НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем, електроприводу та електромобільності

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис)

“__ ”_____20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
на тему: Тягова електромеханічна система роботизованого вагону метро

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕП-71

Бреус Володимир Олександрович _____
(прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Керівник: доцент, к.т.н., Приймак Богдан Іванович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант_____ _____ _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент: доцент, к.т.н., Цивінський Сергій Сергійович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2021 р.

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	А4	141.7101.017.БР	Завдання на дипломний проект	2	
2	А4	141.7101.017.БР	Пояснювальна записка	83	
3	А1	141.7101.017.БР	Креслення загального виду		
			вагону метрополітену	1	
4	А1	141.7101.017.БР	Функціональна схема ПЧ-АД	1	
5	А1	141.7101.017.БР	Результати досліджень	1	

Пояснювальна записка
до дипломного проекту

на тему: Тягова електромеханічна система роботизованого вагону метрополітену

Київ – 2021

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис)
«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Бреусу Володимиру Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Тягова електромеханічна система роботизованого вагону метрополітену,

керівник проекту Приймак Богдан Іванович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___»_____ 20__ р. №_____

2. Термін подання студентом проекту 10 червня 2021 року

3. Вихідні дані до проекту: Діаметр коліс D, м. – 0.78, Кількість двигунів – 4, Максимальна швидкість V, км/год. – 90, Повна маса вагона кг – 55000, Максимальне прискорення, a_{max},м/с^2 – 1.2, Максимальне сповільнення при повному завантаженні, b_{max}, м/с^2 – 1, Довжина шляху, м – 2000, Час зупинки, с –120.

4. Зміст пояснювальної записки: 1 Аналітичний огляд проблеми та формування технічних вимог до АЕП роботизованого вагону метро, 2 Розрахунок потужності електродвигуна та вибір силового обладнання, 3 Побудова функціональної схеми САК АЕП робовагону, 4 Математичний опис об'єкта керування, побудова

структурних схем та синтез регуляторів векторно-керованого АЕП робовагону метро, 5 Складання математичної моделі в MatLab/Simulink, дослідження усталених і перехідних процесів в САК АЕП робовагону метро, 6 Висновок, 7 Список літератури

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій.

1. Зовнішній вигляд вагону та структурна схема САК АД. 2.Схема принципова АЕП робовагону метро. 3.Результати моделювання САК АЕП

6. Дата видачі завдання _

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд проблеми та формування технічних вимог до асинхронного електроприводу (АЕП) роботизованого вагону метро роботизованого вагону метро	10.04.21	
2	Розрахунок потужності електродвигуна та вибір силового обладнання	20.04.21	
3	Побудова функціональної схеми САК АЕП робовагону метро	25.04.21	
4	Математичний опис об'єкта керування, побудова структурних схем та синтез регуляторів векторно-керованого АЕП робовагону метро	10.05.21	
5	Складання математичної моделі в MatLab/Simulink, дослідження усталених і перехідних процесів в САК АЕП робовагону метро	20.05.21	
6	Підготовка графічної частини	10.06.21	
7	Оформлення пояснювальної записки. Підготовка презентації дипломного проекту	11.06.21	

Студент _____ Володимир БРЕУС
(підпис)

Керівник проекту _____ Богдан ПРИЙМАК
(підпис)

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 83, рисунків - 34 , таблиць - 5 графічну частину на 3 листках А1.

В дипломному проекті виконано дослідження режимів роботи тягового асинхронного електроприводу робовагону метро. Проведено аналітичний огляд наявних на сьогодні робовагонів які працюють та проєктуються, тягових приводів та систем керування швидкістю робовагону. Були сформовані основні вимоги до електроприводу вагону метрополітену.

Проведені розрахунки Г-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна, виконано синтез регуляторів системи прямого векторного керування швидкістю вагону метро та приведення сумарного моменту інерції.

Проведено дослідження математичної моделі проєктованої системи та здійснено аналіз результатів моделювання.

РОБОВАГОН МЕТРОПОЛІТЕНУ, РЕГУЛЯТОР ШВИДКОСТІ, ПРЯМЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, АСИНХРОННИЙ ТЯГОВИЙ ПРИВОД, МОДЕЛЮВАННЯ

SUMMARY

The diploma project contains: pages - 83, figures - 34, tables - 5 graphic part on 3 sheets A1.

In the diploma project the research of operating modes of traction asynchronous electric drive of the subway slave car is executed. An analytical review of currently available working cars and operating, traction drive and speed control systems of the work car. The basic requirements to the electric drive of the subway car were formed.

Calculations of the L-shaped scheme of replacement of the induction motor are carried out, synthesis of regulators of system of direct vector control of speed of the subway car and reduction of the total moment of inertia is executed.

The research of the mathematical model of the designed system is carried out and the analysis of modeling results is carried out.

ROBOT SUBWAY CAR, SPEED REGULATOR, DIRECT VECTOR CONTROL, ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE, SIMULATION

ЗМІСТ

ВСТУП 10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ТА ФОРМУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ (АЕП) РОБОТИЗОВАНОГО ВАГОНУ МЕТРО 12
1.2 Приклади самокерованого потягу метро в різних куточках світу. 12
1.3 Вимоги до електроустаткування 14
1.4 Електроживлення потягів метро 16
1.5 Склад колісної пари 19
1.6 Тяговий двигун вагона 22
1.7 Вимоги до системи керування та електроприводу 26
Висновок до 1 розділу 27
2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ 28
2.1 Силовий розрахунок параметрів технологічного об’єкту 28
2.2 Визначення сили опору руху та моменту в сталому режимі роботи з максимальним завантаженням для АЕП робовагону метрополітену 33
2.3 Навантажувальна діаграма 34
2.4 Розрахунок потужності двигуна. Вибір двигунів 37
Визначення еквівалентного моменту: 37
2.5 Уточнення моменту інерції механізму. Побудова уточненої навантажувальної діаграми 39
2.6 Перевірка ЕД на нагрів по еквівалентному моменту і потужності 41
2.7 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна 43
2.8 Розрахунок основних елементів силової частини тягового електроприводу вагону метрополітена 50
Висновок до 2 розділу. 55
3 ПОБУДОВА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ДВИГУНА САК АЕП РОБОВАГОНУ МЕТРО 56
3.1 Модель електродвигуна у двофазній системі: 56
3.2 Алгоритм векторного керування двигуном: 56
Висновок до 3 розділу. 59

4 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ, ПОБУДОВА СТРУКТУРНИХ СХЕМ ТА СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОГО АЕП РОБОВАГОНУ МЕТРО 60
4.1 Синтез регуляторів системи керування АЕП робовагону 60
Висновок до 4 розділу. 66
5 СКЛАДАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ В MATLAB/SIMULINK ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАЛЕНИХ І ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В САК АЕП РОБОВАГОНУ МЕТРО 67
5.1 Опис моделі електроприводу 67
Висновок до 5 розділу: 76
ВИСНОВКИ 76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 78

ВСТУП

В наш час електропривод використовується майже в кожній виробничій галузі, а також у повсякденному житті. Такі галузі як сільське господарство, машинобудування та багато інших важко уявити без використання автоматизованого електропривода.

Транспорт також не є винятком. Але більшість транспортних засобів виконані на основі двигуна постійного струму, що є не дуже ефективно. Прогрес дав змогу на модернізацію та підвищення ефективності транспорту, впроваджуючи асинхронні приводи в цю галузь, що є менш дорогими та економічними відносно двигунів постійного струму. Питання енергозбереження для електропривода є основним.

Електроприводи, що керуються за допомогою перетворювачів, дозволяють оптимізувати використання електричної енергії. Завдяки такому розвитку напівпровідникової техніки у поєднанні з обчислювальними пристроями, стає можливим створити перетворювачі однофазного змінного струму в змінний трифазний і регулювати частоту струму. Це дало змогу використовувати асинхронні двигуни в вагонах метро. Вагони мають різне електроустаткування залежно від системи електричної тяги (в залежності від роду струму, від виду тягових електричних двигунів), від системи керування, кількості й потужності, від наявності й виду електричного гальмування й т.п.

Особливі вимоги , що висуваються до вагона залежить від його цільового призначення – вантажний, пасажирський, маневровий. Вагон метро – це дуже складний пристрій, кожен вузол якого має відповідне призначення

В метрополітені вагони оснащені двигунами постійного струму. Найбільш поширені двигуни з послідовним збудженням, що мають м'яку тягову характеристику. Але такі двигуни мають ряд недоліків. Ці недоліки полягають у відносно малій надійності колекторної конструкції; високих фінансових витратах на технічному обслуговуванні в умовах використання й ремонті; високої маси двигуна при відносно низьких значеннях моменту

обертання, що призводить до обмеження використання опорно-осьового підвішування двигуна в умовах твердого шляху; високій витраті кольорового металу й активних матеріалів; відносно невисокій реалізації зчіпної ваги вагону.

Більшість недоліків можна усунути переходом на безколекторні, зокрема асинхронні двигуни. Основними якостями яких є простота пристрою та обслуговування, відносно висока надійність, не висока ціна та нескладний пуск. Однак, частота обертання такого двигуна постійна й залежить від частоти струму, живлення й числа пар полюсів двигуна. Відповідно для регулювання частоти обертання таких двигуні, а отже, і швидкістю рухомого складу, можна тільки зміною частоти струму живлення й числа пар полюсів, що в недавньому минулому було в край важко здійснити. Також проблема виникала у підведенні трифазної напруги живлення: складність і непрактичність трифазної контактної мережі та недостатній розвиток напівпровідникових перетворювачів, тому використовувати ТАД було вкрай важко.

Метою даного диплому є розробка і дослідження тягового асинхронного двигуна робовагону метрополітену.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ТА ФОРМУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ (АЕП) РОБОТИЗОВАНОГО ВАГОНУ МЕТРО

1.1 Основні відомості про роботизований вагон метро

Робовагон метро - тип рейкового рухомого складу (вагон), призначений для експлуатації на лініях метрополітену. З причини особливостей експлуатації, вагони метрополітену мають суттєві відмінності від вагонів і локомотивів звичайних наземних залізниць. У переважній більшості вагони метрополітену перевозять пасажирів, проте існують і спеціалізовані вагони: для господарських потреб метрополітену і вантажні.

Вагон поїзда повинен бути виконаним [1] з тяговим електроприводом на базі асинхронних, двигунів з рекуперативно – реостатним взаємозамінним гальмуванням, з цифровим інтерфейсом керування електроприводом, допоміжними ланцюгами, системою реєстрації, діагностики та сертифікованою системою безпеки.

1.2 Приклади самокерованого потягу метро в різних куточках світу.

В Лондоні спроектували метрополітен майбутнього, який можливий без безпосередньої участі людини, потяг цього метро представлений на (рис 1.1).

Рисунок 1.1 – Самокерований потяг Британського метрополітену

Siemens представив вагон безпілотного потягу для метро Відня, в повністю автоматичному режимі нові потяги будуть використовуватися поки тільки на одній лінії метро (рис. 1.2).

Рисунок 1.2 – Вагон безпілотного метро Відня

Alstom поставив перші безпілотні поїзда для легкого метро Монреаля.

Створювана система легкого монреальського [2] метро буде припускати використання безпілотних поїздів представлених на (рис 1.3) . Потяги будуть

двовагонні, а також чотирьох вагонні – для роботи в години пікових навантажень.

Всього в Монреалі запланована експлуатація 212 вагонів Metropolis. Потяги з максимальною місткістю до 780 пасажирів будуть рухатися з середньою швидкістю 51 км/год, але будуть здатні розвивати швидкість до 100 км/год.

Рисунок 1.3 – Вагон безпілотного метро Монреаля

1.3 Вимоги до електроустаткування

На моторних вагонах встановлюється [2] тяговий електропривод, який включає 4 асинхронних тягових двигуна, контейнер тягового інвертора, гальма і дросель мережевого фільтра.

Тяговий електропривод повинен забезпечувати:

— пуск і розгін з необхідним прискоренням;

— плавне рекуперативно – реостатне електричне гальмування;

— плавний вхід в тяговий або гальмівний режим після вибігу;

— безконтактне перемикання силового ланцюга між режимами ходу і гальма;

— безконтактна зміна напрямку руху, в силових ланцюгах

— збереження працездатності вагона при проходженні неперекривних токорозділів в тяговому і гальмівному режимах.

Контейнер тягового інвертора - призначений для розміщення обладнання і апаратури управління тяговим приводом і харчування чотирьох асинхронних тягових двигунів. Тяговий інвертор, обладнання якого розміщується в контейнері, є перетворювачем напруги контактної мережі в трифазну напругу, регульоване по амплітуді і частоті.

За типом і наявності електричного гальмування електровози бувають*:* рекуперативного і реостатного гальмування, а також їх об'єднання, або повна відсутність електричного гальма.

За кількістю секцій електровози ділять на: одно-, двох-, трьох і чотирьох секційні.

Дросель мережевого фільтра спільно з конденсатором мережевого фільтра складають LC-фільтр низьких частот. Цей ланцюжок зменшує коливання струму, створювані інвертором і тим самим зменшують перешкоди, що передаються в мережу, а також захищає тягове обладнання від кидків напруги в контактній мережі.

Дросель складається з мідної котушки, яка кріпиться на магнітопроводі бронестержневого типу.

1.4 Електроживлення потягів метро

Потяги метро складаються з кількох вагонів. Ширина колії метрополітену неоднакова в різних країнах: зазвичай відповідає прийнятій ширині колії залізниці. Живлення потягів метро електричним струмом виконується від третьої рейки за радянськими нормативами, в інших країнах буває від повітряної контактної мережі (наприклад, у Відні).

Третя рейка (контактна рейка) — жорсткий контактний дріт, призначений для здійснення ковзного контакту зі струмоприймачем рухомого складу (моторного вагона, електровоза).

Головна перевага контактної рейки — надійне струмознімання при контакті з струмоприймачем моторних вагонів або електровозів, розташованими на ходових частинах колісних візків. Також виключаються коливання струмоприймачів і відрив їх від контактного рейки, а отже, порушення контакту і розрив ланцюга струму, іскріння і дугоутворення, які руйнують контактні поверхні.

Провідна область застосування контактних рейок — підземний залізничний транспорт, зокрема, забезпечення руху поїздів метрополітену. Рідше це технологічне рішення застосовується на відкритих лініях при відносно невисокій напрузі (не більше 150 В).

Також контактна рейка застосовується для забезпечення енергією підйомного устаткування (наприклад піднімальних кранів) і складських транспортних пристроїв, підвісних доріг, електроталій, верстатів, освітлювальних пристроїв інших подібних технічних засобів.

Розрізняють два типи контактних рейок:

— бічна контактна рейка — закритий згори і з боків ізоляційним коробом, електроживлення знімається проходячим знизу контактним башмаком (нижній струмознімач).

— нижня контактна рейка — ізоляція відсутня.

Залежно від того, як розташована контактна поверхня мають місце: нижній струмознімач — контактна поверхня знизу (рис.1.1); і верхній струмознімач — контактна поверхня згори (рис.1.2).

Рисунок 1.4 – Нижній струмознімач

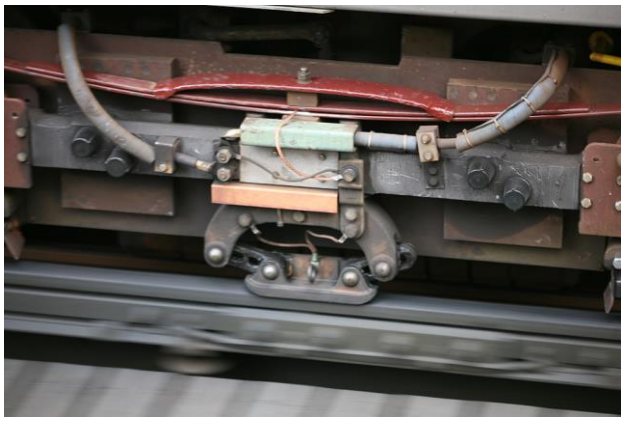

Рисунок 1.5 – Верхній струмознімач

Переваги:

— використання контактної рейки в метрополітені замість контактного дроту дозволяє зменшити габарити тунелів.

— контактна рейка має високу надійність і довговічність.

— проста в ремонті і обслуговуванні.

Недоліки:

(при застосування на наземному транспорті)

— низька електробезпечність.

— незахищеність від снігових заметів.

1.4.1 Матеріал, профіль, довжина

Через те, що контактна рейка є провідником електричного струму, його омічний опір має бути малий, тому при виготовленні контактної рейки використовують низьковуглецеву сталь, оскільки домішок вуглецю збільшує електричний опір.

Профіль і переріз контактної рейки збігаються з аналогічними параметрами звичайної колійної рейки.

Стандартна довжина контактної рейки становить 12,5 м. На прямих і заокругленнях з радіусом 300 м і в тунелях контактні рейки зварюють в секції завдовжки 100 м, на наземних ділянках довжина секцій становить 37,5 м, а на паркових коліях і заокругленнях радіусом менше 300 м — 12,5 м.

1.4.2 Підвіска контактної рейки

Встановлення контактної рейки здійснюють за допомогою металевих опор-кронштейнів до гори низом. Кронштейни у свою чергу кріпляться до шпал. За такої підвіски контактний башмак, що встановлений на візку вагона та підтягується пружинами вгору, контактує з верхньою повернею рейки — нижнє знімання струму.

Кронштейни встановлюються на певній відстані один від одного — зазвичай 4,25-5,5 м. У місцях температурних стиків відстань між кронштейнами зменшується. Кронштейн це вигнута з швелера деталь. У верхній частини деталі є отвір і приварена, так звана «коробочка», а нижня частина, так званий «хвіст», кріпиться до шпали. Висота кронштейна, яка визначає висоту контактної рейки, залежить від типу колійних рейок .

Кріпильний вузол, розташований у верхній частині кронштейна, має достатню міцність і забезпечує надійну ізоляцію контактної рейки від кронштейна за допомогою порцелянових ізоляторів і поліетиленових прокладок.

1.5 Склад колісної пари

Колісна пара складається з двох коліс, осі і одного або двох зубчастих коліс.

На вісь колісної пари напресовують за допомогою преса колісні центри. Колісні центри вагонів виготовляються у вигляді дисків з прорізами (рис. 1.6)

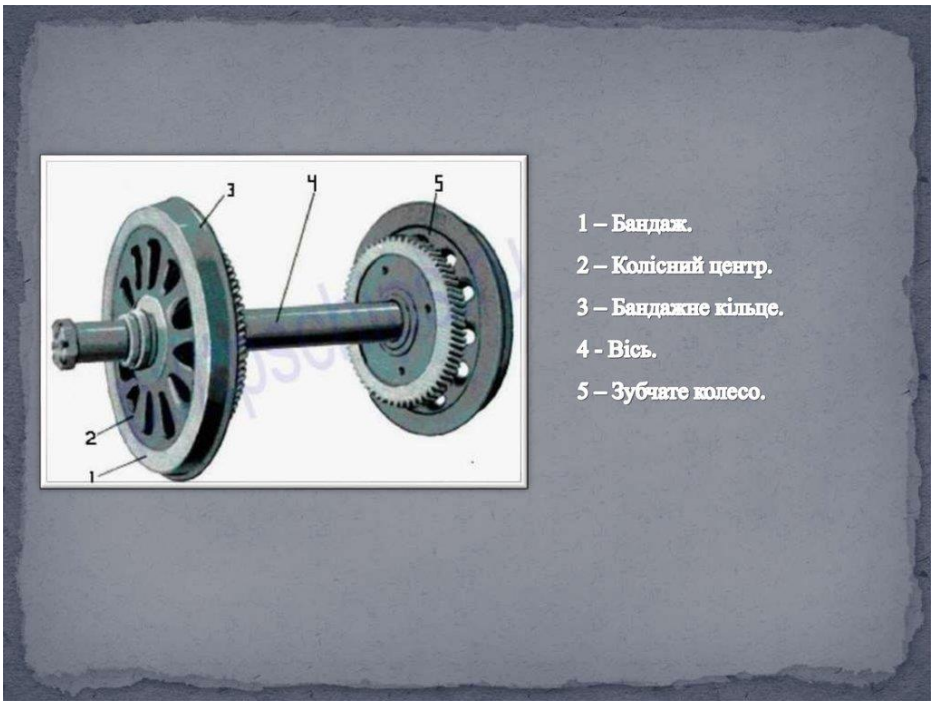

Рисунок 1.6 – Конструкція колісної пари

На колісні центра в гарячому стані надягають бандажі, поверхня катання яких потім обробляють, надаючи їй конусної форми - конічний профіль. З внутрішньої сторони бандажу знаходиться виступальний гребінь, який перешкоджає сходу вагону з рейок. Конічна форма бандажів забезпечує їх рівномірне спрацьовування по ширині і спокійне проходження вагону на поворотах. У поворотах довжина зовнішньої рейки більше, ніж внутрішньої, і

колеса, посаджені на одну вісь, повинні пройти різні відстані. Два колеса обертаються з однією частотою. Якщо їх діаметри рівні, то колесо, яке котиться по зовнішній рейці, змушене проковзувати, що викликає швидкий знос бандажа. Але під час руху по кривій, вагон разом з колісними парами під дією відцентрової сили зміщується в бік зовнішньої рейки. При цьому зовнішнє колесо котиться по більшому колу кочення, а внутрішнє по меншому. У результаті колеса проходять без прослизання різні шляхи при одній тій же частоті обертання.

В процесі експлуатації вагона метро внаслідок зносу профіль бандажів змінюється. Тому після певного пробігу вагона профіль бандажів відновлюють шляхом повторної обробки. Коли зніс бандажів досягне граничного, бандажі знімають з колісних центрів і замінюють новими.

Зубчаті колеса пресують в гарячому або холодному стані на подовжені маточини колісних центрів або безпосередньо на вісь.

Букса і підшипники передають на шийки осей колісної пари, частину ваги візка і кузова вагона. У таких підшипниках втрачається багато енергії на подолання сили тертя; в разі їх застосування збільшується опір руху в момент рушання поїзда з місця, особливо в зимовий час, коли мастило стає густіше. Підшипники забезпечені бронзовими вкладишами з бабітовим відливом. Одну суцільну половину вкладиша встановлюють в основу підшипнику, відлите як одне ціле з кістяком двигуна, а іншу, з вікном - в шапку підшипнику. На виготовлення таких підшипників витрачається велика кількість кольорових металів.

Перші вагони на підшипниках кочення з'явилися у Швеції в 1922 р. Після всебічних випробувань встановили, що опір вагонів при рушанні різко падає, а під час руху знижується на 38% в порівнянні з опором при підшипниках ковзання.

З 1957 р. на вагонах встановлюють тільки букси з підшипниками кочення. Між внутрішнім кільцем підшипника, насадженим на шийку осі, і зовнішнім, яке знаходиться в корпусі букси, розташовані ролики.

Ролики утримуються на однаковій відстані одна від одної спеціальним пристроєм - сепаратором. Можливість вертикальних коливань рамки візка щодо колісної пари, збереження паралельності їх осей, передача горизонтальних сил забезпечуються буксовими напрямними, розташованими симетрично з двох сторін від корпусу буксами. Проте за тертя букс про щелепи дотичні поверхні швидко зношуються.

Букса з'єднана з кронштейнами рами двома поводками. У з'єднаннях поводків з корпусом букси і кронштейнами використані гумометалеві втулки та шайби. Цим забезпечується можливість відносних переміщень без тертя і зносу деталей повідків завдяки деформації гумки втулок та шайб.

Осі колісної пари з’єднуються з валами тягового електродвигуна через редуктор, що призводить колеса в рух. Загальний вид асинхронного тягового електродвигуна зображено на (рис. 1.7).

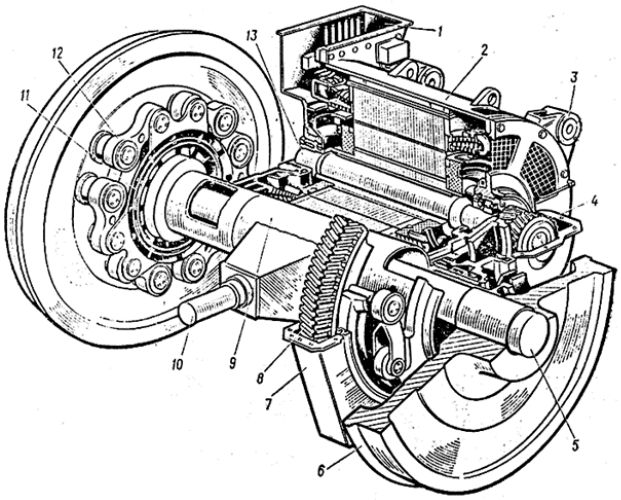

Рисунок 1.7 - Загальний вигляд асинхронного тягового двигуна

1- вентиляторний отвір двигуна; 2 - тяговий двигун; 3 - кріплення блоку двигун-редуктор; 4 - мале зубчасте колесо редуктора; 5 - вісь колісної

пари; 6 - колесо;7 - кожух редуктора; 8 - велике зубчасте колесо редуктора; 9 - вал муфти повздовжньої компенсації; 10 - цапфа для кріплення блоку двигун-редуктор на рамі візка; 11 - повідкова напівмуфта; 12 - повідок муфти; 13 – вал якоря.

1.6 Тяговий двигун вагона

На залізницях у якості тягових двигунів у переважній більшості випадків використовують двигуни постійного струму. Найбільш поширеними є двигуни з послідовним збудженням, що мають м'яку тягову характеристику. Незважаючи на те, що двигуни постійного струму широко використовуються як тягові двигуни, вони мають ряд істотних недоліків. Основними з яких є порівняно невисока надійність колекторного вузла й щіткового апарата; високі витрати на технічному обслуговуванні в умовах експлуатації й ремонті; підвищеній масі двигуна при порівняно [3] низьких значеннях обертового моменту, що обмежує використання опорно-осьового підвішування двигуна в умовах твердого шляху; підвищеній витраті кольорового металу й активних матеріалів; порівняно невисокій реалізації зчіпної ваги локомотива.

Усунення зазначених недоліків можливо при використанні асинхронних тягових двигунів. А саме зняття обмежень по потужності, забезпечення гранично високого використання зчеплення колеса з рейкою.

Трифазні асинхронні двигуни найпоширеніші у промисловості. Позитивні якості важко переоцінити: простота пристрою й обслуговування, висока надійність, низька вартість. Однак, як відомо, частота обертання асинхронного двигуна майже постійна й мало залежить від навантаження, вона визначається частотою струму живлення й числом пар полюсів двигуна. Виходить з цього регулювати частоту обертання таких двигунів, а відповідно і швидкість руху поїздів можна тільки при зміні частоти струму живлення й

числа пар полюсів, що до недавнього часу було дуже важко. Також існували проблеми з підведенням трифазної напруги живлення: складність і непрактичність трифазної контактної мережі та недостатній розвиток напівпровідникових перетворювачів. Тому асинхронні двигуни донедавна майже не застосовували на вагонах метрополітену.

Завдяки зусиллям, спрямованим на одержання найпростіших і надійних систем регульованого електропривода, скорочення релейно-контактної апаратури, були придумані дроселі, які включалися в статорну обмотку двигуна. Значні габаритні розміри дроселів, інерційність, маленький діапазон регулювання швидкості та зменшення коефіцієнта потужності обумовили недоліки данної системи електропривода.

Конструкція тягового асинхронного двигуна проста. Він складається з обертового ротору та нерухомого статору. Асинхронний двигун по типу виконання буває з короткозамкненим ротором і з фазовим ротором. У якості тягових використовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором.

Осердя такого ротора, як і статора, збирають із електротехнічної сталі. Обмотка ротора складається з мідних стержнів, розташованих у пазах осердя й замкнутих з торців кільцями.

У пазах статора розміщено 3 обмотки, зміщені одна від другої на 120°. Ці обмотки мають з’єднання зірка. При підключенні обмоток у ланцюги з трьома фазами по кожній з них проходить змінний струм і створюється три змінних магнітних потоки. Потоки, складаючись, утворять результуючий потік, що обертається із частотою 3000 об/хв при одній парі полюсів на кожну фазу. Магнітний потік статора двигуна, перетинаючи обмотку ротора, наводить в ній ЕРС. Під дією ЕРС в обмотці ротора протикає струм, що створює свій магнітний потік. Магнітні потоки статора й ротора взаємодіють, у результаті чого ротор починає обертатися.

Для перетинання силовими лініями обмотки ротора частота обертання ротора трішки менша ніж частота обертання магнітного потоку статора. Різниця між ними називається ковзання. Зі зміною пар полюсів, змінюється частота обертання магнітного потоку: 1500, 1000, 750, 3000 об/хв і т.д. Частоту обертання ротора можна визначити за формулою (1.1) і вона буде трішки менше цих значень.

$$\omega = \omega_c (1 - S), \tag{1.1}$$

де ω - кутова швидкість ротора АД;

$\omega_c = \frac{2\pi f}{p}$ - синхронна швидкість АД (частота обертання магнітного потоку статора);

p – кількість пар полюсів;

f – частота напруги живлення;

S – ковзання АД.

Момент асинхронного двигуна визначається за формулою (1.2):

$$M = \frac{3U_2^1 \square R_2^{'}}{\omega_c S((R_1 + R_2^{'} / S)^2 + X_k^2}, \tag{1.2}$$

де U_1 - напруга статора;

$R_1, R_2^{'}$ - активний опір статора та приведений опір ротора;

$X_1, X_2^{'}$ - реактивний опір статора та приведений опір ротора;

$X_k = X_1 + X_2^{'}$.

Ковзання становить 1-4% синхронної частити обертання. Та якщо міняти частоту напруги живлення в широких межах, що призводить до змінення синхронної частоти та частоти обертання ротора. Крім частоти

потрібно регулювати напругою, що живить асинхронний двигун, для отримання тягових характеристик, такої як при використанні двигуна с послідовним збудженням. Напруга може регулюватися перемиканням вторинної обмотки тягового трансформатора за допомогою головного контролера ступінчасто. Потім напруга випрямляється за допомогою випрямляча і подається на інвертор.

Керуючи відкриванням та закриванням силових ключів інвертора(тиристорів або транзисторів) в певній послідовності, одержують трифазну напругу, що підводиться до обмотки статора асинхронного двигуна АД. Звичайні трифазні асинхронні [3] двигуни використовують змінну трифазну напругу і струм, що змінюється синусоїдально. Здвиг напруги живлення кожної фази зміщений на 120° ел. Для кращого розуміння зміна напруги на кожній фазі показано на окремій осі. Силові ключі перемикаючись створюють напругу східчастої форми в кожній фазі для керування електровозом. Для керування частотою напруги, регулюють частоту відмикання ключів.

Реверс тягових асинхронних двигунів виконує ,перемикаючий ланцюг керування ключів інвертора, тому що для зміни обертання досить змінити місцями дві фази напруги живлення.

Основними перевагами використання тягових асинхронних двигунів від двигунів постійного струму є:

1) спрощена конструкція АД в порівнянні з колекторними та збільшення надійності;

2) при використанні безконтактних пристроїв перетворення потужності підвищується надійність електричного обладнання;

3) автоматизація режиму руху вагону;

4) жорстка тягова хар-ка при буксовці покращує тягові властивості вагону. З результатів дослідів, збільшення коефіцієнта зчеплення на 20-45%;

5) збільшенння потужності та момент тягового двигуна при тих же габаритних показниках;

6) використання кольорових металів. Асинхронний двигун при проектуванні потребує в 2-2.5 менше міді ніж колекторні тягові двигуни пульсуючого стуму.

Перераховані переваги не залишають сумнівів у доцільності широкого впровадження асинхронних тягових двигунів в електричній тязі. Наявний досвід проектування й роботи електрорушійного складу із названими двигунами повністю підтверджує це.

1.7 Вимоги до системи керування та електроприводу

Тяговий електродвигун (скорочено ще ТЕД) призначений для здійснення руху транспортних засобів (таких як вагони метрополітену, електропоїзди, тролейбуси, трамваї, електромобілі, великовантажні автомобілі з електричним приводом). Фундаментальні відмінності ТЕД від звичайних електричних двигунів полягає в певних умовах монтажу електромоторів та досить обмеженому посадковому місці для їх розташування. Ось це стало причиною для деяких конструкцій (обмежена довжина і діаметри, спец-пристосування для кріплення, багатогранні станини і т.д.).

Такі двигуни мають різні вимоги в залежності від їхнього роду використання. Тягові електродвигуни [4] вагону мають бути реверсними та регульованими. Вони повинні мати захист від пилу та води.

Система керування має забезпечувати роботу в двох зонах регулювання швидкості. В першій зоні має забезпечуватися діапазон регулювання швидкості 1:100, з метою уможливлення достатньо плавного руху на малих швидкостях в процесі маневрування при з’єднані вагонів рухомого складу. В другій має забезпечитися діапазон регулювання швидкості в двічі більшої за

номінал, щоб забезпечити виконання вимог до максимально необхідної швидкості.

Система керування повинна забезпечувати обмеження моменту двигуна таким чином, щоб в першій зоні швидкості він не перевищував номінального значення, а в другій щоб вихідна потужність двигуна не перевищувала номінального значення.

Висновок до 1 розділу

1. В першому розділі дипломного проекту було виконано аналітичний огляд електромеханічної частини електровозу, види та спосіб живлення електроприводів.

2. Приведені переваги використання асинхронних двигунів замість двигунів постійного струму.

3. Складені вимоги до електроприводу та системи керування.

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

2.1 Силовий розрахунок параметрів технологічного об’єкту

Роботу двигуна на всьому проміжку руху зображено на тахограмі. (Рис. 2.1):

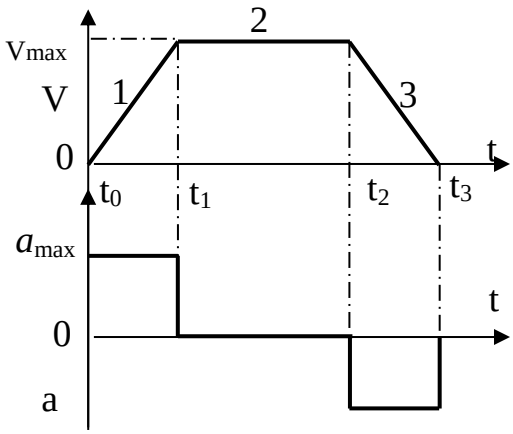

Рисунок 2.1 – Тахограми руху тягового двигуна

На рисунку показано:

t_1 - час пуску двигуна;

t_0 – час в який досягається максимальна швидкість;

t_2 - час завершення руху з постійною максимальною швидкістю, початок гальмування;

t_3 - час повної зупинки;

1 - ділянка розгону двигуна;

2 - ділянка руху з рівномірною швидкістю;

3 - ділянка гальмування двигуна.

Об’єктом керування обраний вагон типу 81-717/714 Київського метрополітену. Зовнішній вигляд вагону [5] представлений на (рис.2.1). Технічні характеристики даного вагону записані в таблиці 2.1.

Рисунок 2.2 – Досліджуваний вагон типу 81-717/714 Київського метрополітену

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики вагону типу 81-717/714

Діаметр коліс D, м.	0.78
Кількість колісних пар	4
Кількість двигунів	4
Максимальна швидкість V, км/год.	90
Повна маса вагона (з пасажирами), кг	55000
Максимальне прискорення, a_{max},м/с^2	1.2
Максимальне сповільнення при повному завантаженні, b_{max}, м/с^2	1
Довжина шляху, м	2000
Час зупинки, с	20

Час першої ділянки, на якій відбувається розгон, розраховуємо за формулою:

$$\Delta t_p = t_1 - t_0 \tag{2.1}$$

За рівнянням рівноприскореного руху розрахуємо час розгону:

$$\Delta t_p = \frac{v_P}{a_{\max}} \tag{2.2}$$

$$\Delta t_p = \frac{23.6}{1.2} = 19.6\,\text{с}$$

Відстань, пройдена на першій ділянці розгону буде дорівнювати:

$$S_p = \frac{a \cdot \Delta t_p^2}{2} \tag{2.3}$$

$$S_p = \frac{1.2 \cdot 19.6^2}{2} = 230.5 м$$

Час третьої ділянки, гальмування, розрахуємо за формулою:

$$\Delta t_Г = t_3 - t_2 \tag{2.4}$$

За рівнянням рівноприскореного руху, розрахуємо час гальмування:

$$\Delta t_Г = \frac{V_{\max}}{b_{\max}} \tag{2.5}$$

$$\Delta t_Г = \frac{23.6}{1} = 23.6\,\text{с}$$

Відстань, пройдена по третій ділянці, гальмування буде дорівнювати:

$$S_Г = \frac{a \cdot \Delta t_T^2}{2} \tag{2.6}$$

$$S_Г = \frac{1.2 \cdot 23.6^2}{2} = 334.2\,\text{м}$$

Час руху на другій ділянці, з швидкістю буде дорівнювати:

$$\Delta t_1 = t_2 - t_1 \tag{2.7}$$

Відстань, пройдена за час руху з швидкістю:

$$S_н = V_{\max} \cdot \Delta t_1 \tag{2.8}$$

Загальна довжина руху:

$$S = 2000 \text{ м.}$$

Шлях включає в себе ділянку розгону, ділянку з постійною швидкістю та ділянку гальмування :

$$S = S_р + S_н + S_Г \tag{2.9}$$

Звідси відстань, пройдена з постійною швидкістю:

$$S_н = S - S_р - S_Г \tag{2.10}$$

$$S_н = 2000 - 230.5 - 334.2 = 1435.3 \text{ м}$$

Час руху на другій ділянці, з постійною швидкістю розраховується за формулою:

$$\Delta t_1 = \frac{S_н}{V_{\max}} \tag{2.11}$$

$$\Delta t_1 = \frac{1435.3}{23.6} = 60.8 \text{ с}$$

Визначаємо час повної роботи в яку входить: розгон, рух з постійною швидкістю та гальмування:

$$t_р = \Delta t_р + \Delta t_1 + \Delta t_Г \tag{2.12}$$

$$t_р = 19.6 + 60.1 + 23.6 = 103.3 \text{ с}$$

Час зупинки:

$$t_о = 120 \text{ с.}$$

Тоді час циклу буде дорівнювати:

$$T_Ц = t_р + t_о \tag{2.13}$$

$$T_Ц = 103.3 + 120 = 223.3 \text{ с.}$$

Тривалість включення розраховується за формулою:

$$ПВ\% = \frac{t_p}{t_p + t_o} \cdot 100\%, \quad (2.14)$$

де t_p - загальний час роботи (руху поїзду), t_o - стоянки на зупинці (паузи).

$$ПВ\% = \frac{103.3}{103.3 + 120} \cdot 100\% = 46\%$$

Тривалість циклу дорівнює приблизно 2 хв, та ПВ%= 46%, в цьому випадку двигун працює в повторному короткочасному режимі при якому двигун не встигає нагрітися до максимальної температури та за час зупинки не встигає охолонути до температури навколишнього середовища.

2.2 Визначення сили опору руху та моменту в сталому режимі роботи з максимальним завантаженням для АЕП робовагону метрополітену

Максимальна швидкість обертання ходового колеса буде дорівнювати:

$$n_K = \frac{V_{\max} 60}{\pi D_k}, \quad (2.15)$$

де D_k – діаметр колеса.

$$n_K = \frac{23.6 \cdot 60}{3.14 \cdot 0.78} = 580.3 \text{ об/хв}$$

Максимальна швидкість обертання валу двигуна залежить від передаточного числа редуктора та буде дорівнювати :

$$n_{ДВ\max} = i n_K, \quad (2.16)$$

де i – передаточне число редуктора.

Підставивши значення, отримаємо:

$$n_{ДВ\max} = 5.75 \cdot 580.3 = 3336.7 \text{ об/хв.}$$

Сила опору руху вагону визначається за формулою:

$$F_C = \frac{m_z g}{R_k}\left(\beta r_Ц + f\right)K_p, \qquad (2.17)$$

де g = 9.8 м / с^2 - прискорення вільного падіння;

K_p -коефіцієнт враховує тертя ребер з рейками і лежить в межах від 1.1 до1.3. Приймаємо K_p = 1.2;

f - коефіцієнт тертя кочення. Приймаємо рівним = 0.0005;

$r_Ц$ -Радіус цапфи. Приймаємо рівним = 0.06 м;

β- коефіцієнт тертя ковзання, який може лежати в межах від 0.05 до 0.1. Приймаємо рівним β = 0.08;

R_k - радіус колеса.

Підставивши всі параметри, отримаємо:

$$F_C = \frac{55000 \cdot 9.8}{0.39}\left(0.08 \cdot 0.06 + 0.0005\right) \cdot 1.2 = 7324.9 \text{ Н}$$

Момент навантаження при максимальному завантажені вагону буде дорівнювати:

$$M_C = \frac{F_C R_k}{i\eta}, \qquad (2.18)$$

$$M_C = \frac{7324.9 \cdot 0.39}{5.75 \cdot 0.9} = 552 \text{ Нм}$$

2.3 Навантажувальна діаграма

На навантажувальній діаграмі потрібно врахувати зниження потоку, яке призведе до зниження моменту, тобто перехід в режим постійної потужності. Діапазон керування вище номінальної швидкості дорівнює:

$$\mathrm{D} = \frac{\mathrm{n}_{\text{ДВmax}}}{\mathrm{n}_{\text{ДВН}}} = \frac{3336.7}{1474} = 2.3,$$

то зменшувати потік потрібно в 2.3 рази, що призведе до зменшення моменту в 2.3 рази.

Номінальні швидкість двигуна в рад / с розраховується за формулою:

$$\omega = \frac{\pi n}{30}, \tag{2.19}$$

де π=3.14;

π -швидкість двигунів в об/хв.

Максимальна швидкість двигунів буде дорівнювати

$$\omega_{ДВmax} = \frac{\pi n_{ДВmax}}{30} \ . \tag{2.20}$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$\omega_{ДВmax} = \frac{3.14 \cdot 333.6}{30} = 34.9 \text{ рад/с.}$$

Номінальна швидкість двигунів буде дорівнювати:

$$\omega_{ДВН} = \frac{\pi n_{ДВН}}{30}. \tag{2.21}$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$\omega_{ДВН} = \frac{3.14 \cdot 1474}{30} = 154.32 \text{ рад/с.}$$

Визначення моменту інерції рухомого складу при виконуємо за формулою, яка отримана з умов збереження кінетичної енергії для поступального руху з масою поїзда m_z, що подана у таблиці 1.1:

$$J_T = m_z \rho^2, \tag{2.22}$$

де ρ – радіус приведення;

$$\rho = \frac{V_{max}}{\omega_{ДВmax}} = \frac{23.6}{34.9} = 0.67. \tag{2.23}$$

Звідси розраховуємо момент інерції поїзду при поному навантаженні:

$$J_T = m_z \rho^2 = 55000 \cdot (0.67)^2 = 24689.5 \text{ кгм}^2.$$

Визначимо момент, що необхідний на першій ділянці, для розгону поїзду відповідно із заданим прискорення:

$$M_1 = J_T \frac{\omega_{ДВmax}}{\Delta t_P} + M_{TP}, \qquad (2.24)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$M_1 = 24689.5 \frac{34.9}{19.6} + 552 = 44450 \text{ Нм}.$$

Визначимо момент, який необхідний на третій ділянці, для гальмування вагону із заданим прискорення гальмування:

$$M_2 = M_{TP} - J_T \frac{\omega_{ДВmax}}{\Delta t_T}, \qquad (2.25)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$M_2 = 552 - 24689.5 \frac{34.9}{23.6} = -35741.5 \text{ Нм}$$

Виходячи із розрахованих даних, нагрузочна діаграма матиме вигляд зображени на рисунку 2.2.

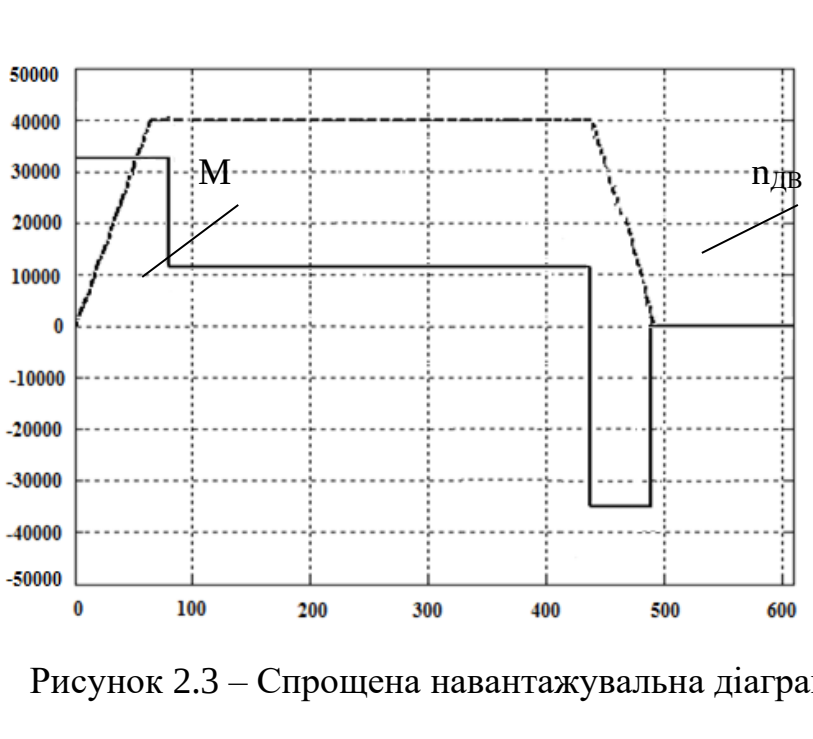

Рисунок 2.3 – Спрощена навантажувальна діаграма

На рис. 2.2. зображена діаграма, що показує коли вагон виконує розгін при повному навантаженні до швидкості 90 км/год, рухається з максимальною швидкістю та здійснює гальмування до повної зупинки.

2.4 Розрахунок потужності двигуна. Вибір двигунів

Визначення еквівалентного моменту**:**

$$M_{ЕКВ_Д} = \sqrt{\frac{(M_1^2 \Delta t_P + M_c^2 \Delta t_1 + M_2^2 \Delta t_T)}{T_Ц}}, \qquad (2.26)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$M = \sqrt{\frac{(44450)^2 \cdot 19.6 + (552)^2 \cdot 60.8 + (35741.5)^2 \cdot 23.6}{223.3}} =$$
$$= 13666 Нм$$

Приведемо момент для стандартного ПВ за формулою:

$$M_{ЕКВ} = M_{ЕКВ_Д} \sqrt{\frac{ПВ\%}{60\%}}, \qquad (2.27)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$M_{ЕКВ} = 13666 \sqrt{\frac{46}{60}} = 11889 \text{ Нм}$$

Еквівалентна сумарна потужність двигунів визначається за формулою:

$$P_{ЕКВ} = k_з M_{ЕКВ} \omega_{ДВ}, \qquad (2.28)$$

де $k_з$ – коефіцієнт запасу. приймаємо рівним $k_з$=1.3

$$P_{ЕКВ} = 1.3 \cdot 11889 \cdot 154.32 = 2385 \text{ кВт.}$$

Вагон має 4 двигуни, що для приведення в рух 4 пар коліс , звідси потужність одного двигуна дорівнюватиме:

$$P_{ЕКВ1Дв} = \frac{2385}{4} = 596.3 \text{ кВт.}$$

За попередньо розрахованою потужністю обираємо двигун фірми Simens із серією $1LA8405-4AB$, параметри якого занесені до таблиці 2.1

Таблиця 2.2– Основні параметри двигун $1LA8405-\ 4AB$

Номінальна потужність	$P_Н$, кВт	630
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1Н}$, В	690
Синхронна частота обертання	n_0, об/хв	1500
Номінальна частота обертання	$n_Н$, об/хв	1474
Кількість пар полюсів	p	2
Номінальне ковзання	$s_Н$	$5{,}33\cdot10^{-3}$
Номінальний коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	0,88
Номінальний ККД	$\eta_í$	0,96
Кратність пускового струму	$k_i=\frac{I_ï}{I_{1í}}$	6.8
Кратність пускового моменту	$k_M=\frac{M_ï}{M_í}$	1,9
Кратність максимального моменту	$k_{max}=\frac{M_{max}}{M_{НОМ_ДВ}}$	2,7
Момент інерції на валу двигуна	$J_{дв}$, кг $\cdot$ м^2	27
Номінальний момент	$M_{НОМ_ДВ}$, Н$\cdot$м	4032

Діапазон регулювання вище частоти двигуна визначається за формулою:

$$D = \frac{n_{ДВmax}}{n_{ДВН}}, \quad (2.29)$$

де $n_{ДВН}$ – номінальна частота обертання двигуна.

$$D = \frac{3336.7}{1474} = 2.26$$

Звідси потік послаблюється в 2.26 рази. Відповідно і момент зменшиться в 2.26 раз.

Номінальна швидкість двигунів буде визначається за формулою:

$$\omega_{ДВН} = \frac{\pi n_{ДВН}}{30} \text{ рад/с.} \quad (2.30)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$\omega_{ДВН} = \frac{3.14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с.}$$

Критичний момент буде розраховується за формулою:

$$M_{\max} = k_{\max} \cdot M_{НОМ_ДВ} \text{ Нм,} \quad (2.31)$$

де λ – перевантажувальна здатність двигуна;

$M_{НОМ_ДВ}$ – номінальний момент двигуна.

Підставивши значення:

$$M_{\max} = k_{\max} \cdot M_{НОМ_ДВ} = 2.7 \cdot 4032 = 10886 \text{ Нм,}$$

2.5 Уточнення моменту інерції механізму. Побудова уточненої навантажувальної діаграми

Загальний момент інерції механізму з піковим навантаженням:

$$J_{\Sigma M} = k_П J_{ДВ} + J_T, \quad (2.32)$$

де $k_П$ – коефіцієнт, що враховує момент інерції в передачах (редуктори, муфти, рухомі частини передачі). приймаємо $k_П$=1.2.

В результаті:

$$J_{\Sigma M} = 1.2 \cdot 26 + 8158 = 8328 \text{ кгм}^2.$$

Звідси момент інерції, вагону масою 55000 кг, що припадає на один двигун буде дорівнювати: 8328 кг·м^2.

Відносно розрахованого моменту інерції, перерахуємо уточнений момент для розгону поїзду при максимальному завантажені:

$$M_1 = J_{\Sigma M} \frac{\omega_{ДВmax}}{\Delta t_P} + M_{TP}, \qquad (2.33)$$

Розрахувавши, маємо:

$$M_1 = 8328 \frac{34.9}{19.6} + 552 = 15381 \text{ Нм}.$$

Момент що припадає один двигун при розгоні:

$$M_{1ДВ} = \frac{15381}{4} = 3845 \text{ Нм}.$$

Відносно розрахованого моменту інерції, перерахуємо уточнений момент для гальмування поїзду при максимальному завантажені:

$$M_2 = M_{TP} - J_{\Sigma M} \frac{\omega_{ДВmax}}{\Delta t_T}, \qquad (2.34)$$

Розрахувавши, маємо:

$$M_2 = 520 - 8328 \frac{34.9}{19.6} = -14308 \text{ Нм}$$

Момент що припадає один двигун при гальмуванні:

$$M_{2ДВ} = \frac{-14308}{4} = -3577 \text{ Нм}.$$

Момент навантаження що припадає на один двигун при максимальному завантаженні буде дорівнювати:

$$M_{СДВ} = \frac{552}{4} = 138 \text{ Нм}.$$

На основі отриманих значень будуємо уточнену навантажувальну діаграму руху (рис.2.4)

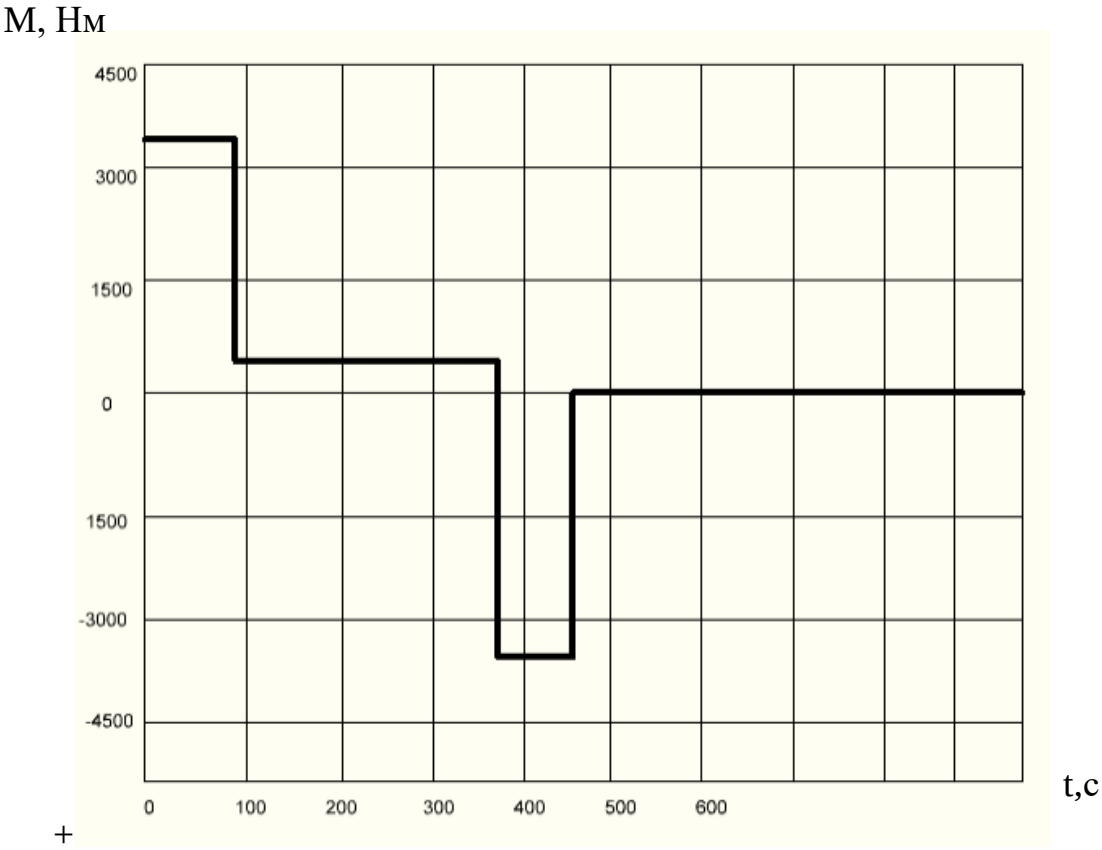

Рисунок 2.4 – Уточнена навантажувальна діаграма

2.6 Перевірка ЕД на нагрів по еквівалентному моменту і потужності

Для визначення еквівалентного моменту, умовно розділяємо уточнену навантажувальну діаграму на 5 ділянок:

для 1 ділянки: 3845 Нм;

для 2 ділянки: 2100 Нм;

для 3 ділянки: 138 Нм;

для 4 ділянки: -2138 Нм;

для 5 ділянки: -3577 Нм.

Відповідно еквівалентний момент для одного двигуна буде дорівнювати:

$$M_{ЕКВ1ДВ} = \sqrt{\frac{(M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4 + M_5^2 t_5)}{T_Ц}} \quad (2.35)$$

Підставивши дані, отримаємо:

$$M_{ЕКВ1ДВ} = \sqrt{\frac{(3845)^2 \cdot 55.5 + (2100)^2 \cdot 23.1 + (138)^2 \cdot 365.72 + (-2138)^2 \cdot 11.6 + (-3577)^2 \cdot 27.6}{223.3}} =$$

$$= 2445 Нм$$

Перерахуємо отриманий момент на стандартний ПВ:

$$M_{ЕВ1Д} = M_{ЕКВ1ДВ} \sqrt{\frac{ПВ\%}{60\%}}, \quad (2.36)$$

$$M_{ЕКВ1Д} = 2445 \sqrt{\frac{46}{60}} = 1874 \text{Нм}$$

Маємо, що $M_{НОМ_ДВ} > M_{ЕКВ1Д}$, 4032>1874. Тобто обраний двигун задовольняє вимогам.

Перевіримо двигун за критичним моментом, для цього необхідно, що б виконувалося така умова:

$$M_1 < 0.8 M_{\max} \quad (2.37)$$

Підставивши значення отримаємо:

$$3845 < 0.8 \cdot 10886$$

$$3845 Нм < 8708 Нм$$

З розрахунків маємо, що обраний двигун задовольняє вимоги поставлених задач.

Розраховуємо еквівалентну потужність для одного АД. Аналогічно розділяємо діаграму руху на 5 ділянок.

Усереднимо значення потужності на відповідних ділянках і визначимо їх величини:

для 1 ділянки: 635 кВт;

для 2 ділянки: 630 кВт;

для 3 ділянки: 150 кВт;

для 4 ділянки: 630 кВт;

для 5 ділянки: 640 кВт.

Для ділянок 2 і 4 приймається потужність 630 кВт, так як двигун на даних ділянках працює в другій зоні швидкості, зі сталою потужністю.

Еквівалентна потужність для одного асинхронного двигуна буде дорівнювати:

$$P_{ЕКВ1ДВ} = \sqrt{\frac{(P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + P_4^2 t_4 + P_5^2 t_5)}{T_Ц}} \quad (2.38)$$

$$P_{ЕКВ1ДВ} = \sqrt{\frac{(635000)^2 \cdot 55.5 + (630000)^2 \cdot 23.1 + (150000)^2 \cdot 365.72 + (630000)^2 \cdot 11.6 + (640000)^2 \cdot 27.6}{223.3}} =$$

$$= 500 кВт$$

Перерахуємо отриману потужність на стандартний ПВ:

$$P_{ЕКВ1Д} = 500\sqrt{\frac{46}{60}} = 437.8\,\text{кВт}. \quad (2.39)$$

Маємо, що $P_{НОМ_ДВ} > P_{ЕКВ1Д}$, тобто 630 кВт>438 кВт. Тобто, обраний двигун задовольняє поставленим умовам навантажень.

2.7 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна виконується на основі даних каталогу: швидкість поля статора, коефіцієнтів потужності і корисної дії для номінальної (100%), кратності пускового струму, максимального і пускового моменту.

Розрахуємо параметри Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна, що зображена на рис. 3.1.

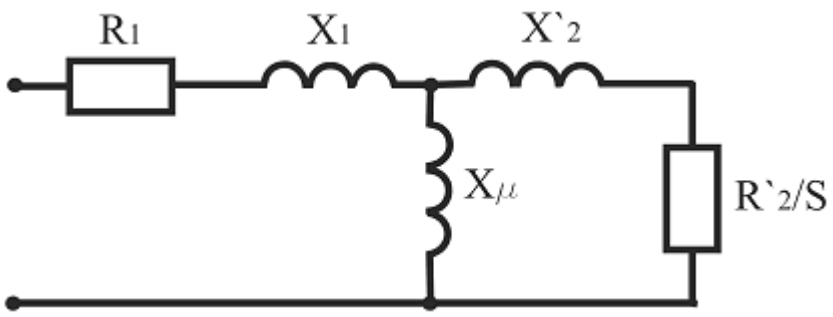

Рисунок 2.5 – Т-подібна схема заміщення фази асинхронного двигуна

Параметри двигуна для розрахунку приймаємо з таблиці 2.1

Розрахуємо номінальну фазну напругу за формулою:

$$U_{1f} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}}; \tag{2.40}$$

$$U_{1f} = \frac{690}{\sqrt{3}} = 398.4В;$$

Розрахуємо фазний струм за формулою:

$$I_{1fn} = \frac{P_n}{3U_{1f} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_n}; \tag{2.41}$$

$$I_{1fn} = \frac{630 \cdot 10^3}{3 \cdot 398.4 \cdot 0.96 \cdot 0.88} = 633\,A;$$

Синхронна кутова швидкість обертання дорівнює:

$$\omega_0 = \frac{\pi}{30} \cdot n_0; \tag{2.42}$$

$$\omega_0 = \frac{3.14}{30} \cdot 1500 = 157.08\,\frac{рад}{с};$$

Номінальна кутова швидкість обертання дорівнює:

$$\omega_n = \omega_0 \left(1 - s_n\right); \tag{2.43}$$

$$\omega_n = 157.08 \cdot \left(1 - 5.33 \cdot 10^{-3}\right) = 156.24 \ \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

Номінальний момент на валу двигуна :

$$M_n = \frac{P_H}{\omega_H}; \tag{2.44}$$

$$M_n = \frac{630 \cdot 10^3}{156.24} = 4032 \ \text{Н} \cdot \text{м};$$

Розрахуємо струм неробочого ходу двигуна за формулою:

$$I_0 = \sqrt{\left| \frac{I_{11}^2 - \left(p^* \cdot I_{1fn} \cdot \frac{\left(1 - s_n\right)}{\left(1 - p^* \cdot s_n\right)} \right)^2}{1 - \left(p^* \cdot \frac{\left(1 - s_n\right)}{\left(1 - p^* \cdot s_n\right)} \right)^2} \right|} \tag{2.45}$$

Підставивши значення:

$$I_0 = \sqrt{\left| \frac{467.9^2 - \left(0.75 \cdot 633 \cdot \frac{\left(1 - 5.33 \cdot 10^{-3}\right)}{\left(1 - 0.75 \cdot 5.33 \cdot 10^{-3}\right)} \right)^2}{1 - \left(0.75 \cdot \frac{\left(1 - 5.33 \cdot 10^{-3}\right)}{\left(1 - 0.75 \cdot 5.33 \cdot 10^{-3}\right)} \right)^2} \right|} = 141.3 \ \text{А},$$

де

$$I_{11} = \frac{p^* \cdot P_n}{3 \cdot U_{1f} \cdot \cos\varphi^* \cdot \eta^*} \tag{2.46}$$

$$I_{11} = \frac{0.75 \cdot 630 \cdot 10^3}{3 \cdot 398.4 \cdot 0.96 \cdot 0.88} = 467.9 \ \text{А}.$$

струм статора при частковому завантаженні двигуна $p^* = 0.75$;

$\cos\varphi^* = 0.88$ – коефіцієнт потужності при частковому завантаженні двигуна;

$\eta^* = 0.96$ – ККД при частковому завантаженні двигуна.

Співвідношення для розрахунку критичного ковзання:

$$S_k = s_n \cdot \frac{k_{max} + \sqrt{k_{max}^2 - \left(1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot \left(k_{max} - 1\right)\right)}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot \left(k_{max} - 1\right)} \qquad (2.47)$$

$$S_k = 5.33 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2.7 + \sqrt{2.7^2 - \left(1 - 2 \cdot 5.33 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot \left(2.7 - 1\right)\right)}}{1 - 2 \cdot 5.33 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot \left(2.7 - 1\right)} = 0.021, \text{ де}$$

$$\beta = \frac{R_1}{C_1 \cdot R_2'};$$

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1fn}};$$

$$C_1 = 1 + \frac{141.3}{2 \cdot 7 \cdot 633} = 1.015$$

Коефіцієнта β лежить в діапазоні значень від 0.6 до 2.5. В першому наближенні приймемо $\beta = 1$.

Визначимо коефіцієнт

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1f}^2 \cdot \left(1 - s_n\right)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_n}; \qquad (2.48)$$

$$A_1 = \frac{3 \cdot 398.4^2 \cdot \left(1 - 5.33 \cdot 10^{-3}\right)}{2 \cdot 1.016 \cdot 2.6 \cdot 900 \cdot 10^3} = 0.99.$$

Активний опір ротора, приведений до обмотки статора розраховується за формулою:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{S_k}\right) \cdot C_1} \; ; \tag{2.49}$$

$$R'_2 = \frac{0.99}{\left(1 + \frac{1}{5.33 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot 1.015} = 2.151 \cdot 10^{-3} \text{Ом};$$

Активний опір обмотки статора розраховується за формулою:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta \tag{2.50}$$

$$R_1 = 1.015 \cdot 2.151 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 2.1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

Для знаходження індуктивного опору короткого замикання необхідно розрахувати параметр γ.

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{S_k^2}\right) - \beta^2} \tag{2.51}$$

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{0.021^2}\right) - 1^2} = 47.6$$

Індуктивний опір короткого замикання розраховуємо за формулою:

$$X_k = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 ; \tag{2.52}$$

$$X_k = 47.6 \cdot 1.015 \cdot 2.151 \cdot 10^{-3} = 0.103 \text{ Ом};$$

Індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора розраховуємо за формулоє:

$$X'_{2н} = \frac{0.58 \cdot X_k}{C_1} \; ; \tag{2.53}$$

$$X'_{2п} = \frac{0.58 \cdot 0.103}{1.015} = 0.058 \text{ Ом};$$

Індуктивний опір обмотки статора:

$$X_{1n} = 0.42 \cdot X_k \ ; \tag{2.54}$$

$$X_{1n} = 0.42 \cdot 0.103 = 0.043 \text{ Ом};$$

За отриманими значеннями C_1, R_1, R'_2, X_k визначимо критичне ковзання двигуна:

$$S_{kp} = \frac{C_1 R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} \tag{2.55}$$

$$S_{kp} = \frac{1.015 \cdot 2.151 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2.151 \cdot 10^{-3} + 0.010}} = 0.019$$

Маємо, що $S_{kp} = S_k = 0.019$, то немає необхідності в корекції.

ЕРС кола намагнічування визначаємо за формулою:

$$E_1 = \sqrt{\left(U_{1ф} \cdot \cos\varphi - I_{1fn} \cdot R_1\right)^2 + \left(U_{1f} \cdot \sin\varphi - I_{1fn} \cdot X_{1н}\right)^2} \tag{2.56}$$

$$E_1 = \sqrt{\left(398.4 \cdot 0.88 - 633 \cdot 2.151 \cdot 10^{-3}\right)^2 + \left(398.4 \cdot 0.475 - 633 \cdot 0.043\right)^2} = 349.232 \text{ В}$$

Індуктивний опір намагнічування:

$$X_{\mu n} = \frac{E_1}{I_0} \ ; \tag{2.57}$$

$$X_{\mu n} = \frac{349.232}{141.3} = 2.47 \text{ Ом};$$

Індуктивність поля розсіювання статора визначаємо за формулою:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1n}}{\omega_{el.n}} \ ; \tag{2.58}$$

$$L_{1\sigma} = \frac{0.043}{314.16} = 0.00013 \text{Гн};$$

Індуктивність поля розсіювання ротора визначаємо за формулою:

$$L_{2\sigma} = \frac{X'_{2n}}{\omega_{el.n}} \; ; \tag{2.59}$$

$$L_{2\sigma} = \frac{0.058}{314.16} = 0.00018 \text{ Гн};$$

Індуктивність контуру намагнічування визначаємо за формулою:

$$L_M = \frac{X_{\mu n}}{\omega_{el.n}} \; , \tag{2.60}$$

$$L_M = \frac{2.47}{314.16} = 7.866 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

де $\omega_{el.n} = 2 \cdot \pi \cdot f_{1n} = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.16 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ – номінальна кругова частота мережі; $f_{1i} = 50$ Гц – номінальна частота мережі.

Індуктивність статора визначаємо за формулою:

$$L_1 = L_M + L_{1\sigma} \; ; \tag{2.61}$$

$$L_1 = 7.866 \cdot 10^{-3} + 1.3 \cdot 10^{-4} = 7.996 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

Індуктивність ротора визначаємо за формулою:

$$L_2 = L_M + L_{2\sigma} \; . \tag{2.62}$$

$$L_2 = 7.866 \cdot 10^{-3} + 1.8 \cdot 10^{-4} = 8.046 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Основні параметри що знадобляться для моделювання занесено до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри схеми заміщення

Опір обмотки статора, Ом	$R_1 = 2.1 \cdot 10^{-3}$
Опір ротора, Ом	$R'_2 = 2.151 \cdot 10^{-3}$Ом;
Індуктивність статора, Гн	$L_1 = 7.996 \cdot 10^{-3}$
Індуктивність ротора, Гн	$L_2 = 8.046 \cdot 10^{-3}$
Індуктивність контуру намагнічування, Гн	$L_М = 7.866 \cdot 10^{-3}$
Номінальна фазна напруга, В	$U_{1ф} = 398.4$В;
Фазний струм, А	$I_{1фн} = 633$ А;

2.8 Розрахунок основних елементів силової частини тягового електроприводу вагону метрополітена

Розрахунок елементів силової частини виконуються згідно значень параметрів: напруги, кількості фаз, а також потужності, ККД та номінального струму двигунів. Параметри двигунів Simens серії $1LA8405-4AB$ приймаємо з таблиці 2.2. Двигуни приводять в рух вагон.

Значення номінальної фазної напруги та струму

Розрахуємо номінальну фазну напругу за формулою:

$$U_{1f} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}}; \tag{2.63}$$

$$U_{1f} = \frac{690}{\sqrt{3}} = 398.4\text{В};$$

Розрахуємо фазний струм за формулою:

$$I_{1fn} = \frac{P_n}{3U_{1f} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_n}; \tag{2.64}$$

$$I_{1fn} = \frac{630 \cdot 10^3}{3 \cdot 398.4 \cdot 0.96 \cdot 0.88} = 633 \text{ A};$$

$U_{1f} = 398.4$В;

$I_{1fn} = 633$А;

Розрахунок амплітудного значення фазної напруги:

$$U_{na} = U_{1f} \cdot \sqrt{2} \tag{2.65}$$

$$I_{na} = I_{1fn} \cdot \sqrt{2} \tag{2.66}$$

Підставивши значення маємо:

$$U_{na} = 398.4 \cdot \sqrt{2} = 563.4 \text{ В}$$

$$I_{na} = 633 \cdot \sqrt{2} = 895.2 \text{ А}$$

Максимальний струм залежить від перевантажувальної здатності електроприводу k_{ovl}, що в свою чергу залежить від типу механізму і лежить в діапазоні 1.11-3. Для робовагону приймаємо значення $k_{ovl} = 1.9$.

Розрахуємо максимальний струм на виході ПЧ за обраним коефіцієнтом перевантажувальної здатності за наступною формулою:

$$I_{\max} = k_{ovl} \cdot I_{na} \tag{2.67}$$

Підставивши значення маємо:

$$I_{\max} = 1.9 \cdot 895.2 = 1701A$$

Перетворювач частоти живиться від мережі постійного струму, напруга якої буде розраховуватися за формулою:

$$U_{dcn} = \sqrt{2} U_{1n} \tag{2.68}$$

Підставивши значення отримаємо:

$$U_{dcn} = \sqrt{2} \cdot 690 = 976B$$

Вибираючи IGBT ключі для автономних інверторів напруги потрібно врахувати, щоб їх максимально-допустима значення напруги колектор-емітера складало мінімум 1.5 від максимальної напруги ланки постійного струму, тобто

$$U_{cc} > 1.5 U_{dc\max}. \qquad (2.69)$$

Максимальна напруга ланки постійного стуму в сучасних ПЧ залежить від допустимої напруги встановлених електролітичних конденсаторів фільтра, і складає приблизно 1000 В для перетворювачі з живленням однофазною напругою U_{grid} = 690В. Звідси маємо:

$$U_{cc} = 1.5 \cdot 1000 = 1500\,B$$

IGBT ключі вибираються за критерієм $I_c > I_{\max}$, $U_{ce\max} > U_{ce}$, де I_c та U_{cemax} – відповідно тривалий струм колектора та напруга колектор-емітер, що можна отримати в паспортних даних виробу.

За каталогом [6] було обрано IGBT модуль типу FZ2400R12HE4_B9, що має параметри U_{ce} =1500 В, I_c=2400 А.

Для розрахунку ємності випрямляча скористаємося формулою:

$$C = \frac{1}{2\pi k_p m f R_0} \qquad (2.70)$$

де k_p – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги (приймаємо 0.05), m – кількість фаз випрямляча, f – частота мережі живлення, R_0 – еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму.

Еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму розраховується за формулою:

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} \ , \qquad (2.71)$$

де I_{dc} - значення струму з врахуванням перевантаження і дорівнює:

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} P_n}{U_{dcn} \eta \eta_{inv}} \ , \qquad (2.72)$$

де $\eta_{inv} = (0.95 \div 0.96)$ – ккд інвертора напруги.

Підставивши значення маємо:

$$I_{dc} = \frac{1.9 \cdot 630 \cdot 10^3}{975 \cdot 0.96 \cdot 0.98} = 1305 \ A$$

Маючи всі необхідні значення розрахуємо еквівалентний опір:

$$R_0 = \frac{975}{1305} = 0.74 Ом$$

За формулою (3.28) розраховуємо значення ємності фільтра для k_p=0.05:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 0.05 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 0.74} = 43 \cdot 10^{-3} \Phi$$

За каталогом [6] обираємо конденсатор серії B437*4A6109M0## з параметрами: ємність 10000 мкФ та максимальною напругою 500 В. Для отримання необхідної ємності і робочої напруги фільтру використовується 9 паралельних гілок по два послідовних конденсатора, загальною кількістю 18 штук(рис2.5). При цьому гілки має ємність

$$C = \frac{C_c}{2} + \frac{C_c}{2} = 5000 \Phi .$$

Необхідно обрати датчики струму та датчик напруги. За каталогом [7] був обраний датчик струму HAX 1500-S, з максимальним значенням струмом

4500А. Вибір виконується згідно максимального струму, який може бути в колі, враховуючи коефіцієнт перевантаження.

Вибір датчику напруги виконується за каталогом [7] LV 100-Voltage 1. Схема підключення датчику напруги зображена на рисунку 2.6

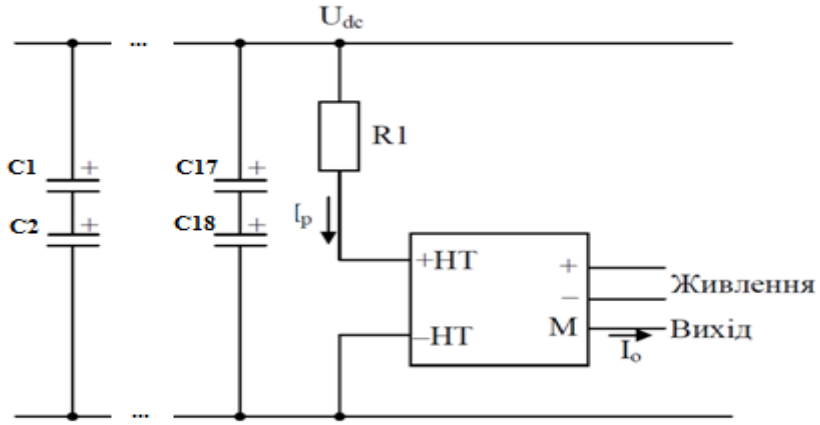

Рисунок 2.6 – Схема підключення датчику напруги та конденденсаторів фільтру

Для розрахунку R1 скористаємося формулою:

$$R_1 = \frac{U_{dc\max}}{I_{p\max}}, \tag{2.73}$$

Де I_{pmax} - максимальний струм первинного кола датчика, який можна знайти в його документації. I_{pmax} = 50 мА. Підставивши значення знаходимо опір резистора:

$$R_1 = \frac{U_{dc\max}}{I_{p\max}} = \frac{1000}{0.05} = 20000\,Ом$$

Резистор обрано зі стандартного ряду E24 розміром 20кОм.

Обираємо енкодер 1XP8001-1/2048 з каталогу [7].

Для вибору серійного частотного перетворювача необхідно розрахувати потужність ПЧ та значення струму у фазі двигуна для вагону. Потужність розраховується за формулою:

$$P_{ПЧ} = \frac{P_{дв}}{\eta_{дв}} \tag{2.74}$$

Підставивши значення маємо:

$$P_{ПЧ} = \frac{630}{0.96} = 656\ кВт$$

Отже, вибираємо ПЧ фірми ABB ACS880-07-1160A-7 [8] з наступними параметрами,що занесені до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Параметри ПЧ

Серія	ACS880-07-1160A-7
Потужність	1100 кВт
Число фаз/напруга на вході	1-ф/980 В
Число фаз/напруга на виході	3-ф/690 В

Висновок до 2 розділу.

1. В другому розділі було розраховано основні параметри тягового електродвигуна. За результатами розрахунків було обраний асинхронний двигун фірми Simens серії, з потужністю 630 кВт та номінальною напругою 690 В. Обраний двигун був перевірений на нагрів за еквівалентним моментом та потужністю, перевірка вказує на правильність вибору двигуна.

2. Розрахована силова чистина. А саме було обрано за каталогами конденсатори згладжувального фільтру; IGBT ключі для інвертора; датчик струму; датчик напруги.

3 ПОБУДОВА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ДВИГУНА САК АЕП РОБОВАГОНУ МЕТРО

3.1 Модель електродвигуна у двофазній системі:

$$\dot{\theta} = \omega; \tag{3.1}$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c); \tag{3.2}$$

$$M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2}\left(\Psi_{2d} i_{1q} - \Psi_{2q} i_{1d}\right); \tag{3.3}$$

$$\dot{i}_{1d} = -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + a\beta\Psi_{2d} + \beta p_n \omega \Psi_{2q} + \frac{1}{\sigma} u_{1d}; \tag{3.4}$$

$$\dot{i}_{1q} = -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + a\beta\Psi_{2q} - \beta p_n \omega \Psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} + u_{1q}; \tag{3.5}$$

$$\dot{\Psi}_{2d} = -\alpha\Psi_{2d} + (\omega_0 - p_n\omega)\Psi_{2q} + aL_m i_{1d}; \tag{3.6}$$

$$\dot{\Psi}_{2q} = -a\Psi_{2q} - (\omega_0 - p_n\omega)\Psi_{2d} + aL_m i_{1q}; \tag{3.7}$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0, \varepsilon_0(0) = 0; \tag{3.8}$$

3.2 Алгоритм векторного керування двигуном:

Повний алгоритм прямого векторного керування АД містить:

- Спостерігач потоку АД:

$$|\dot{\hat{\Psi}}| = -\alpha\left|\hat{\Psi}\right| + \alpha L_m i_{1d}; \tag{3.9}$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + aL_m \frac{i_{1q}}{|\hat{\Psi}|}; \tag{3.10}$$

- Регулятор магнітного потоку:

$$i_{1d}^* = \frac{1}{aL_m}\left(a\Psi^* + \dot{\Psi}^* - k_\Psi \tilde{\tilde{\Psi}} - x_\Psi\right); \tag{3.11}$$

$$\dot{x}_\Psi = k_{\Psi i}\tilde{\tilde{\Psi}}; \tag{3.12}$$

- Регулятор струму по осі d:

$$u_{1d} = \sigma\left(\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - a\beta\left|\hat{\Psi}\right| + \dot{i}_{1d}^* - k_{id}\dot{i}_d - x_d\right); \tag{3.13}$$

$$\dot{x}_d = k_{ii}\tilde{i}_d; \tag{3.14}$$

$$\dot{i}_{1d}^{*} = \frac{1}{aL_m}\left\{a\dot{\Psi}^{*} + \ddot{\Psi}^{*} - k_{\Psi}\left[-(a + k_{\Psi})\tilde{\tilde{\Psi}} + aL_m\tilde{i}_d - x_{\Psi}\right] - \dot{x}_{\Psi}\right\}; \quad (3.15)$$

- Регулятор швидкості:

$$i_{1q}^{*} = \frac{1}{\mu\Psi^{*}}\left(-k_{\omega}\tilde{\omega} + \widehat{\mathrm{M}}_{\mathrm{C}} + \dot{\omega}^{*} + v\omega^{*}\right); \quad (3.16)$$

$$\dot{\widehat{\mathrm{M}}}_{\mathrm{C}} = -k_{\omega i}\tilde{\omega}; \quad (3.17)$$

- Модифікований регулятор струму по осі q:

$$u_{1q} = \sigma\left[\gamma i_{1q}^{*} + \omega_0 i_{1d} + \beta\omega p_n\left|\widehat{\Psi}\right| + \dot{i}_{1q}^{*} - k_{iq}\tilde{i}_q - x_q\right]; \quad (3.18)$$

$$\dot{x}_q = k_{ii}\tilde{i}_q; \quad (3.19)$$

$$\dot{i}_{1q}^{*} = \frac{1}{\mu\Psi^{*}}\left[-k_{\omega}\left(-k_{\omega}\tilde{\omega} + \mu\Psi^{*}\tilde{i}_q\right) + \dot{\widehat{\mathrm{M}}}_{\mathrm{C}} + \ddot{\omega}^{*} + v\dot{\omega}^{*}\right]; \quad (3.20)$$

де $\Psi^{*}, \dot{\Psi}^{*}, \ddot{\Psi}^{*}$ - задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора та його перша і друга похідні відповідно, $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^{*}$ - похибка відпрацювання струму по осі (d), (k_i, k_{ii}) > 0 – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму, $\omega^{*}, \dot{\omega}^{*}, \ddot{\omega}^{*}$ - задана кутова швидкість, перша і друга похідні відповідно, $\tilde{\omega} = \omega - \omega^{*}$ - похибка відпрацювання кутової швидкості, (k_{ω}, $k_{\omega i}$) > 0 – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора кутової швидкості $\tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^{*}$ - похибка відпрацювання струму по осі (q), $\tilde{\tilde{\Psi}} = \widetilde{\Psi} - \Psi^{*}$ - похибка відпрацювання оціненого потокозчеплення, (k_{ψ}, $k_{\psi i}$) > 0 – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора потокозчеплення.

Уточнена математична модель перетворювача частоти для керування асинхронним двигуном каналами частоти і напруги статора представлена на рисунку (3.2):

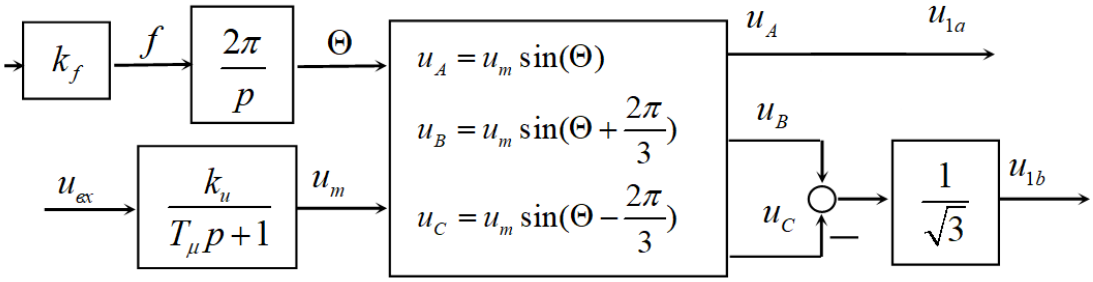

Рисунок 3.1 — Структурна схема перетворювача частоти

На рисунку 3.1 позначено: u_m - амплітуда напруги; t - час; u_A, u_B, u_C - фазні напруги статора; u_{1a}, u_{1b} - проекції вектору напруги статора на координатах a-b системи статора; k_f - коефіцієнт передачі по частоті; k_u - коефіцієнт передачі по амплітуді; T_μ - мала постійна часу.

Із системи диференціальних рівнянь асинхронного двигуна одержимо таку структурну схему:

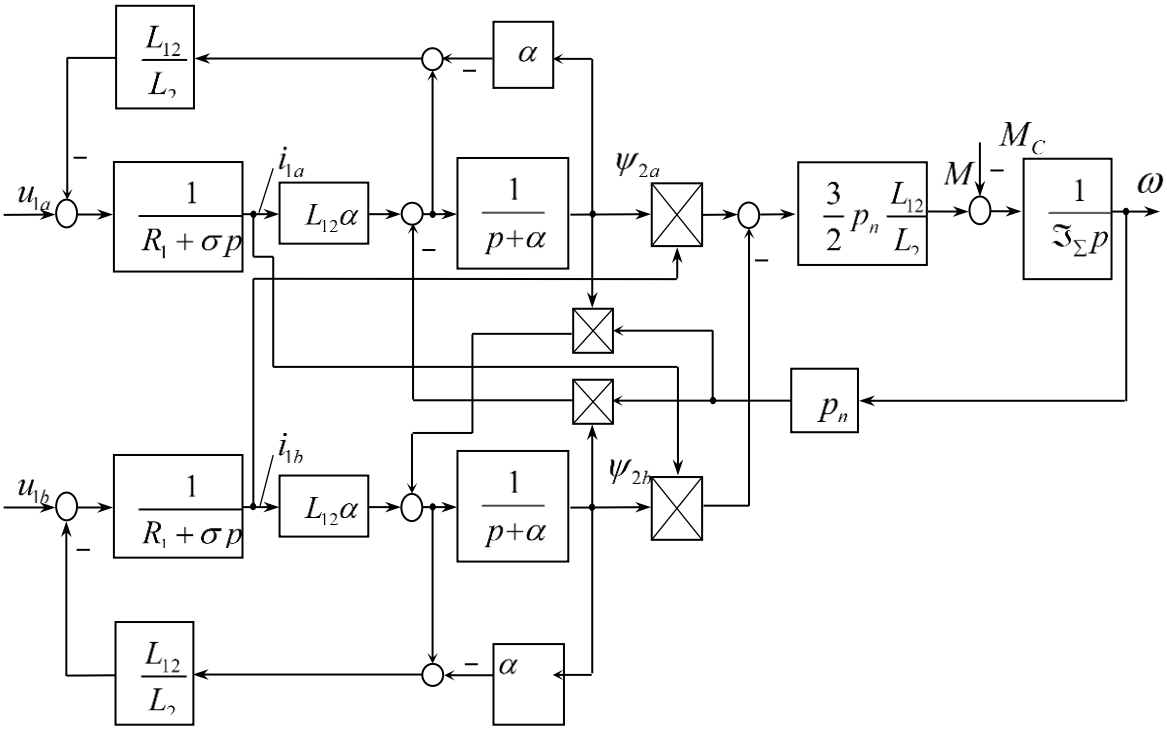

Рисунок 3.2 — Структурна схема асинхронного двигуна в системі координат статора a-b

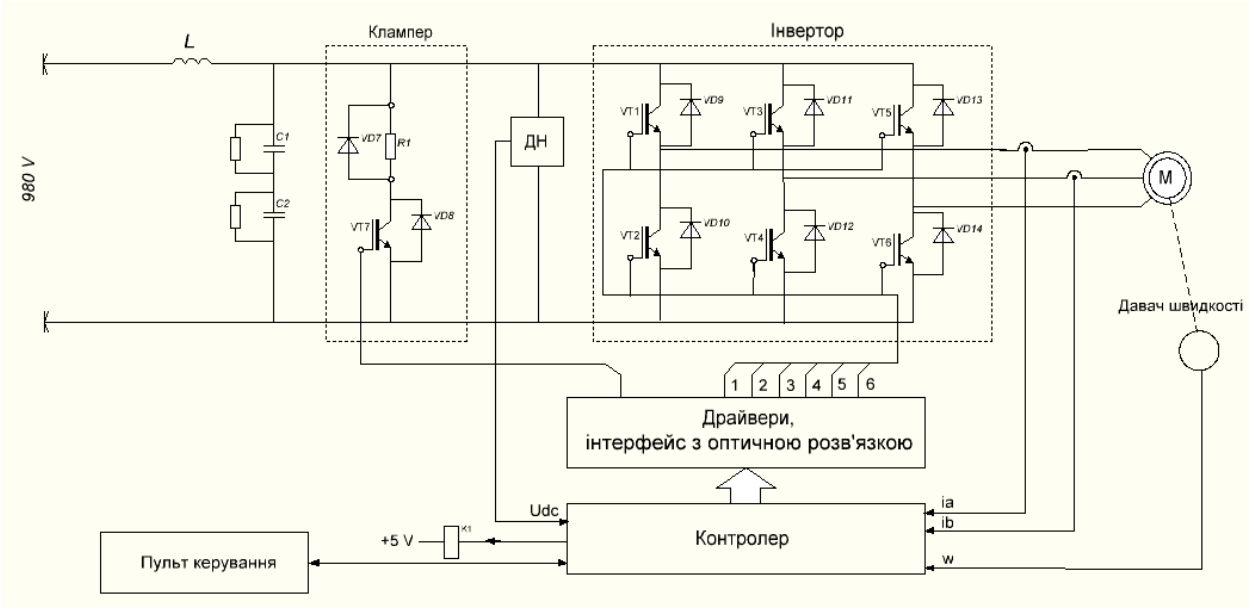

Рисунок 3.3 – Функціональна схема системи векторного керування АЕП

Висновок до 3 розділу.

1. В третьому розділі визначена функціональна схема керування та наданий її опис.

2. Отримано математичний опис електродвигуна та перетворювача частоти, а також приведений алгоритм керування. Отримані результати дозволяють сформувати модель для дослідження динамічних процесів електромеханічної системи вагону метро.

4 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ, ПОБУДОВА СТРУКТУРНИХ СХЕМ ТА СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОГО АЕП РОБОВАГОНУ МЕТРО

4.1 Синтез регуляторів системи керування АЕП робовагону

Регулятори складових струмів статора I_d ,I_q.

Контур регулювання струму статора I_d має вигляд, показаний на рис. 4.1.

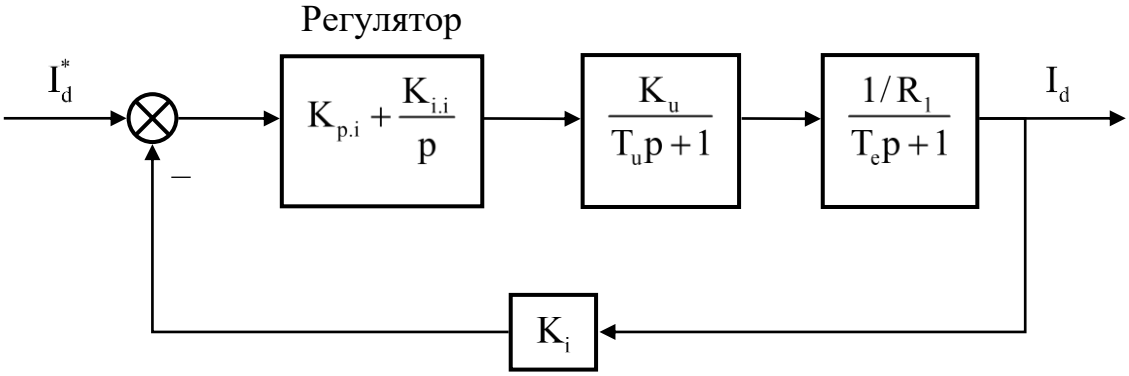

Рисунок 4.1 – Контур регулювання струму I_d

Передаточна функція об'єкту регулювання має вигляд:

$$W_{роз.с}(p) = \frac{K_u K_i}{R_1 (T_u p + 1)(T_e p + 1)}. \tag{4.1}$$

Налаштування контуру буде виконуватись на модульний оптимум. Отже, регулятор матиме вигляд:

$$W_{рег.i}(p) = \frac{R_1 (T_e p + 1)}{2 T_u K_u K_i p} = \frac{T_e R_1}{2 T_u K_u K_i} + \frac{R_1}{2 T_u K_u K_i p} \tag{4.2}$$

Маємо ПІ-регулятор струму:

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

$$\text{де } K_{p.i} = \frac{T_e R_1}{2 T_u K_u K_i}; \tag{4.3}$$

$$K_{i.i} = \frac{R_1}{2T_u K_u K_i},$$

де $$R_1 = R_c + \left(\frac{L_M}{L_2}\right)^2 R_p;$$

Для спрощення моделювання коефіцієнт зворотного зв'язку K_i приймаємо рівним 1.

Разом із регулятором передатна функція розімкнутої системи має вигляд:

$$W_{роз.с}(p) = \frac{1}{2T_u p(T_u p + 1)}, \tag{4.4}$$

а замкненої:

$$W_{зам.с}(p) = \frac{1}{2T_u p(T_u p + 1) + 1}. \tag{4.5}$$

$$W_{зам.с}(p) = \frac{1}{2 \cdot 10^{-6} p^2 + 0.002p + 1}$$

Оскільки $(T_u)^2$ набагато менша за T_u, то нею можна знехтувати. Тоді передатна функція системи матиме вигляд:

$$W_{зам.с}(p) = \frac{1}{2T_u p + 1}. \tag{4.6}$$

$$W_{зам.с}(p) = \frac{1}{0.002p + 1}.$$

Синтез регулятора струму I_q.

Контур регулювання струму статора I_q аналогічний контуру регулювання струму I_d (рис.4.3). Тому синтез проводиться за тією ж методикою.

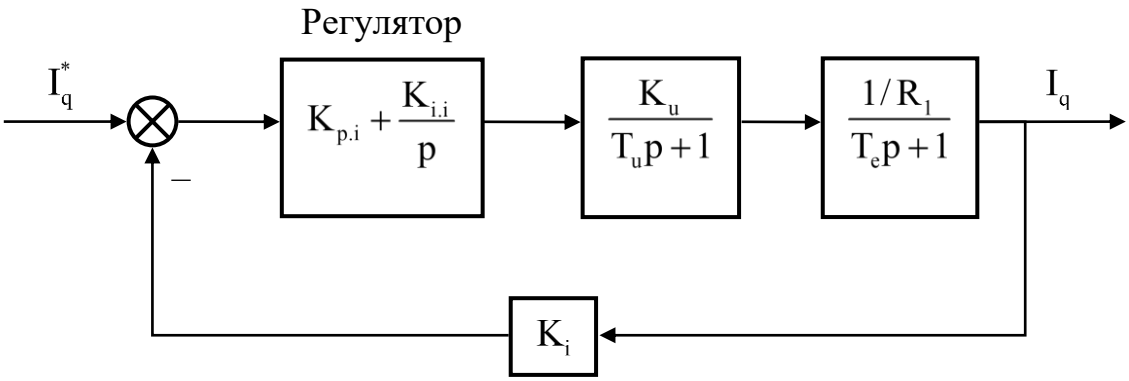

Рис. 4.2 – Контур регулювання струму I_q

Передаточна функція об’єкту регулювання має вигляд:

$$W_{роз.с}(p) = \frac{K_u K_i}{R_1 (T_u p + 1)(T_e p + 1)}. \tag{4.7}$$

Налаштування контуру буде виконуватись на модульний оптимум.

Отже, регулятор матиме вигляд:

$$W_{рег.i}(p) = \frac{R_1 (T_e p + 1)}{2 T_u K_u K_i p} = \frac{T_e R_1}{2 T_u K_u K_i} + \frac{R_1}{2 T_u K_u K_i p} \tag{4.8}$$

Маємо ПІ-регулятор струму:

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

$$\text{де } K_{p.i} = \frac{T_e R_1}{2 T_u K_u K_i}; \tag{4.9}$$

$$K_{i.i} = \frac{R_1}{2 T_u K_u K_i}.$$

Для спрощення моделювання коефіцієнт зворотного зв’язку K_i приймаємо рівним 1.

Отримаємо значення коефіцієнтів ПІ-регулятора:

Разом із регулятором передатна функція розімкнутої системи має вигляд:

$$W_{роз.с}(p) = \frac{1}{2 T_u p (T_u p + 1)}, \tag{4.10}$$

а замкненої:

$$W_{зам.с}(p) = \frac{1}{2T_u p + 1}. \tag{4.11}$$

$$W_{зам.с}(p) = \frac{1}{0,002p + 1}.$$

Синтез регулятора потокозчеплення ротора Ψ_r.

Контур регулювання потокозчеплення ротора Ψ_r зображений на рис. 4.4.

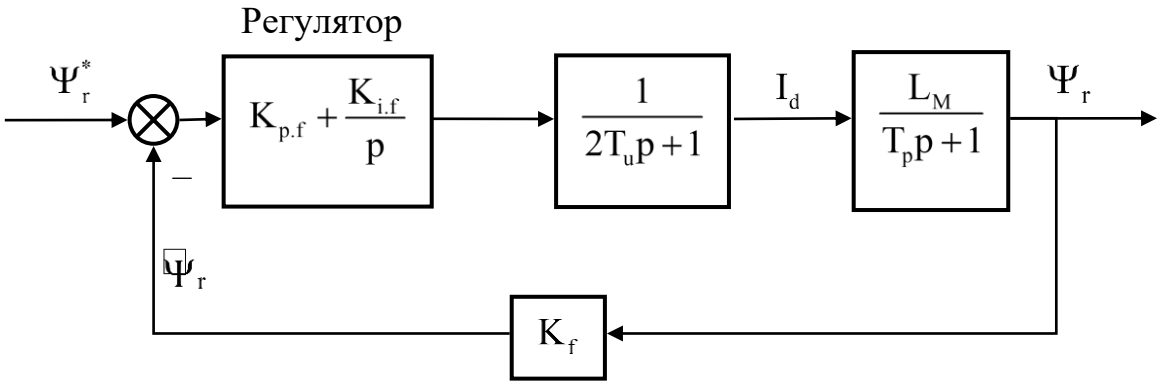

Рисунок 4.3 – Контур регулювання потокозчеплення ротора Ψ_r

Передаточна функція об’єкту регулювання має вигляд:

$$W_{роз.п}(p) = \frac{L_M K_f}{(2T_u p + 1)(T_p p + 1)}. \tag{4.12}$$

Налаштування контуру буде виконуватись на модульний оптимум. Отже, регулятор матиме вигляд:

$$W_{рег.п}(p) = \frac{T_p p + 1}{4T_u L_M K_f p} = \frac{T_p}{4T_u L_M K_f} + \frac{1}{4T_u L_M K_f p}. \tag{4.13}$$

Маємо ПІ-регулятор потокозчеплення ротора:

$$W_{рег.п}(p) = K_{p.f} + \frac{K_{i.f}}{p},$$

$$\text{де } K_{p.f} = \frac{T_p}{4T_u L_M K_f}; \tag{4.14}$$

$$K_{i.f} = \frac{1}{4T_u L_M K_f}.$$

Разом із регулятором передатна функція розімкнутої системи маєвигляд:

$$W_{роз.п}(p) = \frac{1}{4T_u p(2T_u p + 1)}. \quad (4.15)$$

а замкненої:

$$W_{зам.п}(p) = \frac{1}{4T_u p(2T_u p + 1) + 1}. \quad (4.16)$$

Синтез регулятора швидкості ЕП .

Контур регулювання швидкості ω зображений на рис. 4.5

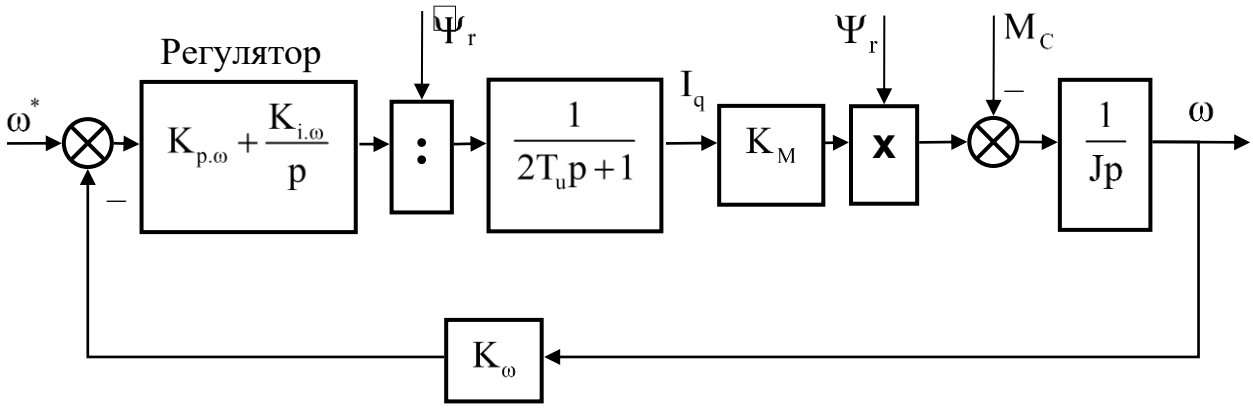

Рисунок 4.4 – Контур регулювання швидкості ω

Передаточна функція об’єкту регулювання має вигляд:

$$W_{роз.ш}(p) = \frac{K_M K_\omega}{(2T_u p + 1)Jp}. \quad (4.17)$$

Налаштування контуру буде виконуватись на симетричний оптимум. Отже, регулятор матиме вигляд:

$$W_{рег.ш}(p)=\frac{J(8T_u p+1)}{32T_u^2K_M K_\omega p}=\frac{J}{4T_u K_M K_\omega}+\frac{J}{32T_u^2K_M K_\omega p}. \qquad (4.18)$$

Маємо ПІ-регулятор швидкості:

$$W_{рег.ш}(p)=K_{р.\omega}+\frac{K_{i.\omega}}{p},$$

$$\text{де } K_{р.\omega}=\frac{J}{4T_u K_M K_\omega}; \qquad (4.19)$$

$$K_{i.\omega}=\frac{J}{32T_u^2K_M K_\omega}.$$

Для спрощення моделювання коефіцієнт зворотного зв’язку K_i приймаємо рівним 1.

Підставивши T_u, K_M, K_ω, J до формул (4.47), отримаємо значення коефіцієнтів ПІ-регулятора:

$$K_{р.\omega}=\frac{1388}{4\cdot 2.941\cdot 1}=1.18\cdot 10^5$$

$$K_{i.\omega}=3{,}99\cdot 10^7.$$

Разом із регулятором передатна функція розімкнутої системи має вигляд:

$$W_{роз.ш}(p)=\frac{8T_u p+1}{8T_u p}\cdot\frac{1}{4T_u p(2T_u p+1)}. \qquad (4.20)$$

а замкненої:

$$W_{зам.ш}(p)=\frac{8T_u p+1}{64T_u^3p^3+32T_u^2p^2+8T_u p+1}, \qquad (4.21)$$

Висновок до 4 розділу.

1. Виконано синтез регуляторів струму, швидкості, потокозчеплення для реалізації векторного керування асинхронним електроприводом вагону метро.

2. Для досягнення висунутих вимог до проєктованої САК АЕП робовагону метро застосовано налаштування регуляторів струмів та потокозчеплення на модульний оптимум, а регулятора швидкості – на симетричний оптимум.

5 СКЛАДАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ В MATLAB/SIMULINK ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАЛЕНИХ І ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В САК АЕП РОБОВАГОНУ МЕТРО

5.1 Опис моделі електроприводу

Моделювання відбувається в додатку SIMULINK, що э пакетом програми MATLAB. Було використано модель системи векторного керування асинхронним тяговим електроприводом локомотиву. (Рис. 5.1)

Модель складається з блоків, кожен з яких відтворює елемент із структурної схеми. Також модель має блоки, що керують та виводять результати для візуального аналізу.

Опис основних блоків моделі.

- **Step** – завдання одиночного сигналу.

- **Scope** – виконує роль віртуального осцилограф, що дозволяє відтвори результати моделювання.

- **Sum** – сумує вхідні сигнали.

- **Gain** – ланка масштабування.

- **Transfer Fcn** – на виході створює передатну функцію, що має вигляд співвідношення 2 поліномів.

- **Integrator** – виконує інтегрування сигналі що входять в нього, на структурній схемі відповідає інтегруючій ланці.

- **Derivative** – виконує чисельне диференціювання сигналів.

- **Saturation** – блок обмеження, не лінійна ланка, вихідний сигнал якої дорівнює вхідному, поки не сягне обмеження.

- **Ramp** – джерело лінійного сигналу, з заданим нахилом.

- **To Workspace** – зберігає результати моделювання в масиві.

- **Mux** – блок, що поєднує вхідні сигнали для виводу на одній діаграмі.

- **Clock** – віртуальний годинник, якій відраховує час виконання моделювання.

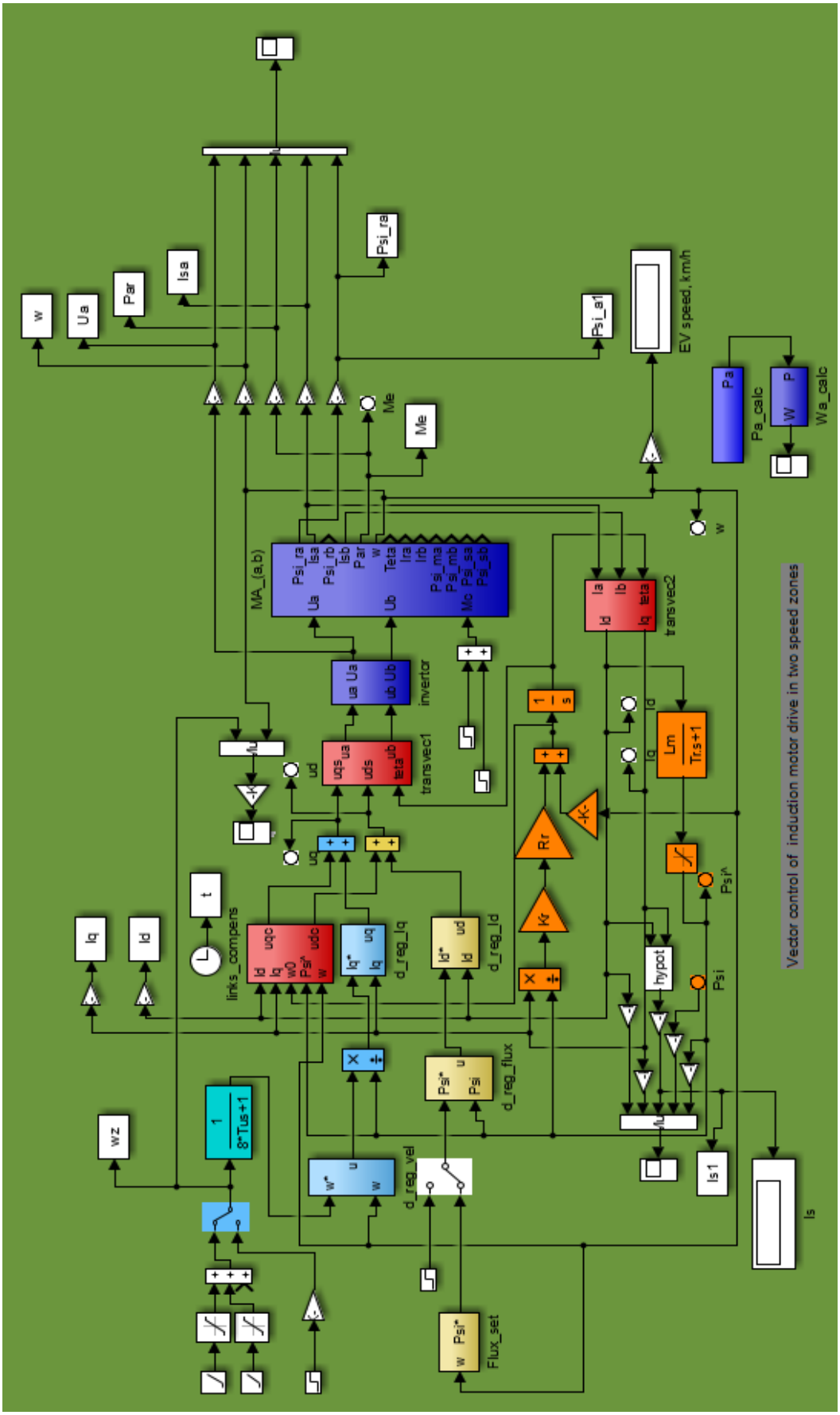

Рисунок 5.1 – Схема моделі системи векторного керування АЕП

5.2 Результати моделювання та їх аналіз

Моделювання виконувалося згідно розрахованих в 2 частині часу розгону гальмування. Зона з постійною максимально швидкістю була зменшена для більш наглядних відображення динамічних процесів.

Моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном робовагону **з пасажирами:**

Подання плавно наростаючого сигналу завдання швидкості. Розгін виконуємо до швидкості $1.5\omega_{н}$ за 20 с.

Подання плавно спадаючого сигналу завдання швидкості. Гальмування виконуємо з рівня $1.5\omega_{н}$ за 20 с.

при $t = 55$ с, моделювання завершено.

Після моделювання отримані графіки перехідних процесі: зміни завдання швидкості та її реального значення (рис. 5.2), моменту двигуна (рис. 5.3), напруги фази статора Usa(рис. 5.4), струму фази статора Isa(рис. 5.5), потокозчеплення фази ротора ψ_{ra} (рис. 5.6), та складових вектора струму статора I_q, I_d (рис. 5.7). Значення величин на графіках приведені у відносних одиницях.

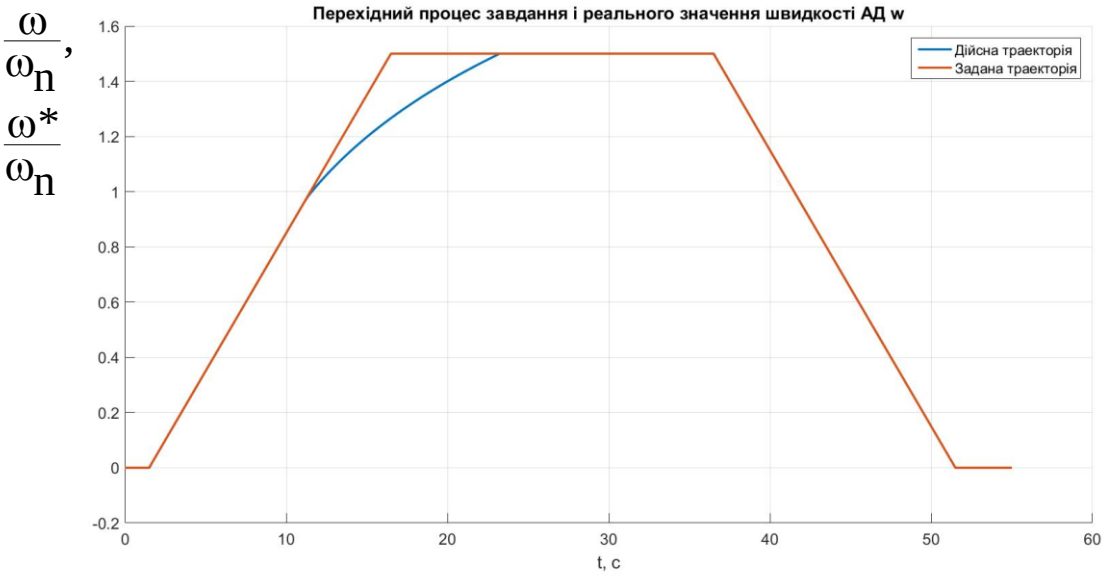

Рисунок 5.2 – Перехідний процес швидкості АД

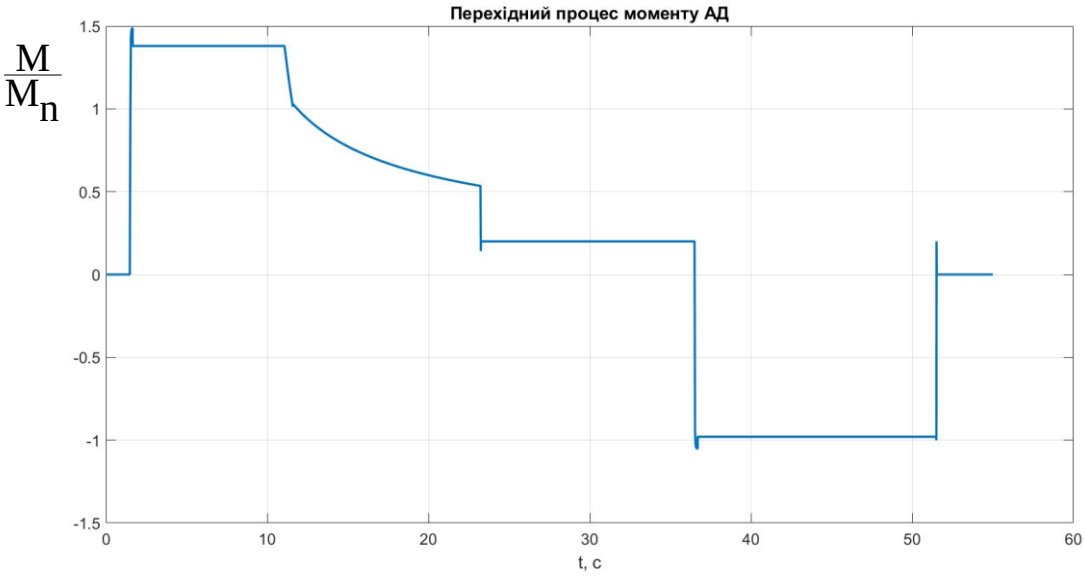

Рис. 5.3 – Перехідний процес моменту АД

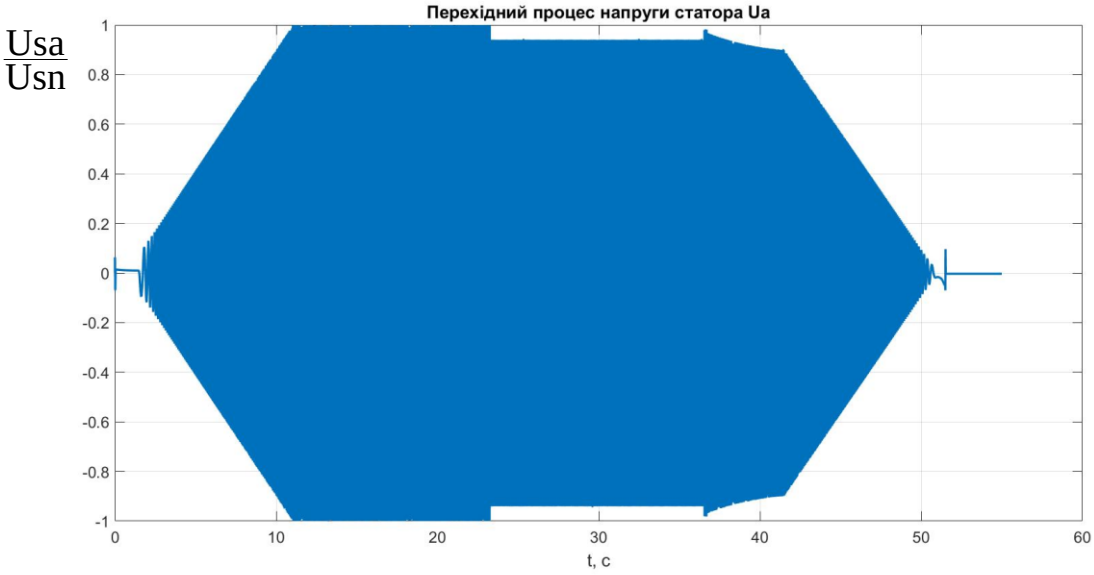

Рис. 5.4 – Перехідний процес напруги фази статора U_a

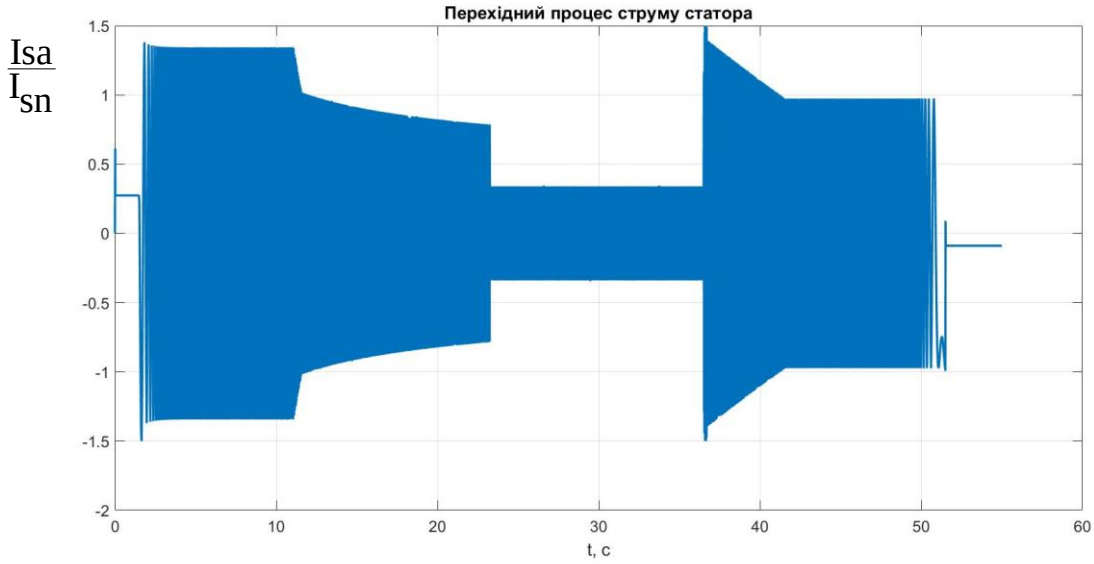

Рис. 5.5 – Перехідний процес струму фази статора

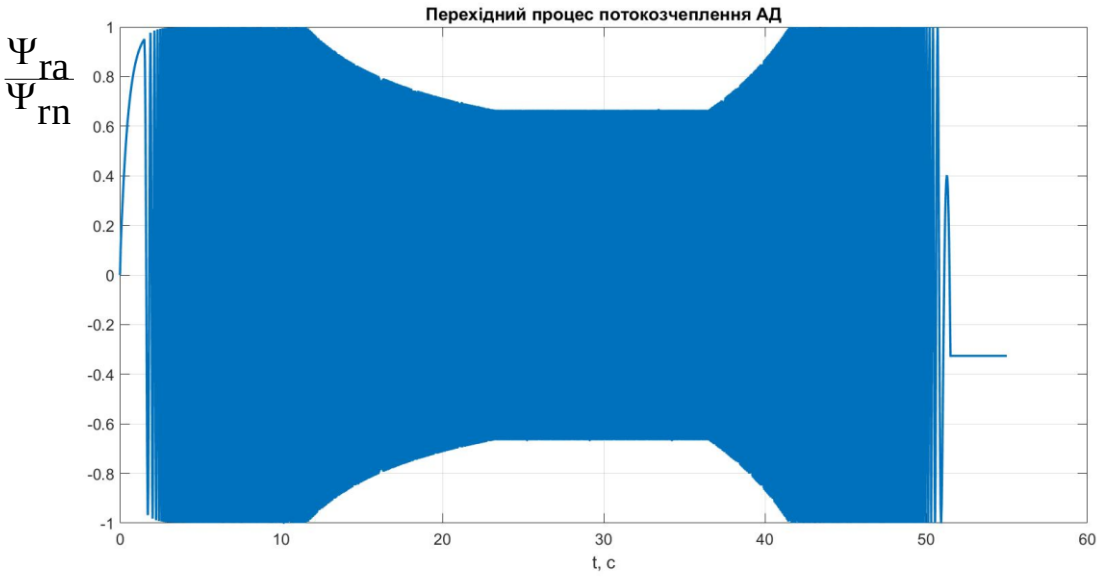

Рис. 5.6 – Перехідний процес потокозчеплення ротора АД

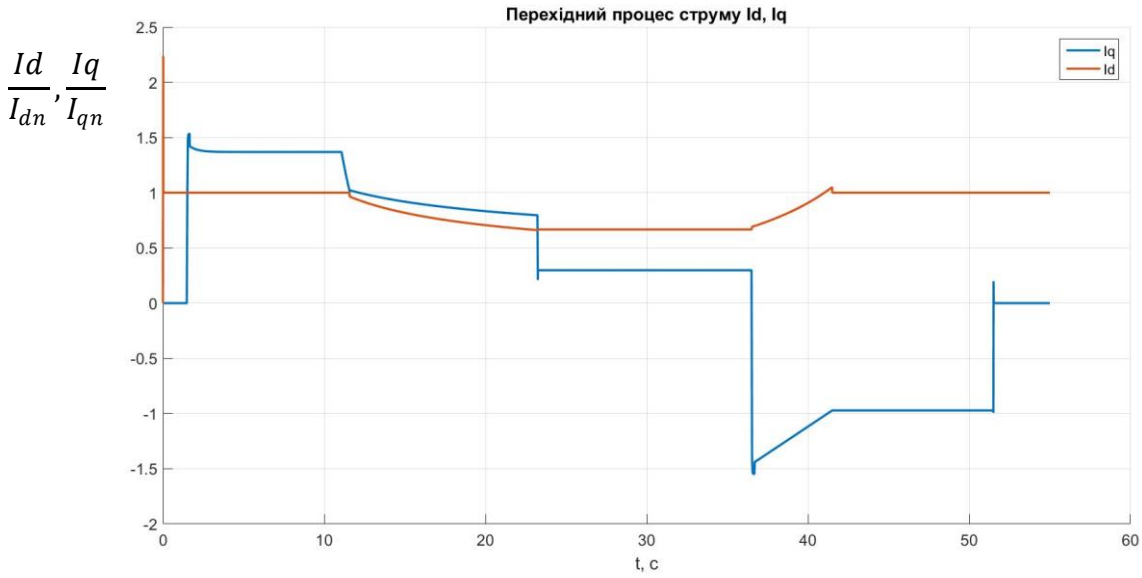

Рис. 5.7 – Перехідний процес струму Id, Iq

Моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном робовагону **без пасажирів:**

Подання плавно наростаючого сигналу завдання швидкості. Розгін виконуємо до швидкості $1.5\omega_{Н}$ за 17 с.

Подання плавно спадаючого сигналу завдання швидкості. Гальмування виконуємо з рівня $1.5\omega_{Н}$ за 17 с.

при $t = 55$ с, моделювання завершено.

Після моделювання отримані графіки перехідних процесі: зміни завдання швидкості та її реального значення(рис. 5.2), моменту двигуна(рис. 5.3), напруги фази статора Usa(рис. 5.4), струму фази статора Isa(рис. 5.5), потокозчеплення фази ротора ψ_{ra} (рис. 5.6), та складових вектора струму статора I_q, I_d (рис. 5.7). Значення величин на графіках приведені у відносних одиницях.

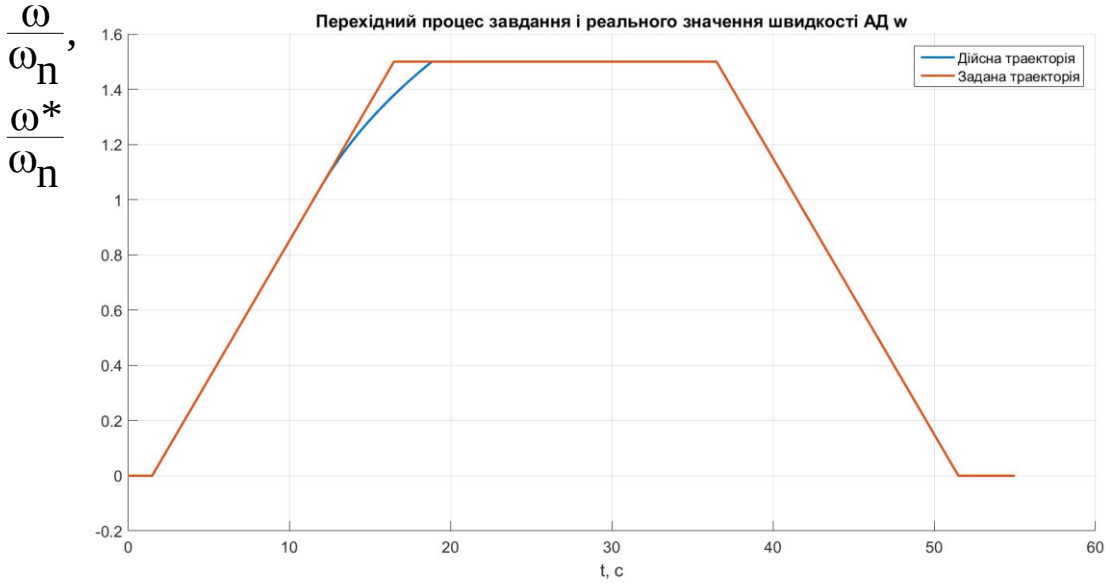

Рисунок 5.8 – Перехідний процес швидкості АД

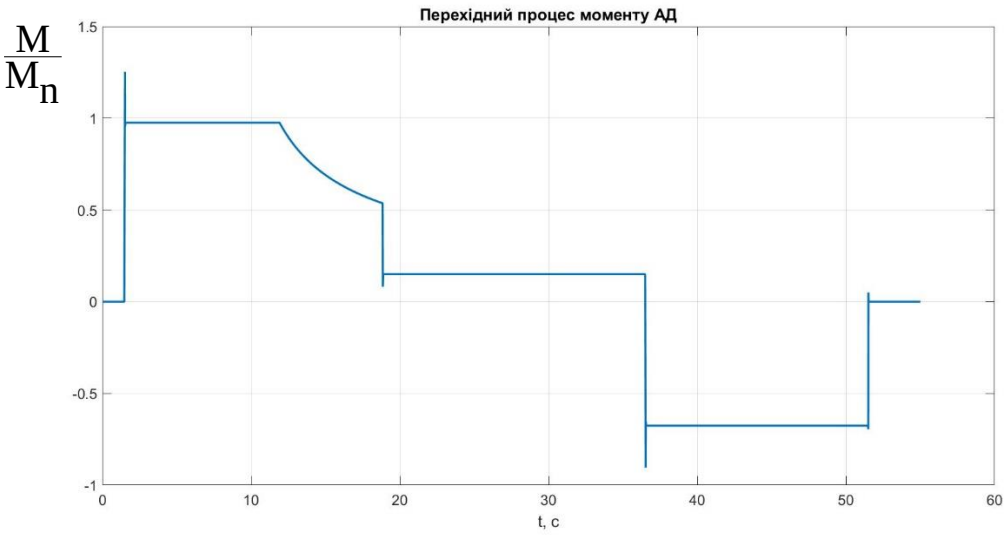

Рис. 5.9 – Перехідний процес моменту АД

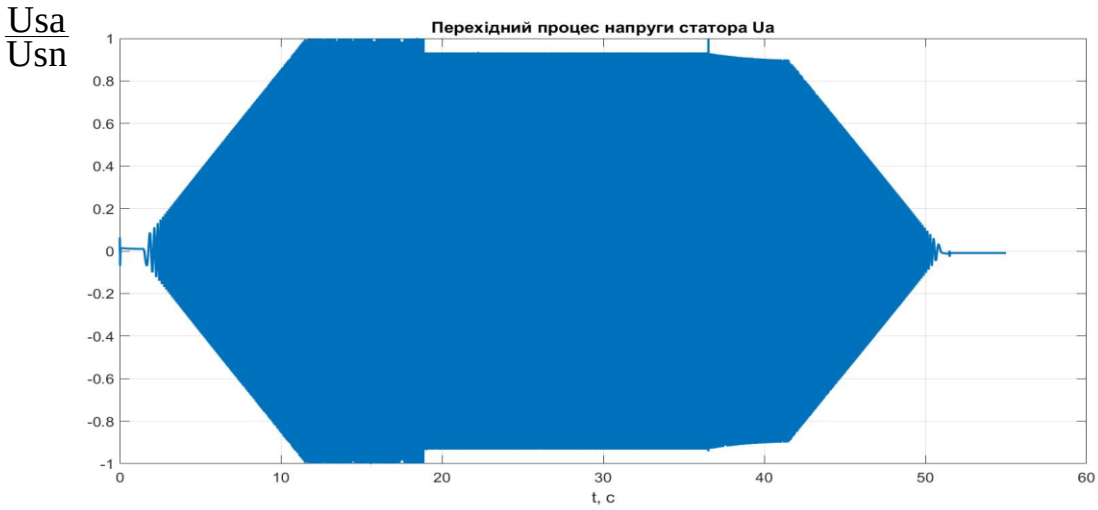

Рис. 5.10 – Перехідний процес напруги фази статора U_a

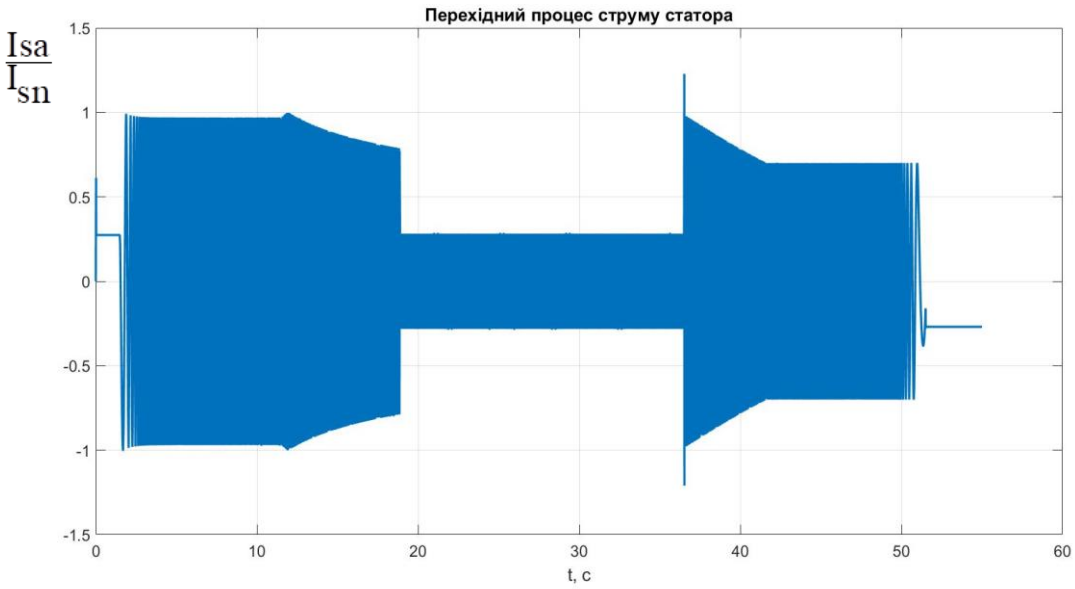

Рис. 5.11 – Перехідний процес струму фази статора

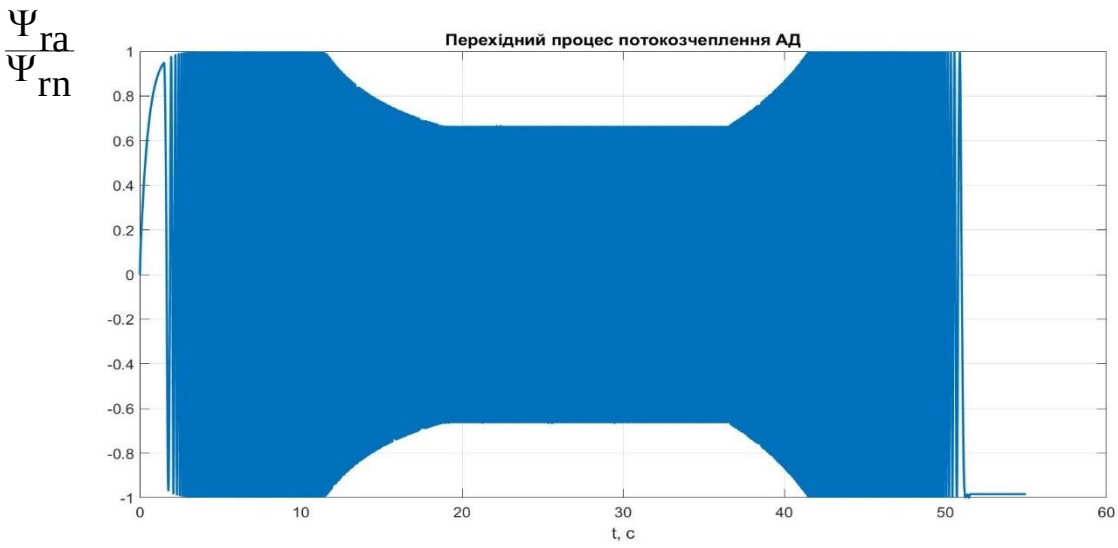

Рис. 5.12 – Перехідний процес потокозчеплення ротора АД

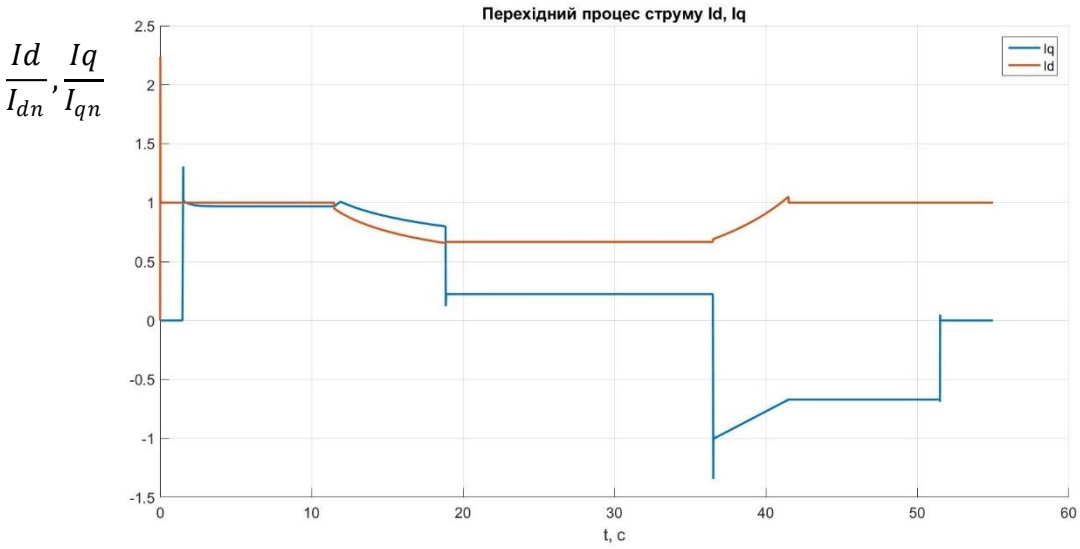

Рис. 5.13 – Перехідний процес струму Id

На графіках показані перехідні процеси основних величин в АД. Під час моделювання було досліджено наступні режими: розгін, рух з максимальною швидкістю та гальмування при повному завантаженні вагону та без завантаження.

На рисунку 5.2 зображений перехідний процес завдання швидкості та її реального значення, як бачимо при перевищені номінальної швидкості(друга зона), вона починає просідати відносно завдання, що спричинене падінням моменту в другій зоні, яке видно з рисунку 5.3. Розбіжність з раніше розрахованими діаграмами пояснюється тим, що в другій зоні момент АД

точно повторює зміну потокозчеплення, а при побудові навантажувальної діаграмі у другій зоні було використано середнье значення моменту. Як бачимо с графіків для досягання заданої швидкості (вище номінальної) необхідно знижувати потік, що призводить до падіння моменту (рис. 5.6). Це викликано тим, що в другій зоні швидкості під час керування необхідно обмежувати потужність на номінальному рівні. Напруга при розгоні досягає номінального значення(рис. 5.4). Час гальмування в реальних умовах буде трохи більшим ніж розрахований.

Коли швидкість сягає максимального значення ($1.5\omega_{Н}$), закінчується розгін, і рух продовжується з постійною швидкістю. Під час такого руху на вагон діє тільки статичний момент, що видно з рисунка 5.3.

Для здійснення гальмування момент стрибкоподібно змінює свій знак на від'ємний до значення, що відповідає рівню обмеження виходу регулятора швидкості. При переході із другої зони швидкості впершу гальмівний момент АД зростає до номінального значення і підтримується на цьому рівні до зупинки двигуна. Потік при цьому зростає і в першій зоні стабілізується на рівні номінального значення.

Висновок до 5 розділу:

1. Проаналізувавши графіки можна сказати, що вони відображають очікувані результати.

2. При розгоні вагону метрополітену було перейдено у другу зону керування, що видно з результатів моделювання.

3. Було досліджено два режими роботи. Перший режим був здійснений при повному завантажені вагону, в другому режимі робовагон не містив пасажирів.

ВИСНОВКИ

В даній роботі було спроєктовано систему автоматичного керування електроприводом робовагону метро на основі асинхронного двигуна. За

допомогою моделювання підтверджено необхідні показники якості розробленої системи керування АЕП робовагону метро. При виконанні дипломного проєкту були отримані наступні висновки та результати.

1. Здійснено аналітичний огляд електромеханічної частини вагону метрополітену та способи керування електроприводів. Складені вимоги до електроприводу та системи керування.

2. Розраховано основні параметри тягового електродвигуна. За результатами розрахунків було обраний асинхронний двигун фірми Simens серії з потужністю 630 кВт. Обраний двигун був перевірений на нагрів за еквівалентним моментом та потужністю, перевірка вказує на правильність вибору двигуна. Розрахована силова чистина. Було обрано за каталогами конденсатори згладжувального фільтру; IGBT ключі для інвертора; датчик струму; датчик напруги.

3. Побудована функціональна схема системи. Одержано математичний опис електродвигуна та перетворювача частоти а також описано алгоритм керування. Отримані результати дозволяють сформувати модель для дослідження динамічних процесів електромеханічної системи.

4. Виконано синтез регуляторів струму, швидкості, потокозчеплення для реалізації векторного керування асинхронним електроприводом вагону метро.

5. Побудована модель САК АЕП в середовищі Simulink за її допомогою виконано дослідження властивостей системи при векторному керуванні АЕП робовагону метро.

6. Розроблено схему електричну принципову силової частини та виконано креслення зовнішнього виду робовагону метрополітену.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 - Дисертація національного дослідницького університету MEI https://mpei.ru/diss/Lists/FilesDissertations/206-%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf

2 - Вагон метрополітену https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B0%D0%B3%D0%BE%D0%BD_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B0

3 - Дисертація національного дослідницького університету MEI https://mpei.ru/diss/Lists/FilesDissertations/211-%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf

4 – Безпілотні потяги https://infomach.ru/bespilotnye-poezda/

5 - Велика Британія презентувала сучасне метро нового покоління http://businessua.com/transport/14192velika-britaniya-prezentuvala-suchasne-metro-novogo-pokolinnya-video.html

6 – Каталог LEM – current transducer, voltage transducer, sensor, power measurement. [ONLINE] Available at: http://www.lem.com.

7 – Каталог Semiconductor & System Solutions - Infineon Technologies. [ONLINE] Available at: http://www.infineon.com.

8 – Каталог EPCOS - Home. [ONLINE] Available at: http://www.epcos.com.

9 - Методичні вказівки спрощенного розрахунку елементів силової частини Available at: http://epa.kpi/metodichka ek

10 - Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кирякин А. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. 1998. (http://www.dsk.kharkov.net).

11 - Пересада С. М. Обобщенный алгоритм прямого векторного управления асинхронным двигателем / С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса// *Техн. електродинаміка*. - 2002. - № 4. - С. 17-22.

12 - Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. – К.: НТУУ “КПІ”, 2011 р. – 96 с.

13 - Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть I. Проблемы векторного управления в асинхронном электроприводе: краткий обзор и формулировка проблемы // *Техн. електродинаміка.* –1999. –№ 2. –С. 27–32.

14 - Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть II. Синтез алгоритма отработки модуля потока и угловой скорости // *Техн. електродинаміка.* –1999. –№ 4. – С. 26–31.

15 - Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів напрямку підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, С. С. Димко –К.: НТУУ “КПІ”, 2014 р. 43 с.

Додаток А Графічна частина

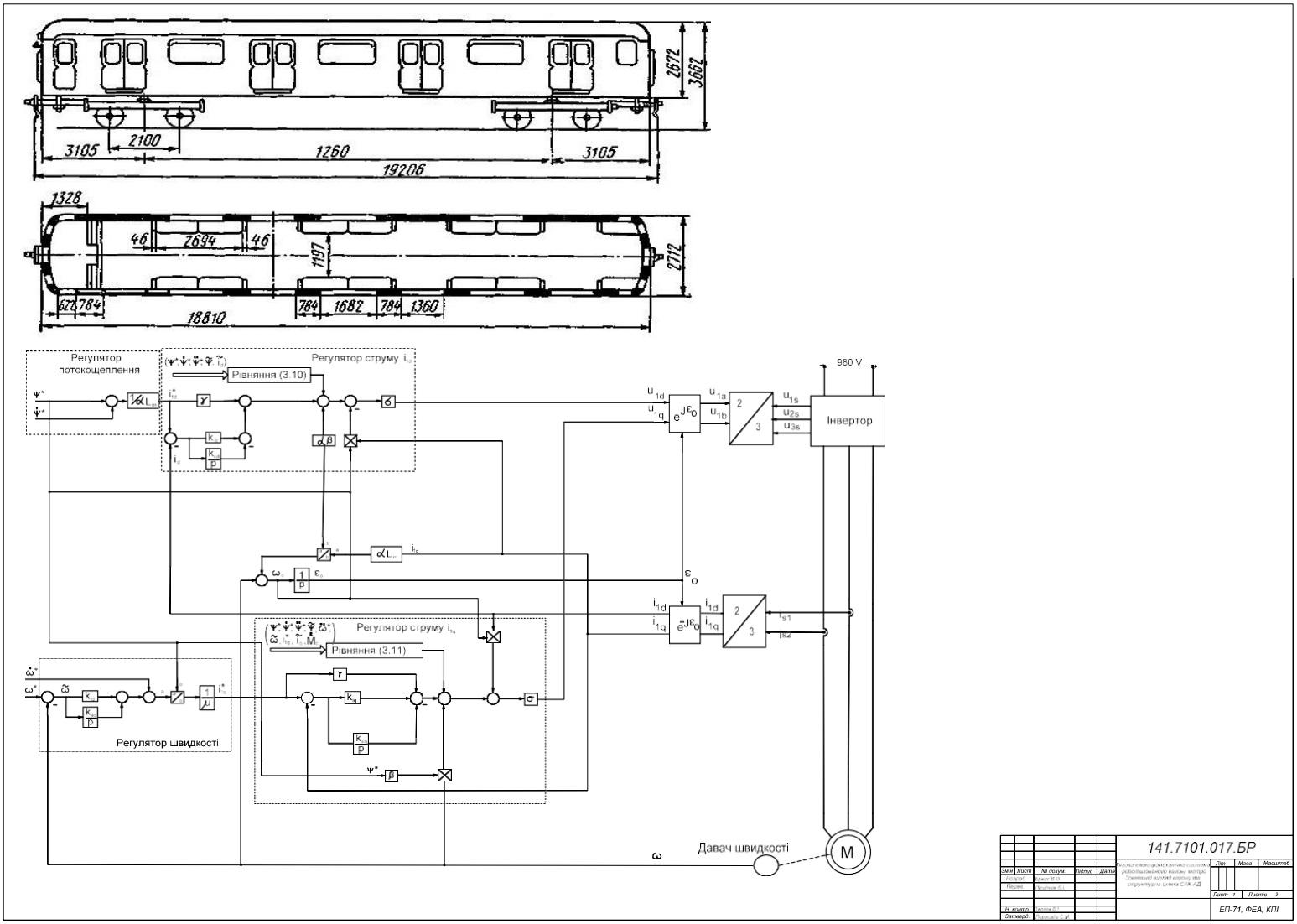

Рисунок А1 – Зовнішній вигляд вагону та структурна схема САК АД

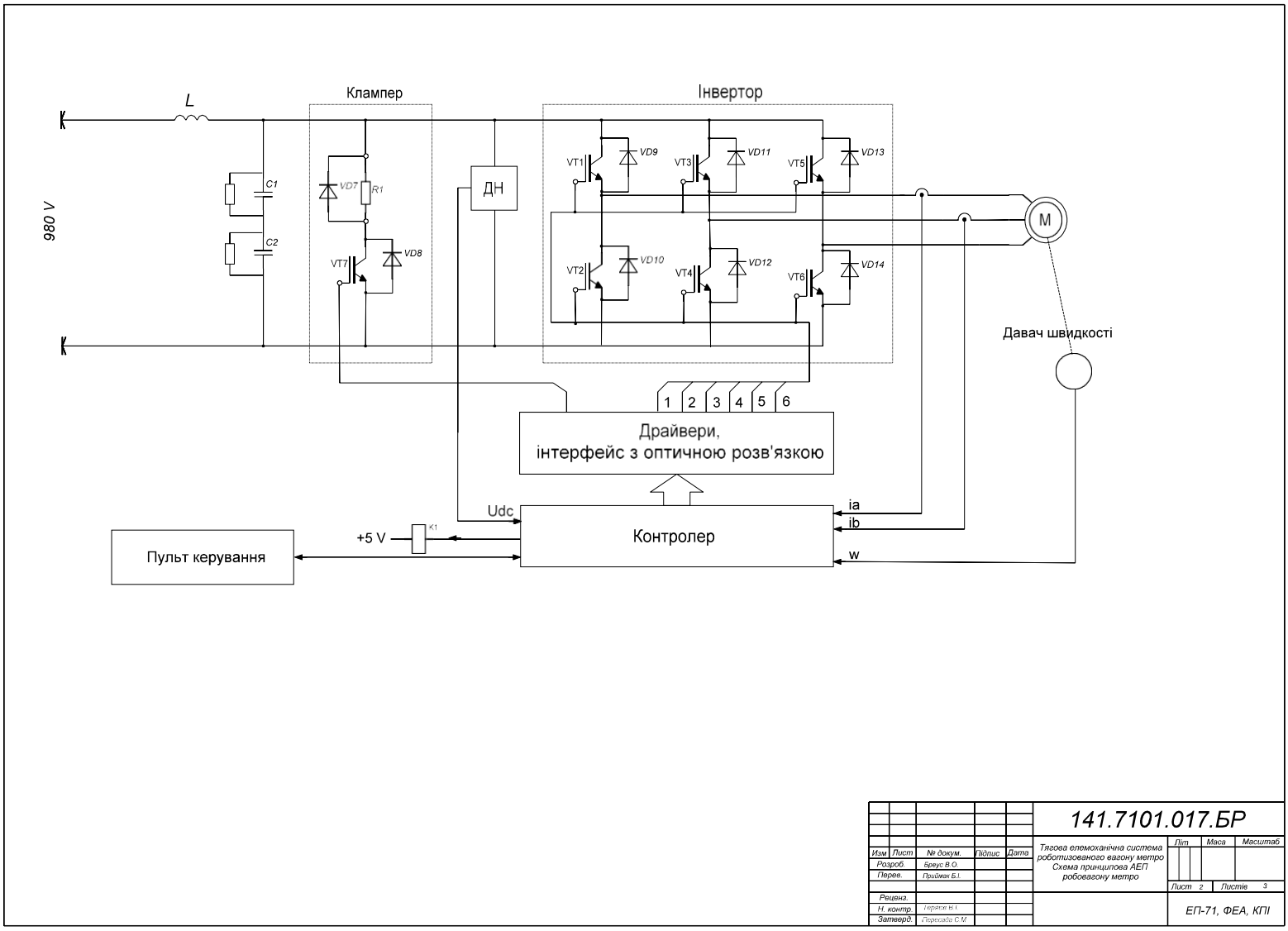

Рисунок А2 – Схема принципова АЕП робовагону метро

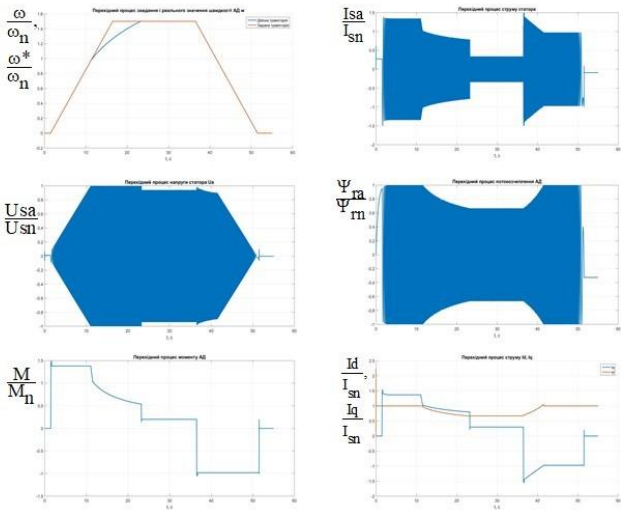

Рисунок 1 – Результати моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном робовагону з **пасажирами**

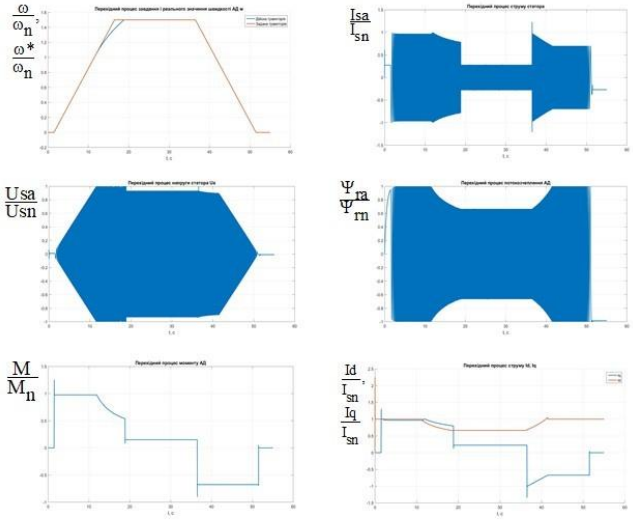

Рисунок 2 – Результати моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном робовагону **без пасажирів**

					141.7101.017.БР		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Тягова електромеханічна система роботизованого вагону метро Результати моелювання САК АЕП	Літ.	Лист 3 / Листів 3
Розроб.		Бреус В.О.				Аркуш 1	Аркушів 2
Перев.		Приймак Б.І.					
Т.контр.							
Н.контр.		Теряєв В.І.				ЕП-71, ФЕА,КПІ	
Затв.		Пересада С.М.					

Рисунок А3 – Результати моделювання САК АЕП

Поз. позн.	Найменування	Кіл.	Примітка
VT1-VT7	IGBT модуль FZ240012HE4_B9	1	
	Енкодер 1XP8001-1/2048	1	
	Датчик напруги LV100-Voltage1	1	
C1-C2	Конденсатор B437*4A6109MO##	2	
	Датчик струму HAX1500-S	1	
M	Асинхронний двигун 1LA8405-2AC	1	
	Матеріали		
	Кабель ВВГ 3х10		
	Провода КПВ-ВП 2х2х0,5		

Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	…			
Розробив		Бреус В.О.			Тягова електромеханічна система роботизованого вагону метро	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Приймак Б.І.					1	1
Реценз.						«КПІ ім. Ігоря Сікорського» Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП -71		
Н. контр.		Теряєв В.І.						
Затверд.		Пересада С.М.						