} (\dot{\psi}^* \tilde{i}_q + \zeta) \right] \quad (5.9)$$

$$\dot{\zeta} = k_{\eta i} (\psi^* \tilde{i}_q)$$

$$i_{q1}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_{\omega} (-k_{\omega} \omega + \mu \psi^* \tilde{i}_q) - \dot{M}_c + \ddot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_q^* \quad (5.10)$$

Реальні напруги, що прикладаються до обмоток статора двигуна, дорівнюють:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

6. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ В ПАКЕТІ MATLAB SIMULINK

При моделюванні поведінки розробленої системи та наочного розуміння електромеханічних процесів, які відбуватимуться в електроприводі при різних режимах його роботи, складемо математичну модель електромеханічної системи в пакеті програм MATLAB Simulink. Схема моделі зображена на рисунку 6.1.

Використання MATLAB Simulink дозволить проводити детальний аналіз системи, візуалізувати динаміку роботи електроприводу і вивчити вплив різних параметрів на його ефективність. Це особливо корисно для оптимізації роботи системи та регулювання її характеристик в умовах змінного навантаження.

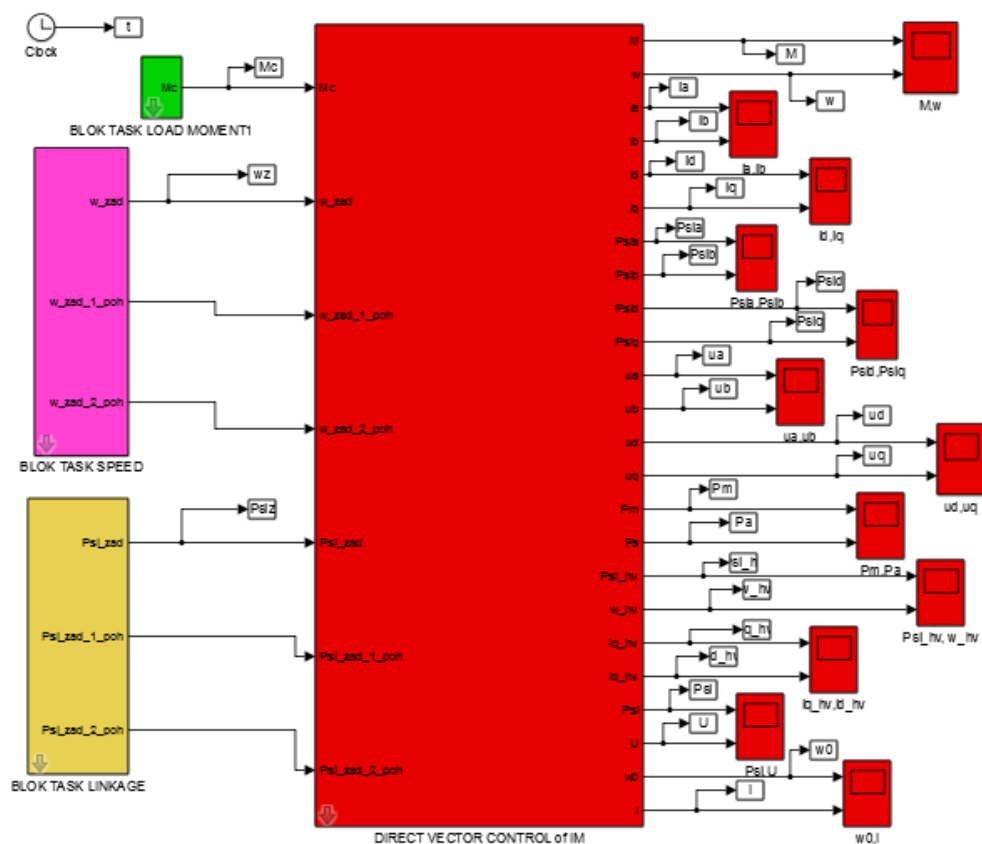


Рисунок 6.1- Загальна структура схеми моделі

Дана структура включає в себе наступні блоки: завдання швидкості (рожевий блок), потокозчеплення (жовтий блок), блок накидання навантаження (зеленій блок) та блок перетворювач частоти – двигун зі спостерігачем магнітного потоку (червоний блок).

Перетворювач частоти з алгоритмом прямого векторного керування асинхронним двигуном має структуру, зображену на рисунку 6.2

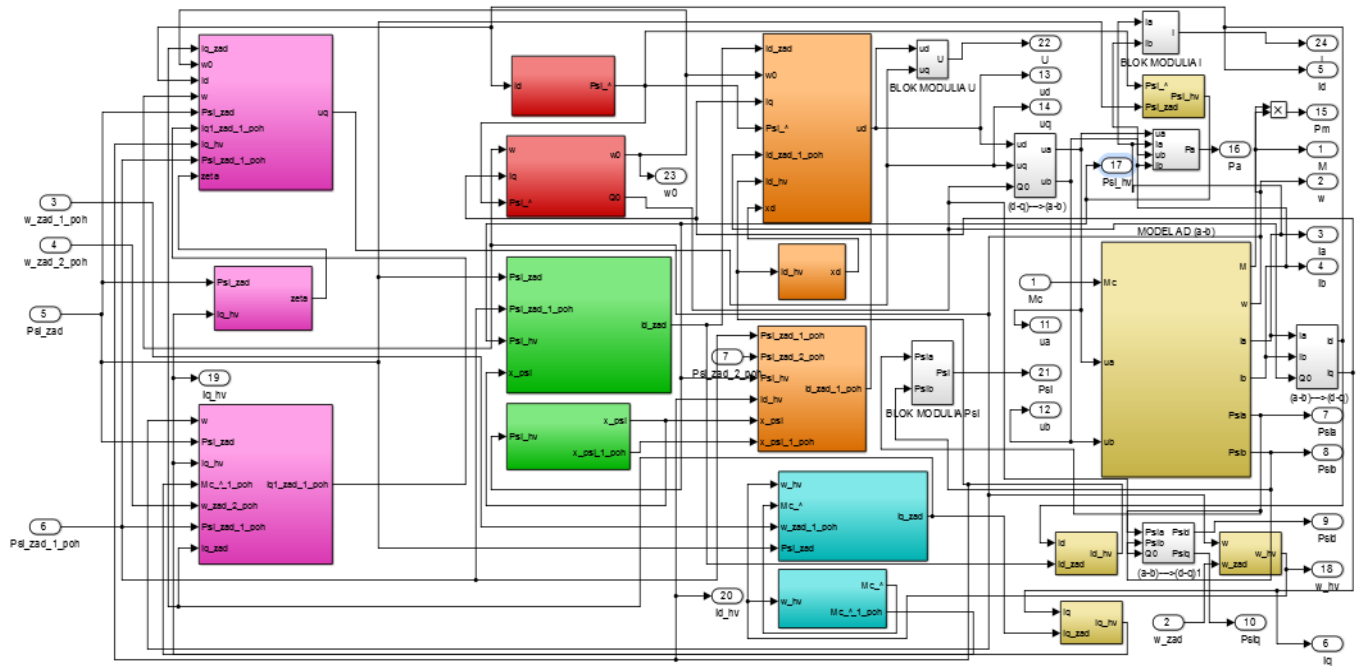


Рисунок 6.2- Структура блоку ПЧ-АД

Дана структура містить в собі модель асинхронного двигуна в стаціонарних координатах (a-b) (рисунок 6.3) та блоки перетворення координат (d-q) в (a-b), регулювання потокозчеплення, розрахунку похибок з врахуванням зворотніх зв'язків.

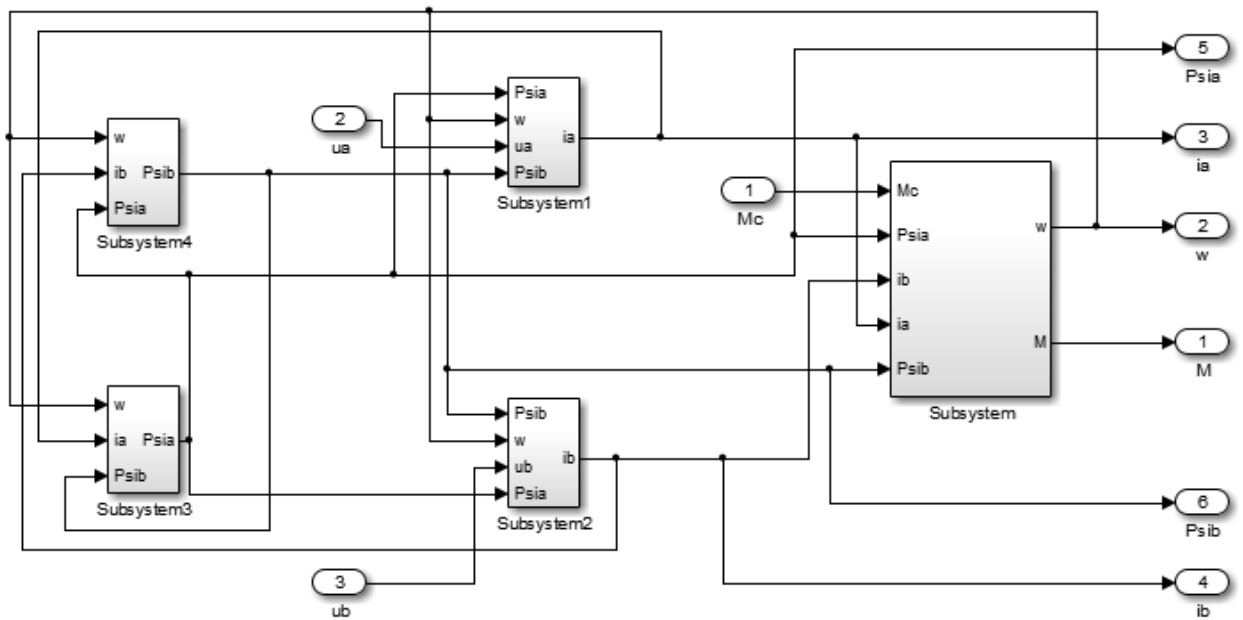


Рисунок 6.3- Модель асинхронного двигуна

Для моделювання даної системи розрахуємо коефіцієнти регуляторів:

Некомпенсована стала часу:

$$\tau_{\mu} = T_{\text{ш}} + 0,5T_p + 0,5T_{\phi} = 2,5 \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot 6,66 \cdot 10^{-9} = 0,00025(\text{с}) \quad (6.1)$$

де $T_{\text{ш}}$ – стала часу ШІМ;

$$T_{\text{ш}} = \frac{1}{f_{\text{шİM}}} = \frac{1}{4000} = 2,5 \cdot 10^{-4}(\text{с}) \quad (6.2)$$

де T_p – розрахункова стала часу;

$$T_p = \frac{1}{f_{\kappa}} = \frac{1}{150000000} = 6,666 \cdot 10^{-9}(\text{с}), \quad (6.3)$$

$$\tau_{\mu}^{-1} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-4}} = 4000(\text{с}) \quad (6.4)$$

Якщо апроксимувати не модельовану динаміку в контурі регулювання струму, то $\omega_\mu = \tau_\mu^{-1} = 4000$.

$$\omega_\mu > (5-6)\omega_{oi} \quad (6.5)$$

де $\omega_{oi} \approx 800$ – полоса пропускання в контурі регулювання струму;

$$k_i = 2\xi\omega_{oi} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 800 = 1131,37 \approx 1150, \quad (6.6)$$

$$k_{ii} = \frac{k_i^2}{2} = \frac{1150^2}{2} = 661250 \quad (6.7)$$

Так як контур потокозчеплення повинен бути максимально швидкодіючим, то $\omega_{oi} \approx \omega_{o\psi}$. Тоді: $k_\psi = k_i = 1150, k_{\psi i} = 661250$.

Полоса пропускання в контурі регулювання струму в 5-6 разів більша за полюсу пропускання в контурі регулювання швидкості.[18]

$$\omega_{oi} > (5-6)\omega_{o\omega} \quad (6.8)$$

де $\omega_{o\omega} \approx 160$ – полоса пропускання в контурі регулювання швидкості;

$$k_\omega = 2\xi\omega_{o\omega} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 160 = 227 \approx 230, \quad (6.9)$$

$$k_{oi} = \frac{k_\omega^2}{2} = \frac{230^2}{2} = 26450 \quad (6.10)$$

При дослідженні динамічних процесів застосовується наступна послідовність операцій керування двигуном. Спочатку двигун збуджується за 0,1 с до значення 15,6 Вб. В час $t = 0,25$ с починається розгін двигуна за час 0,45 с до номінальної швидкості $\omega_n = 155.59 \text{ рад/с}$. При роботі двигуна з постійною швидкістю на $t=1$ с до валу прикладається номінальний момент, що рівний $M=8033,93 \text{ Н}\cdot\text{м}$ і при $t=2,5$ с даний момент знімається. Гальмування двигуна відбувається в час $t=3$ с. Дослід проводимо як для номінального моменту навантаження, так і для його відхилень в діапазоні від $0.5M_n$ до $1.5M_n$. Це пов'язано з різною завантаженістю тягового елемента в різний період часу.

На рисунку 6.4 зображені графіки перехідних процесів АД при $\omega_n = 155.59 \text{ рад/с}$ та M_n .

На рисунках 6.5 – 6.10 зображено графіки перехідних процесів АД при номінальній швидкості та зміні величин моментів навантаження в діапазоні : $0.5M_n$, $0.65M_n$, $0.8M_n$, $1.1M_n$, $1.3M_n$, $1.5M_n$.

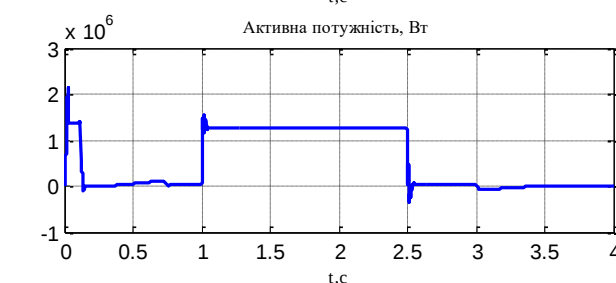
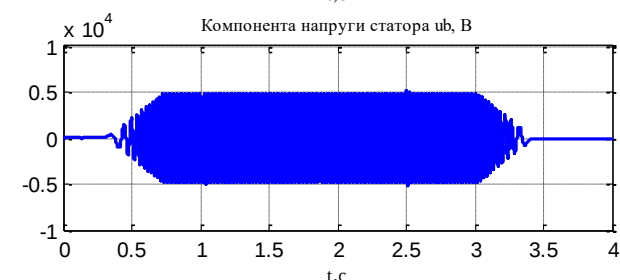
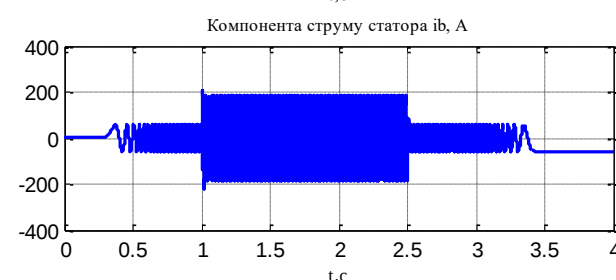
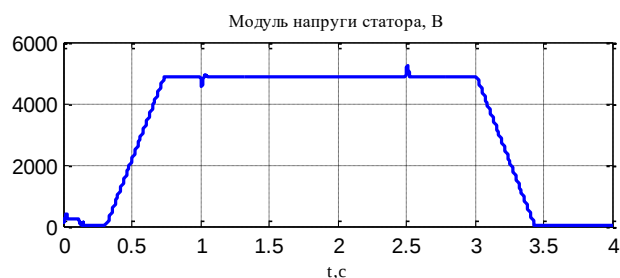
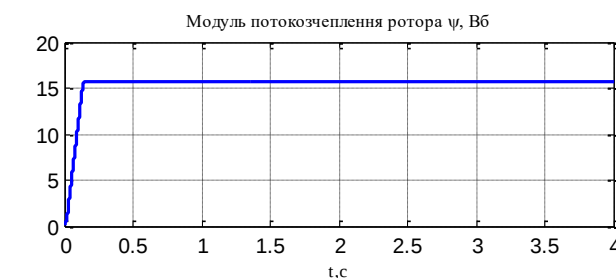
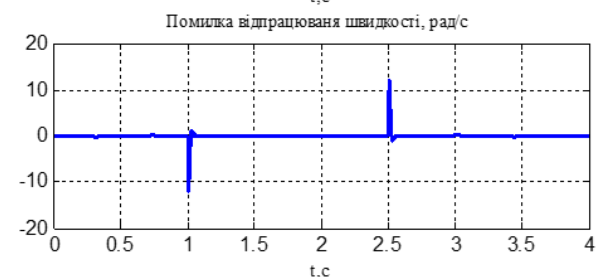
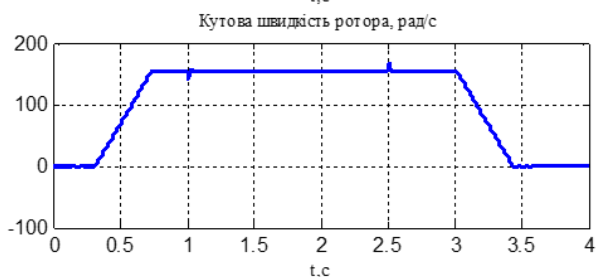
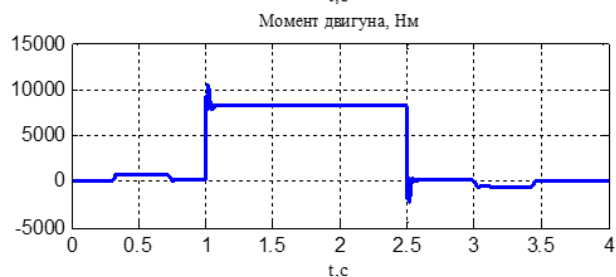
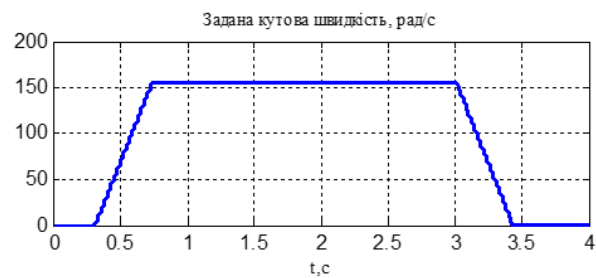
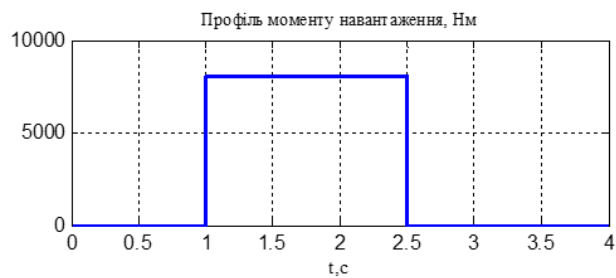


Рисунок 6.4 – Перехідні процеси АД при $\omega_n = 155.57 \text{ рад} / \text{с}$ та M_n

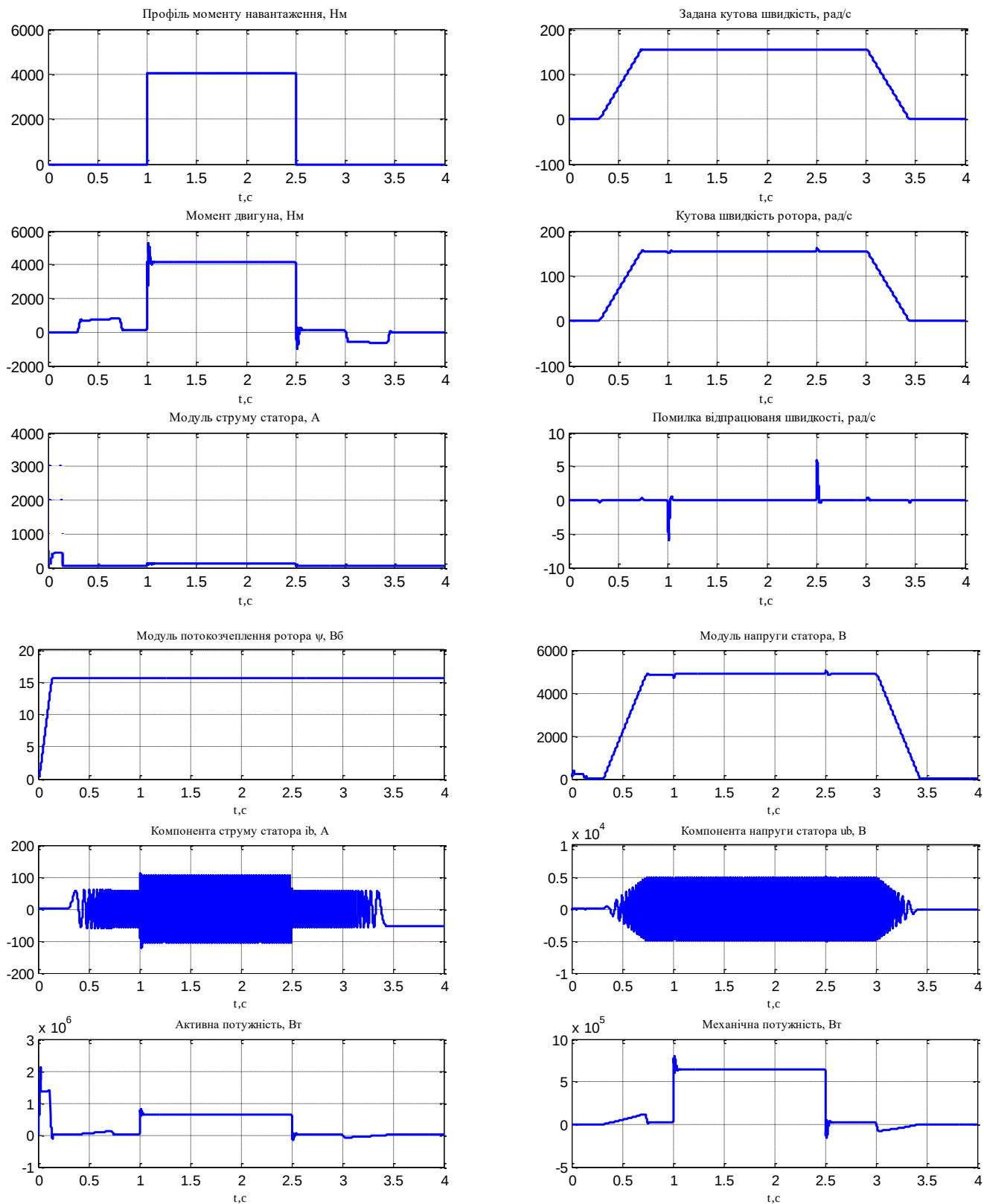


Рисунок 6.5 – Перехідні процеси АД при ω_n та $0.5M_n$

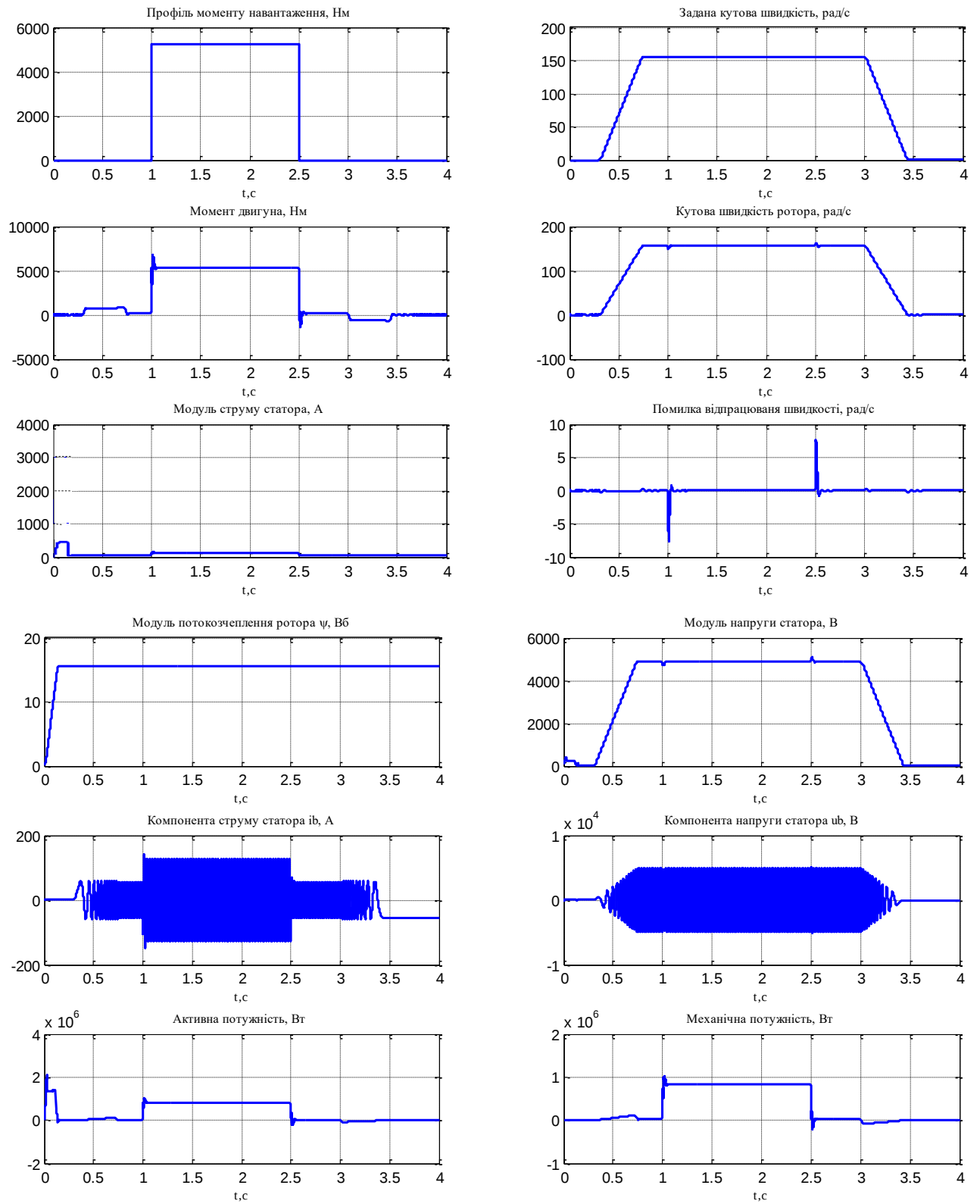


Рисунок 6.6 – Перехідні процеси АД при ω_n та $0.65M_n$

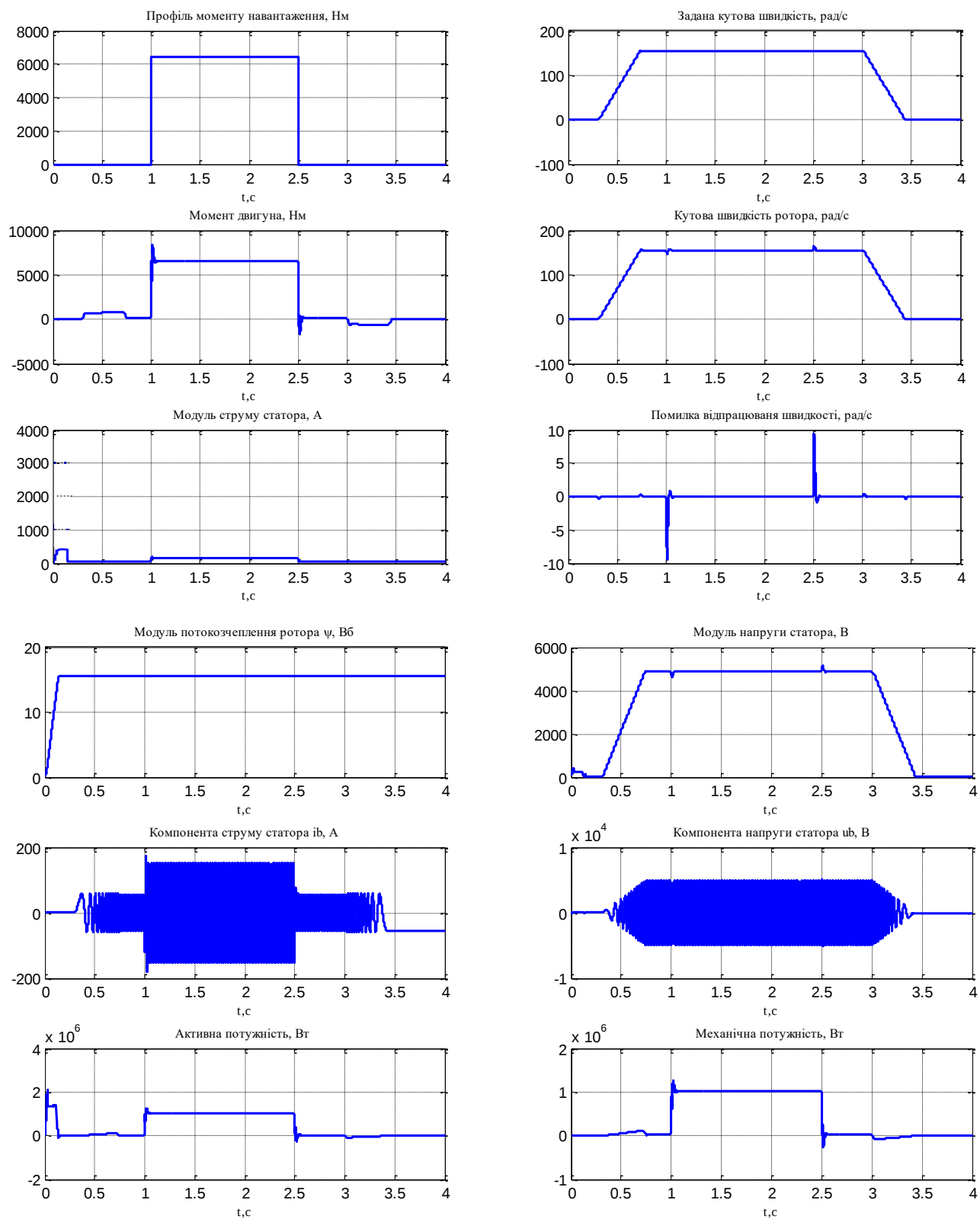


Рисунок 6.7 – Перехідні процеси АД при ω_n та $0.8M_n$

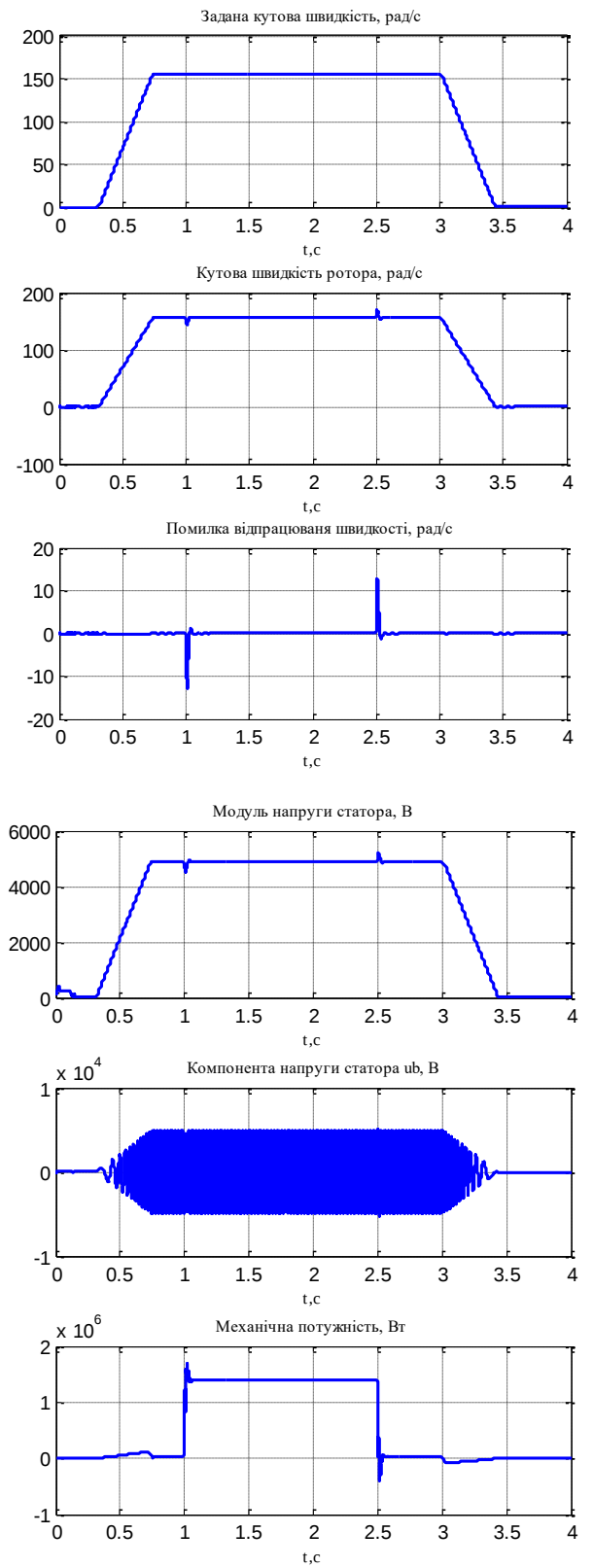
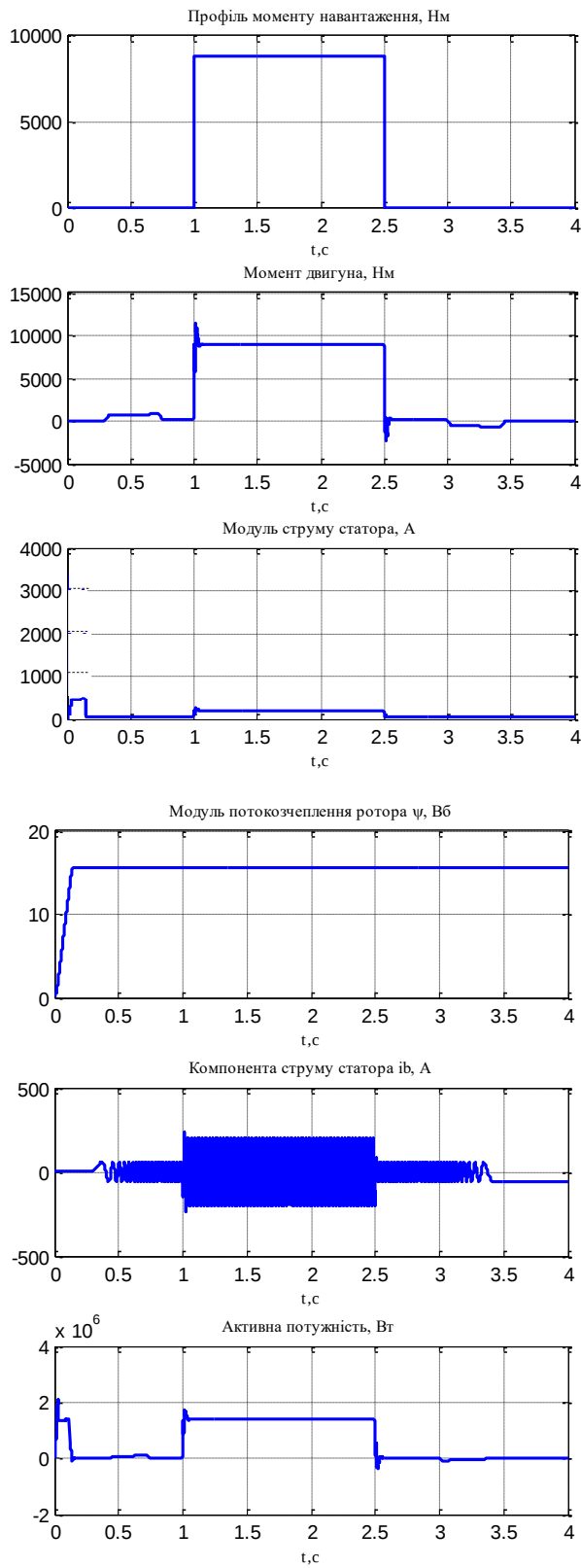


Рисунок 6.8 – Перехідні процеси АД при ω_n та $1.1M_n$

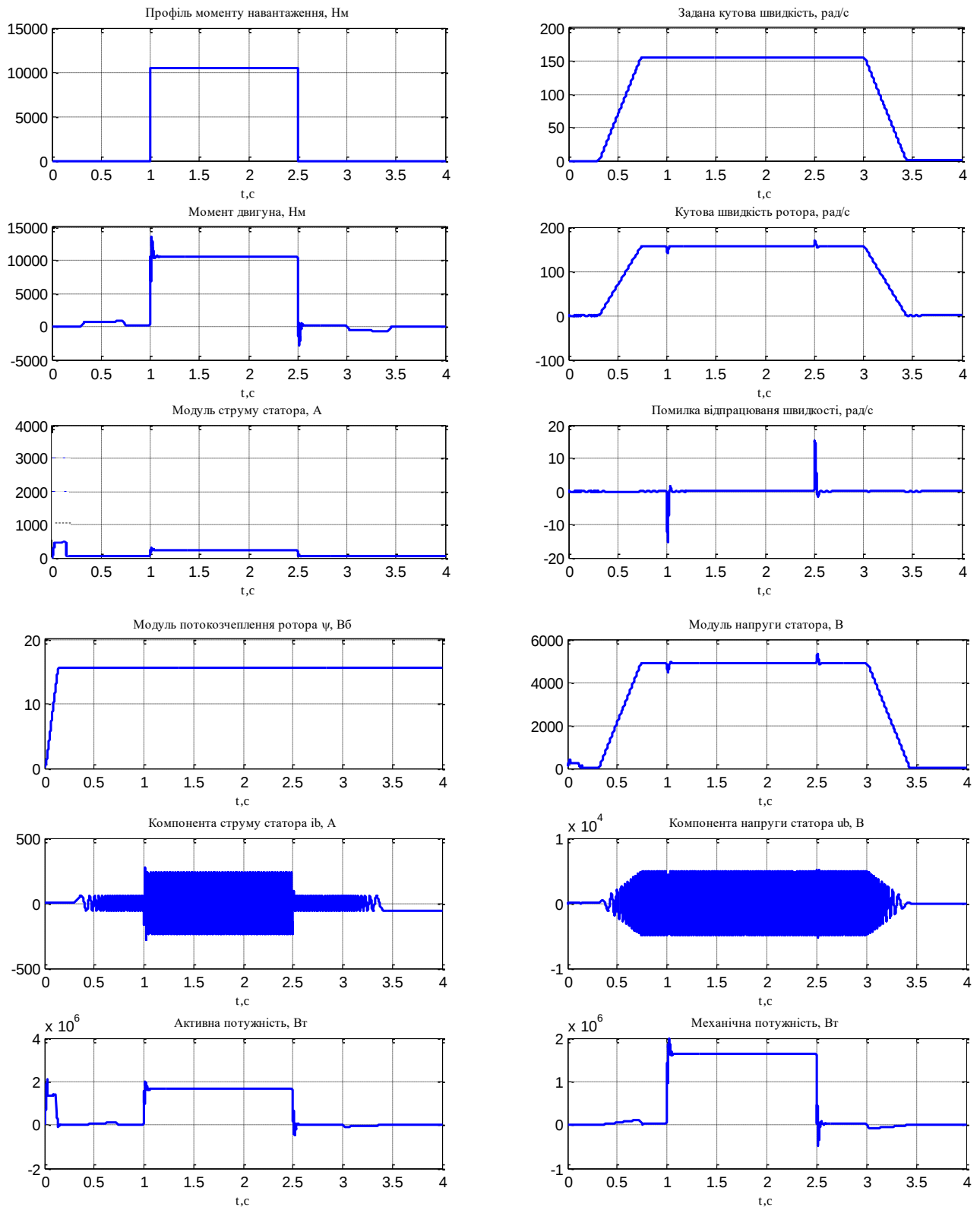


Рисунок 6.9 – Перехідні процеси АД при ω_n та $1.3M_H$

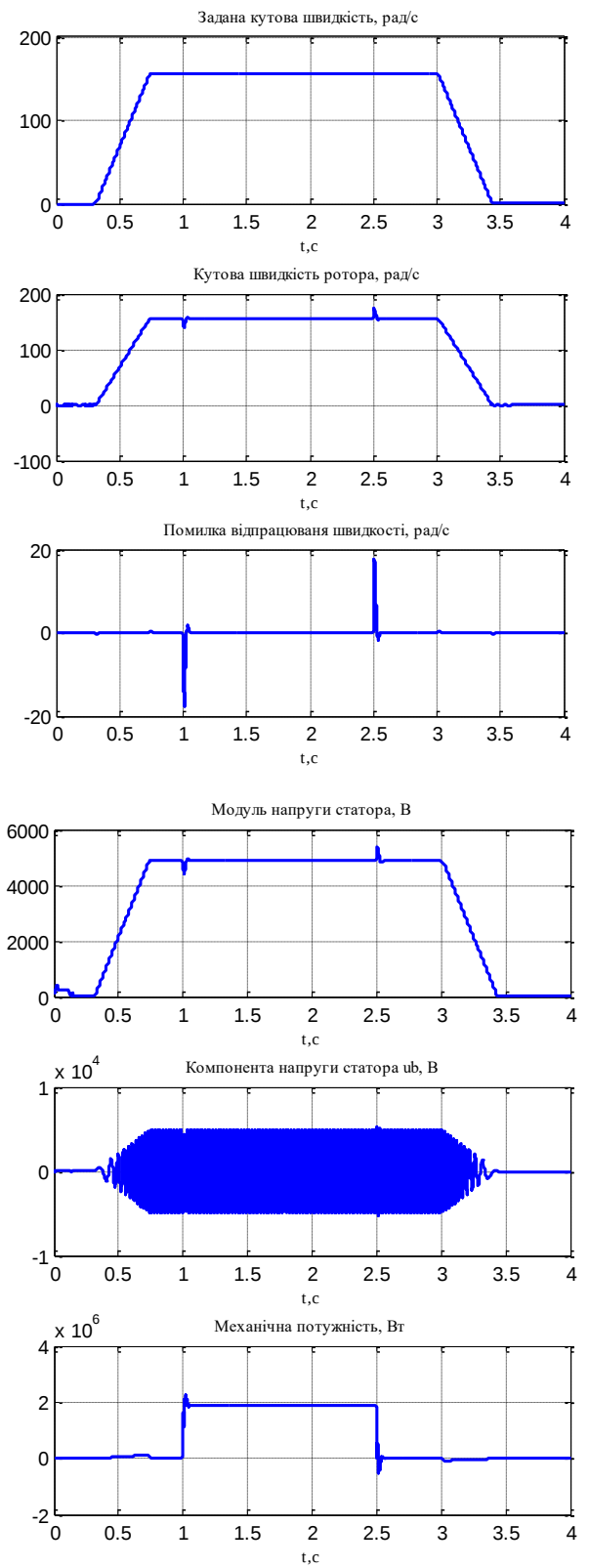
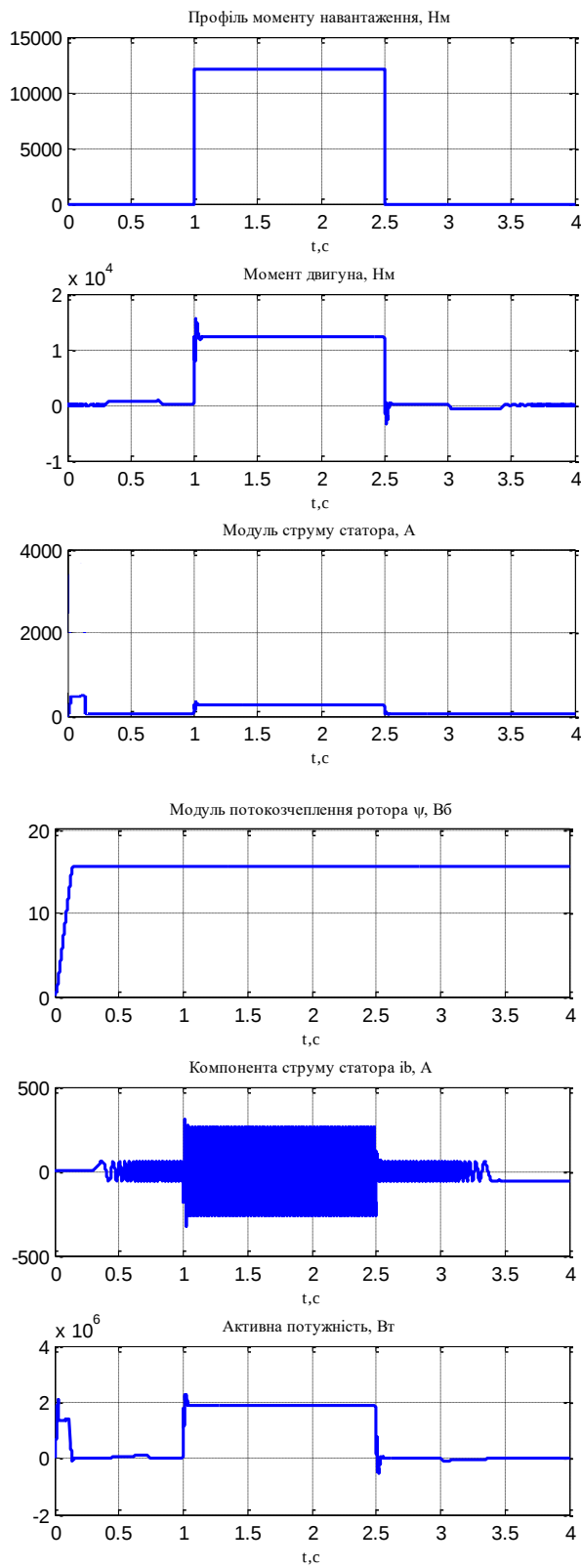


Рисунок 6.10 – Перехідні процеси АД при ω_n та $1.5M_n$

З графіків, що зображені на рисунках 6.4 - 6.10, видно, що задана траєкторія по швидкості відпрацьовується з високою точністю. Похибка під час розгону практично дорівнює нулю, що досягається завдяки компенсації першої та другої похідних за швидкістю. Статична похибка при накиданні моменту також майже дорівнює нулю, що пояснюється наявністю в даному алгоритмі ПД-регулятора кутової швидкості.

Ці результати свідчать про ефективність розробленої системи керування, що забезпечує стабільну і точну роботу електроприводу в різних режимах. Висока точність управління дозволяє досягти оптимальних умов експлуатації системи, які є важливими для різних застосувань, включаючи підвісні канатні дороги.

Умови полеорієнтування асимптотично виконуються оскільки $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_q = 0 \rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0$, тобто потокозчеплення по осі q дорівнює 0. Це означає, що вісь d направлена вздовж осі магнітного потоку ротора. До того ж забезпечується асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії кутової швидкості ($\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0$). Процеси потокозчеплення та моменту є розв'язаними, оскільки накидання моменту ніяк не впливає на зміну потокозчеплення. В системі (d-q) струми є постійними сигналами. Струм i_q повторює форму моменту, оскільки $\psi_q = 0$, то $M = \mu i_q \psi_d$, де $\psi_d = \text{const}$. Звідси можна зробити висновок, що компонента i_d регулює потокозчеплення. Коефіцієнт корисної дії за номінальної швидкості при накиданні моменту дорівнює:

$$\eta_{155.57} = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{акт}}} \cdot 100\% = \frac{1272000}{1275500} \cdot 100\% \approx 99.7\%$$

Розрахований ККД є більшим ніж той, що представлений в паспортних даних (95.5%). Це може пояснюватися тим, що дана модель не враховує втрати в сталі.

В даній моделі все ж присутня певна похибка по швидкості, яка є досить малою. Вона пов'язана з точністю обчислення. Адже з рисунків 6.4 - 6.10 видно, що реальна швидкість підтримується на рівні номінальної

$\omega_n = 155.57 \text{ рад} / \text{с}$ та не змінюється при зміні моменту навантаження. Хоча слід зазначити, що в реальних фізичних системах з даним типом регулятора також присутня незначна похибка по швидкості.

Залежність похибки відпрацювання швидкості від моменту навантаження двигуна показана на рисунку 6.11.

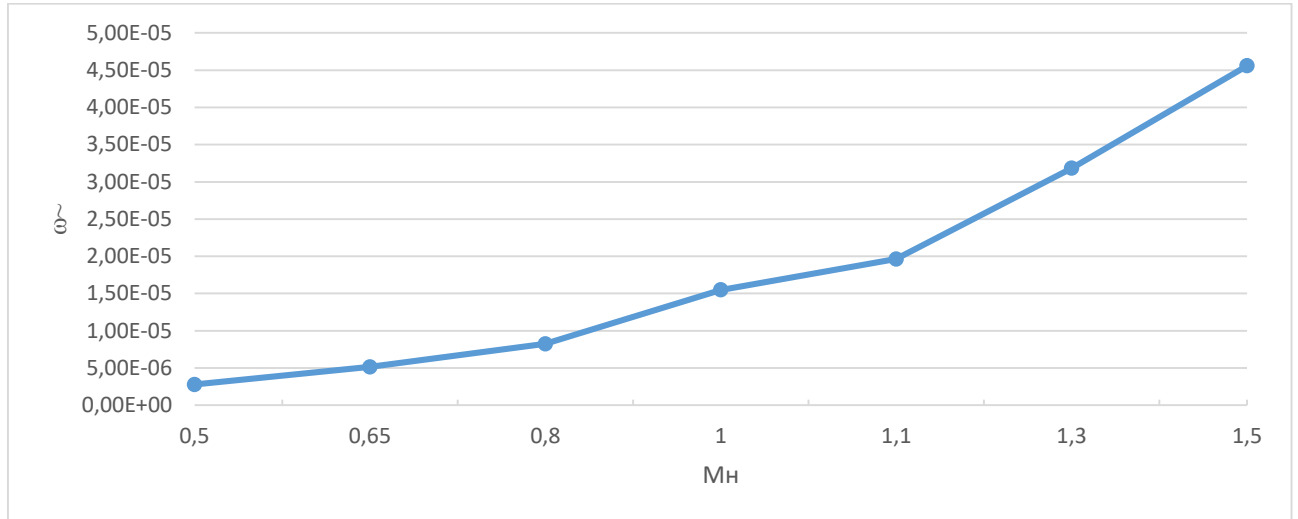


Рисунок 6.11 – Залежність похибки відпрацювання швидкості від M_n

Де $\tilde{\omega} = \omega^* - \omega$ - похибка швидкості, яка рівна різниці заданої швидкості та реальної.

Як показує аналіз, при коливанні моменту навантаження від $0,5 M_n$ до $1,5 M_n$, похибка відпрацювання швидкості змінюється в межах від $0,18 \cdot 10^{-5} \%$ до $2,94 \cdot 10^{-5} \%$, що в повній мірі задовольняє обмеження визначені коливальністю тягового каната.

Накидання різного моменту навантаження показало, що наша система є стійкою до такого роду збурень, адже завдяки відпрацюванню алгоритму прямого векторного керування та регулювання потокозчеплення швидкість завдання відпрацьовується з високою точністю, та коливання тягового канату, зв'язані з ривками чи пуском ЕД дисапуються та не мають вагомego впливу на електромеханічну систему.

Висновки до шостого розділу:

У розділі досліджено статичні та динамічні режими роботи обраного асинхронного двигуна з системою керування перетворювачем частоти. За допомогою програми MATLAB Simulink була створена модель ПЧ-АД, в якій промодельовано роботу двигуна в номінальному режимі та при накиданні різного моменту навантаження. Отримані графіки перехідних процесів представлені на рисунках 6.4 – 6.10 відповідно.

В усіх випадках векторного керування умови полеорієнтування та відпрацювання заданої траєкторії кутової швидкості виконуються асимптотично. Похибка відпрацювання швидкості є мінімальною. Отже, електропривід підвісної канатної дороги успішно виконує поставлене завдання за даної системи керування, а всі коливання тягового канату гасяться та не мають впливу на електромеханічну систему. Це свідчить про правильність попередніх розрахунків та вірний вибір системи управління ПЧ-АД.

ВИСНОВКИ

У роботі, відповідно до поставленого завдання спроектувати автоматизовану систему електроприводу, було виконано аналітичний огляд, детально розглянуті основні конструктивні елементи та сфери їх застосування, а також проведено аналіз існуючих технічних рішень щодо систем електроприводу.

На основі заданих вимог та аналізу діючих у світовій практиці систем було обрано систему: асинхронний двигун у комбінації з частотним перетворювачем. Базуючись на проведеному розрахунку потужності електроприводу, був обраний двигун АОД-1250-4У1 потужністю 1250 кВт, пройшовши перевірку за пусковим моментом та перевантажувальною здатністю. Двигун задовольняє всім вимогам, тому його використовують у подальших розрахунках електричних параметрів та основних елементів силового контуру.

Відповідно було обрано перетворювач частоти фірми АВВ марки ACS 5060-A1A-M5 потужністю ($P_n = 1700$) кВт, який відповідає умовам і повністю сумісний з обраним двигуном АОД-1250-4У1 для приводу підвісної канатної дороги (ПКД).

Крім того, в дипломній роботі наведено опис векторного керування асинхронним електроприводом. Представлено математичну модель АД у стаціонарній системі координат (a-b). За допомогою програми MATLAB Simulink була змодельована робота електромеханічної системи при номінальному навантаженні та режимах з різними величинами моментів навантаження. Результати показали, що електропривід успішно виконує поставлене завдання при даній системі керування, похибка відпрацювання швидкості є майже нульовою, що повністю задовольняє обмеження, визначені коливаннями тягового каната, коливання якого гасяться та не впливають на електромеханічну систему. Отже, це свідчить про правильність усіх розрахунків та вірний вибір системи управління, а саме ПЧ-АД.