**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ С. М. Пересада
(підпис) (ініціали, прізвище)

“___” _____2020 р.

# Дипломний проект

**на здобуття ступеня бакалавра**

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

на тему: «Асинхронний електропривод трамвая»

Виконав : студент _4_ курсу, групи _____ЕП-62_____
(шифр групи)

Вещиков Георгій Вячеславович _____ _____
(прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Керівник Шаповал Іван Андрійович _____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Рецензент _____ _____
(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 – 2020 р.

# ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

| № з/п | Формат | Позначення | Найменування | Кількість листів | Примітка |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | А4 | | Завдання на дипломний проект | 2 | |
| 2 | А4 | 141.62104.020.БР | Пояснювальна записка | 64 | |
| 3 | А1 | 141.62104.020.БР | Функціональна схема електроприводу трамвая | 1 | |
| 4 | А1 | 141.62104.020.БР | Результати моделювання | 1 | |
| 5 | А1 | 141.62104.020.БР | Результати моделювання | 1 | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

| | | | | 141.62104.020.БР | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ПІБ | Підп. | Дата | | | |
| Розробн. | Вещиков Г.В. | | | Відомість дипломного проекту | Лист | Листів |
| Керівн. | Шаповал І.А. | | | | 2 | 68 |
| Консульт. | | | | | КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-62 | |
| Н/контр. | | | | | | |
| Зав.каф. | | | | | | |

# Пояснювальна записка
## до дипломного проекту

на тему: Асинхронний електропривод трамвая

Київ – 2020 р.

**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
_____ С. М. Пересада
(підпис) (ініціали, прізвище)
«___»_____2020 р.

**ЗАВДАННЯ**
**на дипломний проект студенту**

_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Асинхронний електропривод трамвая _____
_____
_____ ,
керівник проекту Шаповал Іван Андрійович, д.т.н.. _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом проекту 18.05.2020 _____

3. Вихідні дані до проекту _____
_____
_____
_____

4. Зміст пояснювальної записки: Зміст. Вступ. 1. Аналітичний огляд в області електроприводу трамваїв. 2. Визначення потрібної потужності електродвигуна.

3. Розрахунок та вибір силового обладнання. Опис силової схеми перетворювального пристрою. 4. Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи. Висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Функціональна схема електроприводу трамвая. Діаграми напруг та часові діаграми електромагнітного моменту АД. Графіки перехідних процесів.

6. Консультанти розділів проекту*

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

7. Дата видачі завдання 20.03.2020

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проекту | Термін виконання етапів проекту | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1 | Аналітичний огляд в області електроприводу трамваїв | 03.04.2020 | |
| 2 | Визначення потрібної потужності електродвигуна | 20.04.2020 | |
| 3 | Розрахунок та вибір силового обладнання. Опис силової схеми перетворювального пристрою | 05.05.2020 | |
| 4 | Дослідження статичних та динамічних режимів електромеханічної системи | 15.05.2020 | |
| 5 | Оформлення пояснювальної записки та розробка графічної частини ДП | 05.06.2020 | |

Студент _____ (підпис) Георгій Вещиков (ініціали, прізвище)

Керівник проекту _____ (підпис) Іван Шаповал (ініціали, прізвище)

# РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 68, рисунків – 20 та графічну частину на 2 листах А1.

В дипломному проекті розраховано керований електропривод змінного струму для сучасного трамвая. Виходячи із початкових умов, було розраховано загальну потужність привода та обрано двигун 4А280М4У3. Після цього шляхом розрахунків було отримано параметри його схеми заміщення для подальшого моделювання, після чого було промодельовано отриману систему в різних режимах роботи.

Розрахунок і реалізація даного дипломного проекту забезпечувались за допомогою використання наступних програм: Microsoft Office Word 2016, Microsoft Office Visio 2013, Mathcad 15.0, MatLab R2009b, MathType 6.9.

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, КЕРОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ПРОЕКТУВАННЯ, ТРАМВАЙ, МІСЬКИЙ ТРАНСПОРТ, МОДЕЛЮВАННЯ

## SUMMARY

A diploma project contains: pages – 68, figures – 20 and graphic part on 2 letters of A1.

In the diploma project the controlled electric drive of alternating current for the modern tram was calculated. Based on the initial conditions, the total drive power was calculated and the 4A280M4U3 engine was selected. Then the parameters of its substitution scheme for further modeling were obtained by calculations, after which the obtained system was modeled in different operating modes.

The calculation and implementation of this diploma project were provided using the following programs: Microsoft Office Word 2016, Microsoft Office Visio 2013, Mathcad 15.0, MatLab R2009b, MathType 6.9.

INDUCTION MOTOR, CONTROLLED ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY CONVERTER, PLANNING, TRAM, URBAN TRANSPORT, MODELING

ЗМІСТ

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТРАМВАЇВ .... 13

1.1 Типові технічні рішення електропривода трамваїв ..... 13

1.2 Аналітичний огляд різновидів алгоритмів керування ..... 17

1.3 Опис електропривода трамваїв ..... 22

1.4 Формулювання вимог до електроприводу трамвая, систем автоматичного керування та автоматизації ..... 24

1.5 Особливості тягового електроприводу ..... 31

1.6 Технічна реалізація алгоритмів керування ЕП ..... 33

1.7 Особливості рейкового міського транспорту ..... 36

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ..... 38

2.1 Розрахунок потужності ..... 38

2.2 Розрахункові дані для моделювання електромеханічних процесів електропривода ..... 39

2.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна..... 41

3 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ. ОПИС СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ..... 45

3.1 Розрахунок автономного інвертора напруги ..... 45

3.2 Розрахунок зарядного кола для заряду конденсаторів фільтра ..... 45

3.3 Ємнісний фільтр ..... 46

3.4 Розрахунок параметрів баластного опору ..... 47

3.5 Розрахунок датчиків струму та напруги ..... 47

3.6 Опис силової схеми електропривода ..... 48

4 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ..... 51

4.1 Дослідження перехідних процесів при розгоні порожнього вагону ... 53

4.2 Дослідження перехідних процесів при розгоні та скиданні моменту тяги ... 56

4.3 Дослідження перехідних процесів при русі трамваю на підйом ... 60

ВИСНОВКИ ... 64

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ ... 66

# ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун

АІН – автономний інвертор напруги

КВ – керований випрямляч

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПЧ – перетворювач частоти і напруги

СК – система керування

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ТЕД – тяговий електродвигун

ПКМ – пряме керування моментом

ЕМС – електро-механічна система

# ВСТУП

На сьогоднішній день, в період стрімкого розвитку технологій, що пов’язані з електроенергетикою, міський електричний транспорт є основним способом переміщення людей всередині міста. Значний ріст кількості жителів мегаполісів та поступове впровадження у різні сфери керованого електроприводу змінного струму ставить перед нами задачу вдосконалення транспорту за рахунок підвищення енергетичної ефективності шляхом підвищення коефіцієнту корисної дії та збільшення пасажиромісткості рухомого складу. В нашому випадку буде розглянуто трамвай як екологічно чистий транспортний засіб громадського користування з високою перевізною здатністю. За останнім критерієм він поступається лише метрополітену, що у свою чергу потребує значно більш затрат на будівництво ліній.

Найпоширенішим та найнадійнішим пристроєм для приведення в рух різних механізмів є асинхронний двигун, але в некерованому електроприводі він не має змоги реалізації всіх своїх можливостей. Для цього використовуються перетворювачі частоти, побудовані на основі керуючого мікроконтролера та керованого інвертора. Він дозволяє сильно підвищити ефективність електропривода та дає змогу керування швидкістю за певним законом, якого потребує технологічний процес, а також забезпечує плавний пуск зі зменшенням пускових струмів. Тому керований електропривод змінного струму набуває все більшої популярності.

Перетворювач частоти разом з асинхронним двигуном дозволяє відмовитись від вже застарілого приводу постійного струму з аналоговими колами керування. У випадку рейкового міського транспорту це дозволяє значно зменшити масо-габаритні показники силового обладнання. Виходячи з цього, ми отримуємо змогу перенести керуюче обладнання на дах вагону, звільнивши простір під підлогою, завдяки чому з’являється можливість реалізації трамваю з низьким рівнем підлоги. Останнє значно підвищує

рівень комфорту під час пересування містом. Це є особливо важливим для людей з обмеженими фізичними можливостями.

З описаного вище випливає, що створення або ж модернізація вже існуючого рухомого складу із використанням керованих електроприводів змінного струму є дуже актуальною задачею сьогодення. Саме на цю тему буде проведено дослідження у цьому дипломному проекті.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТРАМВАЇВ

## 1.1 Типові технічні рішення електропривода трамваїв

Більшість трамваїв використовує електротягу з подачею електроенергії через повітряну контактну мережу за допомогою струмоприймачів (пантографів або штанг, рідше - бугелів), проте існують також трамваї з живленням від контактної третьої рейки або акумуляторів.

У ранній період розвитку електричного трамвая електричні мережі загального користування не були достатньо розвиненими, тому майже кожне нове трамвайне господарство мало власну центральну електростанцію. Зараз трамвайні господарства отримують електроенергію від електричних мереж загального користування. Оскільки трамвай живиться постійним струмом відносно невисокої напруги, то передача його на великі відстані є витратною [1]. Тому поблизу ліній розміщуються тягові підстанції, які отримують з мереж змінний струм високої напруги та перетворюють його в постійний струм, що далі подається в контактну мережу.

Для трамвайних і тролейбусних систем колишнього СРСР характерні дві схеми енергопостачання: централізована і децентралізована [2]. Централізована система була основною і нерідко єдиною схемою до 1960-х рр.. Вона складалася з великих тягових підстанцій з декількома перетворювальними агрегатами для обслуговування всіх прилеглих до неї ліній, або ліній, які перебувають від них на відстанях до 1-2 км. Як правило, такі тягові підстанції перебували в місцях високої щільності трамвайних та / або тролейбусних ліній: в центрах міст, в районах злиття декількох ліній, поблизу трамвайних депо і т. і. Децентралізована система стала поширюватися з 1960-х рр. і є основною для довгих трамвайних і тролейбусних ліній, наприклад з центру міста уздовж якого-небудь шосе на околицю, для заміських ліній, для ліній від станцій метро у віддалені мікрорайони й так далі. У такій системі уздовж лінії кожні 1-2 км

розташовані малопотужні тягові підстанції з одним або двома перетворювальними агрегатами. Така мала тягова підстанція живить одну або дві ділянки лінії в безпосередній близькості, на кінцях ця ділянка може живитися від сусідніх підстанцій. Ця схема забезпечує менші втрати енергії внаслідок меншого спаду напруг уздовж лінії живлення і велику стабільність роботи в разі будь-якої аварії на конкретній підстанції, в разі одночасного живлення ділянок від двох підстанцій.

Номінальна напруга на виході тягової підстанції - 600 В, а номінальна напруга струмоприймача рухомого - 550 В. В деяких містах світу прийнята напруга 825 В і 750 В відповідно (на території країн колишнього СРСР таку напругу використовують в метро). У більшості нових трамвайних систем Європи стандартною напругою рухомого складу є 750 вольт.

У містах, де трамвай співіснує з тролейбусом, ці види транспорту, як правило, мають загальне енергогосподарство.

Трамвай живиться постійним електричним струмом через розташований на даху вагона струмоприймач - зазвичай це пантограф, а в деяких випадках використовуються бугельні струмоприймачі («дуги») і штанги або полупантографи. Наприклад, в Європі частіше зустрічаються бугелі, а в Північній Америці і Австралії - штанги.

При використанні штанг пристрій повітряних стрілок, подібний до тролейбусного. У деяких містах, де застосовується штанговий струмозйом (наприклад, Сан-Франциско), на ділянках спільного пролягання трамвайних і тролейбусних ліній один з контактних проводів використовується одночасно і трамваєм, і тролейбусом.

Існують спеціальні конструкції для перетину повітряних контактних мереж трамвая та тролейбуса. Перетин трамвайних ліній з електрифікованими залізницями не допускається через різні напруги і висоти підвіски контактних мереж.

Зазвичай для відводу зворотного тягового струму використовуються рейки, тому частина зворотного тягового струму йде через землю. («Струми,

що блукають» прискорюють корозію металевих підземних конструкцій водопроводу та каналізації, телефонних мереж, арматури фундаментів будівель, металевих й армованих конструкцій мостів.) Для подолання цього недоліку в деяких містах (наприклад, в Гавані) використовувалася система струмозйому за допомогою двох штанг (як на тролейбусі).

Створення трамваїв з низькою підлогою розвивалося на базі декількох конструктивних рішень, які визначали загальне компонування тягового приводу [3]. Першим етапом на цьому шляху слід вважати технічне рішення, засноване на традиційному компонуванні приводу. Тягові двигуни і редуктори розміщувалися поперечно напрямку руху у внутрішньому просторі моторних візків. Обертовий момент двигуна передавався через редуктор на колісну пару. Розробники намагалися знизити габарити тягового двигуна, разом з цим вдалося знизити висоту підлоги у пасажирському салоні до 550 ... 600 мм від рівня головки рейки. Прикладом можуть служити трамваї серії К5000 виробництва Bombardier Transportation для Кьольну (2002) з частотою обертання валу двигуна до 5576 об / хв, трамваї серії GT8-100 виробництва тієї ж компанії для Карлсруе (1997) з частотою обертання валу двигуна до 6000 об / хв або трамваї виробництва японської компанії Kinki Sharyo для Нью-Джерсі (1997) з частотою обертання валу двигуна до 5000 об / хв. Наступним етапом стало технічне рішення, коли тягові двигуни та редуктори були винесені у зовнішній простір візка й розміщені поздовжньо по обидва її боки. У тому випадку, якщо виробники зберігали колісну пару, це рішення дозволяло знизити рівень підлоги до 450 мм й створювати трамваї з частково низьким рівнем підлоги, в тому числі за рахунок розміщення електроапаратури на даху вагона. Прикладом можуть бути трамваї виробництва Bombardier Transportation з візками типу FLEXX2500. При діаметрі коліс 630 ... 700 мм такі вагони мали частку низької підлоги до 70%. Таке ж принципове рішення використано в візках FLEXX1000 і FLEXX Urban 3000 для трамваїв сімейства FLEXITY2, з тією лише різницею, що діаметр коліс був зменшений до 570 мм. В результаті

частка низької підлоги (320 ... 350 мм) зросла до 100%. Третій етап полягав у відмові від колісної пари та створенні візка з незалежно обертовими колесами. В такому випадку колеса з'єднувалися поперечною балкою прямокутного перетину U-подібної форми. Незалежне обертання коліс по різні боки візка дозволяло з меншими динамічними зусиллями проходити криві ділянки колії. Тягові двигуни й редуктори розміщувалися з зовнішньої сторони візка поздовжньо. Прикладом може служити візок типу SF30 C TFW (Siemens), розроблений у 1996 році і з 1998 року застосовується на трамваях сімейства Combino. При діаметрі нових коліс 600 мм виробникові вдалося знизити рівень підлоги до 300 мм. За цим варіантом виконано значну кількість трамваїв компанією Siemens, а також трамваї сімейства SIRIO (AnsaldoBreda, Італія), CITADIS (Alstom), серії TMK2200 (Koncar, Хорватія) і ряд інших серій виробництва Чехії, Польщі, Японії. Останнім етапом, реалізованим в 2004-2006 роках концерном Siemens, є створення трамвая серії ULF з гранично низьким рівнем підлоги (200 ... 210 мм). Відмінною особливістю трамваїв даної серії є одновісні візки портального типу з незалежно обертовими колесами, розташовані між секціями трамвая. Колесо з кожного боку наводиться окремим двигуном, розміщеним вертикально, через конічний редуктор. Всі розглянуті варіанти виконання тягового приводу засновані на використанні традиційних асинхронних тягових двигунів і редукторів того чи іншого виконання. Особливий тип приводу - безредукторний, заснований на застосуванні тягового асинхронного двигуна типу мотор-колесо, використаний при виробництві трамваїв сімейства Variobahn (Variotram), що випускалися компаніями Adtranz / Bombardier, а кілька років тому переданих для виробництва компанії Stadler (Швейцарія). Безредукторний привод виконаний у вигляді трифазного восьмиполюсного асинхронного двигуна потужністю 35-45 кВт циліндричного виконання із зовнішнім ротором, поєднаним з рушійним колесом, і внутрішнім статором з рідинним охолодженням [4]. Статор складається з нерухомого полого валу з трубою, що утворює контур охолодження, шихтованного магнітопроводу зі

стягувальними кільцями, обмотки статора зі струмопідводами і клемами для підключення, елементів ущільнення. Труба корпусу ротора має пази, в які вкладаються стрижні, що утворюють разом з короткозамкненими кільцями «білячу клітку» ротора. На зовнішню поверхню труби ротора насаджується колесо, що складається з бандажа, гумового шумогасного елемента і стопорного кільця. З обох кінців труба закривається обертовими підшипниковими щитами. Кожне мотор-колесо має зовнішній діаметр труби ротора 440 мм, довжину 460 мм, вага 510 кг (без урахування бандажу).

## 1.2 Аналітичний огляд різновидів алгоритмів керування

На теперішній час відомі наступні способи регулювання швидкістю асинхронного двигуна [5]:

1. Зміна напруги статора ;

2. Зміна частоти напруги живлення статора, в тому числі одночасно зі зміною її величини;

3. Зміна активного електричного опору кола ротора (тільки для двигунів із фазним ротором);

4. Зміна числа пар полюсів (тільки для спеціальних полюсоперемикаємих двигунів);

5. Використання енергії ковзання за допомогою спеціальних каскадних схем (тільки для двигунів із фазним ротором);

6. Подвійне живлення двигуна (тільки для двигунів із фазним ротором);

7. Зміна електричного опору кола статора (тільки для двигунів із короткозамкненим ротором);

8. Векторне керування.

На теперішній час у зв’язку з вдосконаленням напівпровідникових технологій найбільш поширеним є векторне (або полеорієнтоване керування). В проаналізованій літературі досліджуються особливості такого

керування за різних умов з метою вдосконалення даного методу керування [6],[7],[8],[9].

Векторне керування поділяється на пряме і непряме. Пряме векторне керування [10],[11] потребує розрахунку спостерігача, що у свою чергу ускладнює математичну модель. Загальний алгоритм непрямого векторного керування АД є найбільш простим, тому що не потребує використання спостерігача. Для моделювання систем керування АД прийнято використовувати математичну модель, що записується в стаціонарній системі координат (*a*-*b*):

$$\begin{aligned}
&\dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, \;\; M = \mu(\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}),\\
&\dot{i}_{1a} = -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a},\\
&\dot{i}_{1b} = -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} + \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b},\\
&\dot{\psi}_{2a} = -\alpha\psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a},\\
&\dot{\psi}_{2b} = -\alpha\psi_{2n} - p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b},
\end{aligned} \qquad (1.1)$$

де $\omega$ – кутова швидкість ротора,

$(i_{1a}, i_{1b})^{\mathrm{T}}$ – компоненти вектора струму статора в системі координат

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

$(\mathrm{u}_{1a}, u_{1b})^{T}$ – компоненти вектора напруги статора,

$M_c$ – момент навантаження,

$v$ – коефіцієнт в’язкого тертя,

$u$ - миттєве значення напруги

Для переходу з системи координат (*a*-*b*), у синхронну систему координат ротора (*d* – *q*), яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю $\omega_0$, виконується перетворення Парка-Горева, яке визначається наступними рівняннями:

$$
\begin{aligned}
x_{dq} &= e^{-J\varepsilon_0} x_{ab}, \\
x_{ab} &= e^{J\varepsilon_0} x_{dq}, \\
e^{-J\varepsilon_0} &= \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_0 & \sin\varepsilon_0 \\ -\sin\varepsilon_0 & \cos\varepsilon_0 \end{bmatrix},
\end{aligned}
\tag{1.2}
$$

де

$$
J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \tag{1.3}
$$

Алгоритми прямого на непрямого векторного керування забезпечують наступні показники якості:

- глобальне асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії швидкості – потокозчеплення, тобто $\lim_{t\to\infty} \tilde{\omega}=0$, $\lim_{t\to\infty} \tilde{\psi}=0$ - при обмеженні усіх внутрішніх змінних ;
- асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора;
- асимптотичну лінеаризацію підсистеми швидкості до лінійної повністю керованої форми;
- асимптотичну розв’язку процесів керування електромеханічними та електромагнітних координат АД.

Для синтезу алгоритмів системи керування спочатку синтезується підсистема керування потокозчепленням, а потім підсистема керування швидкістю. Обидві підсистеми синтезуються з використанням зворотної покрокової процедури проектування.

Структура алгоритму непрямого векторного керування містить у собі наступні регулятори:

- розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення

$$
i_{1d}^{*} = \frac{1}{\alpha L_m}(\alpha\psi^{*} + \dot{\psi}^{*}), \tag{1.4}
$$

$$
\dot{i}_{1d}^{*} = \frac{1}{\alpha L_m}(\alpha\dot{\psi}^{*} + \ddot{\psi}^{*}), \tag{1.5}
$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{\psi^*}, \tag{1.6}$$

- регулятор струму по осі ($d$) (польової складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma\left(\gamma i_{1d}{}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha\beta\psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i\tilde{i}_d - x_d\right), \\ \dot{x}_d &= k_{ii}\tilde{i}_{1d}, \end{aligned} \tag{1.7}$$

- регулятор кутової швидкості

$$\begin{aligned} i_{1q}^* &= \frac{1}{\mu\psi^*}\left(-k_\omega\tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + \nu\omega^*\right), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i}\tilde{\omega}, \end{aligned} \tag{1.8}$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu\psi^*}\left[-k_\omega\left(-k_\omega\tilde{\omega} + \mu\psi^*\tilde{i}_q\right) + \dot{\hat{M}}_c + \ddot{\omega}^* + \nu\dot{\omega}^*\right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^*, \tag{1.9}$$

- регулятор струму по осі ($q$) (моментної складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma\left(\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta\omega p_n\psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq}\tilde{i}_q - x_q\right), \\ \dot{x}_q &= k_{ii}\tilde{i}_{1q}, \end{aligned} \tag{1.10}$$

Також варто розглянути скалярне керування. Воно має ряд недоліків у порівнянні із векторним. Одними з цих недоліків є наявність статичної похибки, яка пов’язана із ковзанням асинхронної машини, та неможливість відпрацювання нульової швидкості. Остання проблема виникає через те, що на нульовій швидкості дана система керування подає на статор напругу нульової амплітуди. Так як момент АД квадратично залежить від напруги, машина починає провалюватися по швидкості через неможливість протидії статичному моменту. Але у цієї системи є і переваги – це простота її реалізації, а також можливість одночасного регулювання швидкості обертання декількох двигунів.

При скалярному керуванні напруга змінюється одночасно з частотою по певному закону. Для підтримання певних характеристик двигуна при зменшенні амплітуди напруги підвищується її частота і навпаки – при зменшенні частоти зростає амплітудне значення напруги живлення. За рахунок цього ми маємо незмінне відношення номінального та критичного

моменту, а також незмінну жорсткість характеристик. Але на низьких швидкостях критичний момент починає суттєво знижуватись, що призводить до неможливості роботи на малих частотах обертання.

Керування двигунами електротранспорту може досягатися за рахунок використання прямого керування моментом [13], алгоритм якого буде обраховувати мікроконтролер. Сам по собі цей метод є більш простим, ніж векторне керування, за рахунок спрощеної структури математичної моделі. У його основі полягає розрахунок векторів моменту та потокозчеплення та розміщення їх у потрібному для нас напрямку. Як наслідок маємо можливість роздільного керування моментом та потоком асинхронного двигуна. Розрахунок моменту проводиться через отримане з давача значення струму статора. Перевагами перед векторним керуванням є відсутність потреби у використаннях датчика швидкості, не вимагається перетворення координат та має більш просту схему керування. Системи, що використовують пряме керування моментом, можуть забезпечити астатичне регулювання моменту на низьких швидкостях обертання двигуна.

Алгоритм розрахунку даного методу базується на рівнянні електромагнітного моменту асинхронного двигуна [14]:

$$M_e = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{k_1 \cdot k_2}{\sigma \cdot L_m} \cdot \left| \psi_S \times \psi_R \right| = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{k_1 \cdot k_2}{\sigma \cdot L_m} \cdot \psi_S \cdot \psi_R \cdot \sin\beta, \quad (1.11)$$

де $k_1$ - коефіцієнт електромагнітного зв’язку статора;

$k_2$ - коефіцієнт електромагнітного зв’язку ротора;

$z_p$ - число пар полюсів;

$\sigma$ - коефіцієнт розсіювання;

$\psi_S, \psi_R$ - потокозчеплення статора та ротора;

$\beta$ - просторовий кут між векторами потокозчеплень статора і ротора.

Принципом дії такої системи є порівняння заданого значення моменту з реальним, обрахунок похибки керування після чого проводиться мінімізація

її значення шляхом обчислення оптимальної комбінації станів ключів інвертора.

## 1.3 Опис електропривода трамваїв

Двигуни трамвая - найчастіше тягові двигуни постійного струму. Використовуються двигуни потужністю в межах 40-70 кВт і номінальною частотою обертання – 1000-2000 об/ хв. (максимально до 4000 об/ хв). Останнім часом з'явилася електроніка, що дозволяє перетворювати постійний струм, яким живиться трамвай, в змінний, що дозволяє використовувати двигуни змінного струму. Від двигунів постійного струму вони вигідно відрізняються тим, що практично не вимагають технічного догляду та ремонту (асинхронні двигуни змінного струму не мають колекторно-щіткового вузла, що швидко зношується). Тому від двигунів постійного струму останнім часом відмовляються на користь двигунів змінного струму.

Для передачі крутного моменту від тягового електродвигуна до осі колісної пари на трамвайних вагонах використовується кардан-редукторна передача (редуктор і карданний вал).

Пристрій регулювання струму через тяговий електродвигун (ТЕД) називається системою керування. Системи керування (СК) поділяються на такі види [15]:

1) У найпростішому випадку регулювання струму через двигун здійснюється за допомогою потужних опорів, які підключають послідовно з двигуном дискретно. Така система управління буває трьох типів:

- Безпосередня система керування (БСК) - історично перший вид СК на трамваях. Водій за допомогою важеля, з'єднаного з контактами, безпосередньо комутує опір в електричних колах ротора та обмоток ТД.

- Непряма неавтоматична реостатно-контакторна система керування (РКСК) - в цій системі водій за допомогою педалі або важеля контролера

здійснює комутацію низьковольтних електричних сигналів, якими керувалися високовольтні контактори.

- Непряма автоматична РКСК — замиканням і розмиканням контакторів керує спеціальний серводвигун. Динаміка розгону та гальмування визначається заздалегідь заданою тимчасовою послідовністю в конструкції РКСК. Вузол комутації силового ланцюга разом з пристроєм-посередником інакше називається контролером.

2) Тиристорно-імпульсна система керування (ТІСК) - СК на базі потужнострумових тиристорів, в якій необхідний за величиною струм створюється не комутацією опорів в колі двигуна, а за допомогою формування тимчасової послідовності струмових імпульсів заданої частоти і шпаруватості. Впливаючи на ці параметри, можна змінювати середнє значення струму, що протікає через ТЕД, а отже керувати його обертальним моментом. ТІСК має більший коефіцієнт корисної дії, на відміну від РКСК, так як в ній зведені до мінімуму теплові втрати в пускових опорах силового кола, але гальмування ця СК забезпечує, як правило, тільки електродинамічне.

3) Електронна система керування (транзисторна СК) асинхронним ТЕД. Одне із найекономніших по витраті електроенергії та сучасних рішень, але досить дороге і в ряді випадків досить примхливе (наприклад нестійке до зовнішніх впливів). Активне застосування в таких системах керуючих програмованих мікроконтролерів створює небезпеку впливу програмних помилок на функціонування всієї системи в цілому.

Якраз остання система керування і забезпечує найефективніший алгоритм керування з мінімізацією похибок, як наслідок – асимптотичне відпрацювання двигуном заданих траєкторій моменту та суттєве зменшення втрат при розгоні та наборі кінетичної енергії.

## 1.4 Формулювання вимог до електроприводу трамвая, систем автоматичного керування та автоматизації

На сьогоднішній день розвиток технологій призводить до можливості підвищення енергозбереження в області електропривода. Зменшення електричних втрат наразі є основною ціллю розробки нової техніки або ж її модернізації, в нашому випадку – електричних трамваїв. Перший спосіб підвищення економічності електротранспорту – це використання приводів змінного струму. Якщо порівняти асинхронну машину з короткозамкненим ротором із двигуном постійного струму випливають наступні переваги першого:

- дешевизна у виготовленні;
- відсутність потреби у регулярному обслуговуванні щітково-колекторного вузла, так як у асинхронному двигуні він відсутній;
- немає такого сильного обмеження строку служби через попередню перевагу.

З описаного вище випливає перша вимога до електроприводу трамвая – використання приводу змінного струму. Також слід врахувати кліматичні умови місцевості, у якій буде використовуватись спроектований транспорт. Це може накласти певні обмеження через потребу використання покращеної ізоляції або ж герметичності електрообладнання. Для цього потрібно буде особливе кліматичне виконання двигунів. У місцях із високою температурою повітря бажано проведення заходів щодо посилення охолодження двигунів, гальмівних опорів, а також керуючих мікроконтролерів. Цього можна досягти, збільшивши площу охолоджувальних радіаторів або ж посиленням примусової вентиляції шляхом збільшення кількості самих вентиляторів, або збільшенням їх розміру та потужності. Через це може виникати наступна вимога до електроприводу та допоміжного обладнання – це ніщо інше, як обмеження їх розмірів. Покращення масо-габаритних показників для громадського електротранспорту дуже важливе в першу чергу через сильний

вплив на міські комунікації, що можуть бути розміщені під трамвайними рейками. Велика вага рухомого складу викликає високий рівень вібрацій, а також протікання вихрових струмів у грунті у випадках, коли робоче заземлення виконується через рейки, що в свою чергу призводить до поступового руйнування цих самих комунікацій. Як приклад – труби водопостачання. Також підвищення маси вагонів призводить до суттєвого зростання шуму на вулицях міста. Ця проблема дуже важлива, тому ми маємо обмежувати вагу рухомого складу використанням більш сучасного обладнання або ж підвищенням складності амортизації вагонів, що проектуються. Вимогою до систем керування може бути їх повна автоматизація за рахунок використання мікропроцесорної техніки – перетворювачів частоти із використанням програмованих мікроконтролерів. Це також обов'язкова вимога через необхідність перетворення постійного струму мережі в змінний струм для двигунів та керування їх швидкістю та моментом. Використання більш складних алгоритмів керування призводить до підвищення коефіцієнту корисної дії. Така стратегія при проектуванні електропривода хоч і буде коштувати більше, але в майбутньому буде швидко окупатись.

При впровадженні в практику найсучасніших систем керування інженери, зазвичай, використовують лінійні системи автоматичного керування. Тобто, такі системи, параметри і характеристики яких не залежать ні від яких впливів, а рівняння, якими ці системи описуються, містять тільки лінійні компоненти. В реальності таких систем не існує. Всі системи управління і диференціальні рівняння, що їх описують, мають нелінійні компоненти. Ці нелінійні елементи наближають математичний опис систем до реальності, чого не можна здійснити лінійними рівняннями. Але у лінійних систем є одна велика перевага - вони мають точні рішення. А нелінійні рівняння або вирішуються дуже складно, або не вирішуються зовсім. Лінійні системи управління, і електроприводи зокрема, мають процеси, якість яких – стійкість, час перехідного процесу, величина

статичної і динамічної похибок не залежать від вхідних сигналів завдання і від зовнішніх впливів і збурень, оскільки визначаються тільки параметрами самої системи управління, отже, такі системи передбачувані і прогнозовані [16]. Для ідентифікації таких систем їх не треба тестувати сигналами різної амплітуди і частоти, вони не повинні допускати несподіваних режимів роботи і, тим більше, аварійних. Крім того, вони досить просто коригуються стандартними регуляторами і типовими зворотними зв'язками. Для нелінійних систем керування характерні інші закономірності. Нелінійні системи по-різному поводяться на різних швидкостях і при різних навантаженнях. Стійкі на номінальній швидкості - вони стають коливальними на малих і навпаки. Вони погано коригуються стандартними методами – ПІ, ПІД регулятори ведуть себе абсолютно непередбачувано.

З вищенаведеного можна зробити висновок, що при роботі з технічними системами краще мати справу з лінійними системами керування, або максимально наближеними до лінійних при збуреннях, які ця система відчуває.

В електроприводах є принципові нелінійності. Як приклад, це операція формування моменту – операція множення двох змінних функцій – струму і магнітного потоку. В асинхронних двигунах це періодичні функції, в результаті у такого приводу навіть механічна характеристика суто нелінійна. Ця нелінійність очевидна, вона випливає з формули Клосса і Т-подібної схеми заміщення, в якій є елемент, що залежить від ковзання. Таким чином, нелінійності асинхронних електроприводів відомі, але скорегувати їх простими засобами (такими як IR-, S-компенсації в перетворювачі частоти) не виходить. Привод стає неефективним. Для подолання цієї нелінійності і, відповідно, неефективності, в значній частині промислових перетворювачів частоти застосовується векторне керування, яке лінеаризує привод в окремих режимах, створює нові нелінійності системи електроприводу.

В теорії керування терміном лінеаризація, як правило, визначаються методики спрощення вихідних нелінійних систем, зведення їх до лінійних.

Асинхронні електроприводи в останні роки стали основними електроприводами в енергетиці, промисловості, на транспорті. З широким застосуванням перетворювачів частоти асинхронні електроприводи стали активно впроваджуватися в технічні області, які потребують якісного регулювання швидкості обертання – з діапазоном регулювання не менше, ніж 1:100.

Найбільший інтерес представляють перетворювачі частоти середнього техніко-економічного класу. Вони, з одного боку, мають відносно низьку вартість, що дозволяє широко застосовувати їх на підприємствах різного рівня (включаючи підприємства малого бізнесу), з іншого боку, мають широкий функціонал, що включає всі стандартні (досить добре відпрацьовані і перевірені) алгоритми керування (скалярний, векторний) для розімкнутих і замкнутих систем, що робить їх універсальними з точки зору застосування в різних технічних системах. Перетворювачі частоти зазначеного класу широко представлені компаніями Schneider Electric, Vacon, Danfoss та іншими. У зазначених перетворювачах частоти, як правило, реалізуються алгоритми скалярного керування з компенсаціями за струмом статора і бездатчикового векторного керування, без контуру регулювання потокозчеплення, що забезпечує деяке спрощення налагодження приводів, їх експлуатації і доступну ціну. Однак, ці алгоритми керування мають серйозні недоліки.

Скалярне керування, за якого регулюються частота і амплітуда статорної напруги, зберігає нелінійність механічних характеристик асинхронного двигуна і не може забезпечити точність підтримки швидкості більше, ніж 5% за значних змін моменту навантаження. Стандартні корекції (IR-, S- компенсації), що мають зменшити цю помилку, є неефективними, тому що порушують стійкість системи.

Векторне керування дозволяє наблизити асинхронний електропривод за характеристиками керування до приводів постійного струму, тобто до лінійних системам регулювання. Однак, на практиці, це керування не завжди

забезпечує стабільну роботу в широкому діапазоні регулювання швидкостей і зміни навантажень, оскільки алгоритми векторного керування неточні.

Найчастіше вимоги до електроприводів у механізмах, в яких застосовуються асинхронні електроприводи, такі, що дані недоліки виявляються несуттєвими. Однак, існує цілий ряд механізмів, в яких технологічні вимоги не виконуються при стандартних алгоритмах управління, закладених в ці перетворювачі, а техніко-економічні характеристики цих механізмів вимагають застосування асинхронних електроприводів з перетворювачами частоти переважно даного класу.

До таких приводів слід, перш за все, віднести електроприводи енергетичних комплексів. Зокрема, приводи циркуляційних насосів систем теплопостачання. Регулювання витрати теплоносія – суттєвий ресурс підвищення ефективності систем теплопостачання, оскільки кількість теплової енергії, що передається в мережу, пропорційно добутку витрат і температури теплоносія. Однак при стандартних алгоритмах управління, що реалізуються в перетворювачах частоти, призначених для насосів (наприклад, ATV61, ATV71, ATV630), внаслідок м'якої механічної характеристики, при зміні навантаження, витрата теплоносія, що подається цим насосом, може зменшуватися на 10% нижче необхідного, що призводить до аналогічної зміни кількості теплової енергії, що подається у мережу. У сучасних системах теплопостачання компенсування цих втрат проводиться за рахунок підвищення температури теплоносія, що призводить до великої перевитрати енергоресурсів. З іншого боку, збільшення швидкості обертання двигуна приводу насоса вище номінальної навіть на 2-3% (для збільшення витрати теплоносія), при стандартних алгоритмах управління, призводить до значного зростання статорних струмів і вимагає завищення потужності перетворювача частоти і двигуна, а, отже, великих витрат при модернізації існуючих систем теплопостачання

З аналогічними проблемами, такими як зростання статорних струмів, при збільшенні швидкості приводу з частотним керуванням доводилося

стикатися раніше розробникам такого приводу для самохідного вагона гірничої промисловості [17]. Вирішити проблему вдалося істотною зміною алгоритмів управління. Слід зазначити, що в енергетиці та транспорті часто доцільно застосовувати груповий електропривод [18]. Один перетворювач частоти повинен працювати з декількома електродвигунами, в той час дуже часто скалярне керування не забезпечує високу точність підтримки швидкості, а застосовувати векторне керування і DTC не рекомендується виробниками перетворювачів частоти. Для таких приводів і механізмів необхідні нові алгоритми управління.

Встановлення перетворювачів частоти на підйомно-транспортну техніку, як прийнято вважати, істотно підвищує її якість і вартість. Однак, за свідченням представників компаній, що виробляють баштові крани, при установці на привод повороту крана перетворювача частоти (Schneider Electric ATV71) з ПІ-регулятором швидкості, різко погіршується динаміка приводу, навіть у порівнянні з релейно-контакторною схемою керування. Представники компанії Schneider Electric не знайшли способу усунення цього явища.

У всіх зазначених вище приводах відсутні вимоги до високої точності підтримки заданої швидкості (вище 0,5-1% від номінального під навантаженням). Однак, в останні роки з'явилися промислові об'єкти, в яких уникнути цієї вимоги не можна. Прикладами таких об'єктів можуть бути лінії по обробці листових матеріалів (забарвлення, лакування, ламінування і т.і.). Основними вимогами до приводів таких технологічних ліній є регулювання швидкості в діапазоні не менше 1:100, висока точність підтримки статичної швидкості (не гірше ± 1%), мінімальні перехідні процеси при зміні моменту навантаження. У той же час встановлення давачів швидкості на таких лініях значно ускладнена, а застосування складних і дорогих слідкуючих приводів нерентабельно, так як ці лінії працюють найчастіше на підприємствах малого бізнесу, які не можуть дозволити собі великих капіталовкладень. Застосування стандартних алгоритмів управління, призводить до значних

перехідних процесів в швидкості при захопленні і відпуску листів і, як наслідок, до великого відсотка браку, пов'язаного з нерівномірністю нанесення покриття. Для цих механізмів потрібно істотно підвищити точність підтримки швидкості і зменшити час перехідних процесів.

Слід зазначити, що більшість цих проблем підтверджується при моделюванні і випробуванні електроприводів в лабораторних умовах, тобто їх причинами є не неякісне програмне забезпечення перетворювачів частоти, а принципові положення векторного управління; це ж підтверджують експериментальні дослідження, проведені за останні роки багатьма дослідниками. Для корекції таких систем найчастіше пропонують вводити додаткові пристрої спостереження зі спеціальними, досить складними, алгоритмами роботи. Відповідно до досвіду роботи з перетворювачами частоти різних компаній, більшість з них (Schneider Electric, Vacon, Danfoss), реалізують алгоритми векторного керування, дуже близькі до класичних, описаних в літературі. Більш досконалі перетворювачі частоти, (наприклад, деякі лінійки перетворювачів частоти компаній ABB, SIEMENS), забезпечують більш якісне регулювання, але істотно перевищують їх за ціною і той же час не вирішують усіх проблем векторного управління. З перетворювачів частоти першої групи, найбільш широке поширення в добувній галузі, енергетиці, інфраструктурі і на транспорті, отримало обладнання компанії Schneider Electric. Перетворювачі частоти цієї компанії мають широкий номенклатурний ряд, який постійно оновлюється, крім універсальних, випускаються спеціалізовані перетворювачі частоти, призначені для застосування на кранах, для управління насосами і т.і. Разом з тим, в цих перетворювачах частоти, алгоритми векторного керування (за своїми зовнішніми проявами, оскільки компаніями не розкриваються) дуже близькі до класичних, з усіма перевагами та недоліками. Оскільки в цих алгоритмах відсутні контури регулювання потокозчеплення, які необхідно налаштовувати під час підготовки до роботи, ці перетворювачі можна

вважати розімкнутими по відношенню до швидкості обертання двигуна або одноконтурні, при замиканні по швидкості обертання з ПІ-регулятором.

## 1.5 Особливості тягового електроприводу

Тягові електродвигуни відрізняються від звичайних ЕД високої потужності способами закріплення та обмеженому просторі для їх розміщення [19]. Через це вони мають дещо специфічну конструкцію – обмежені розміри, многогранні станини та спеціальні кріплення. Міські та залізничні тягові двигуни працюють у суворих погодних умовах, у вологому та запиленому повітрі. Тягові електродвигуни, на відміну від двигунів загального призначення, також працюють в різних режимах (короткочасний, повторно-короткочасний з частими запусками), що супроводжується великим діапазоном зміни швидкості обертання і струму навантаження. При відправленні з місця струм може перевищувати номінальний у 2 рази. Під час роботи тягових двигунів виникають часті механічні, теплові та електричні перевантаження, удари та поштовхи. Тому при розробці їх конструкцій вони забезпечують підвищену електричну та механічну міцність деталей і вузлів, теплостійку і вологостійку ізоляцію деталей і обмоток, а також стабільну комутацію двигунів. Крім того, тягові електродвигуни, що призначені для шахтних електровозів, повинні відповідати вимогам, що стосуються вибухобезпечного електрообладнання.

Тягові двигуни повинні мати властивості, що забезпечують високу тягу та енергетичні показники рухомого складу, як приклад – високий коефіцієнт корисної дії. Розвиток напівпровідникових технологій відкрив можливість переходу від двигунів з електромеханічною комутацією на безколекторні машини за допомогою напівпровідникових перетворювачів. Через складні умови праці та суворі загальні обмеження тягові двигуни називають машинами з обмеженим використанням.

Тягові двигуни класифікуються по виду струму, типу двигуна, типу підвіски, способу живлення, конструкції, режиму роботи, ступеню захисту, кліматичному виконанню та способу охолодження. Ці двигуни можуть бути як універсальними, тобто використовуватись на різних видах електротранспорту, так і спеціалізованими для одного певного виду транспорту. Це пов’язано з тим, експлуатаційні показники у різних галузях можуть бути суперечливими. Як приклад, приводи міського транспорту розраховані на високу перевантажувальну здатність, в той час як двигуни вантажних електровозів мають можливість реалізації тривалого режиму роботи з максимальною силою тяги. Зазвичай у тягових приводах використовуються знижуючі редуктори для суттєвого збільшення крутного моменту, але існують також безредукторні приводи. Двигуни, що використовуються на електротранспорті, можуть працювати як у рушійному режимі, так і в режимі генератора. Властивість оберненості двигунів використовується для електричного гальмування та рекуперації накопленої енергії.

Важливою вимогою є необхідність забезпечення плавного пуску для обмеження ривку при розгоні транспортного засобу. Як сказано вище, раніше це досягалось за рахунок реостатного регулювання, на сьогоднішній день для цього використовуються перетворювачі частоти з керуючими мікроконтролерами, в яких реалізовано певні алгоритми керування.

Для двигунів електротранспорту розрізняють два режими роботи:

- тривалий режим – при високому струмі якоря протягом необмеженого часу, але не викликаючим перегріву;
- короткочасний режим – з допустимим перевантаження при пуску, але не довше однієї години.

Для міського транспорту розрахунковим є короткочасний режим, у той час, як двигуни для електровозів розраховуються по тривалому режиму роботи.

## 1.6 Технічна реалізація алгоритмів керування ЕП

Для реалізації векторного або ж скалярного регулювання швидкості використовуються мікроконтролери, які розраховують потрібні значення напруги та подають сигнали на ключі інверторів, які в свою чергу змінний струм потрібної амплітуди та частоти. Для цього використовується широтно-імпульсна модуляція, принцип дії якої полягає в зміні тривалості імпульсів напруги при постійній частоті надходження імпульсів (скважності). У якості ключів використовуються транзистори, що працюють у ключовому режими, тобто частину періоду вони закриті, а частину – відкриті. В аналогових ШІМ-генераторах керуючий сигнал формується за рахунок порівняння компаратором на базі операційного підсилювача опорної та пилкоподібної напруги. Вихідні імпульси мають прямокутну форму та таку ж саму частоту, як і пилкоподібна напруга на вході компаратора. Цифрова ШІМ реалізується у двійковій системі мікропроцесорної техніки. Вони також працюють на сталій частоті, яка обов’язково повинна перевищувати час реакції керованого пристрою задля запобігання перервності струму, середнє значення якого буде визначатись відношенням тривалості періода до часу протікання струму через ключ.

Це все реалізується за рахунок використання частотних перетворювачів – пристроїв, призначених для перетворення змінного струму однієї частоти та амплітуди в змінний струм іншої частоти та амплітуди. Вихідна частота може бути як вище частоти напруги живлення, так і нижче її. Схема будь-якого перетворювача частоти складається з блоків живлення та керування. Частина блоку живлення зазвичай виготовляється на тиристорах або транзисторах, що працюють в режимі електронного ключа. Керуюча частина виконується на цифрових мікропроцесорах і дозволяє керувати потужними електронними ключами та вирішенням великої кількості допоміжних завдань, таких як моніторинг, діагностика та захист. Перетворювачі частоти можуть бути як з явно вираженою проміжною ланкою постійного струму, так

і без неї, тобто з безпосереднім зв’язком. Перервна синусоїда на виході перетворювача є джерелом вищих гармонік, які спричиняють додаткові втрати в електродвигуні, перегрівання електричної машини, зменшення крутного моменту, дуже сильні завади в мережі. Використання компенсуючих пристроїв призводить до збільшення вартості, ваги, габаритів, зниження ефективності системи в цілому.

У сучасних приводах з частотним керуванням найчастіше використовують перетворювачі частоти з вираженою ланкою постійного струму. У перетворювачах частоти цього класу використовується подвійне перетворення електроенергії: вхідна синусоїдальна напруга з постійною амплітудою і частотою випрямляється випрямлячем, фільтрується, а потім інвертором перетворюється у змінну напруга змінної частоти і амплітуди. Подвійне перетворення енергії призводить до зниження ефективності та певного погіршення габаритних розмірів порівняно з перетворювачами з безпосереднім зв’язком. Для генерації синусоїдальної змінної напруги використовуються автономні інвертори напруги та автономні інвертори струму. Основна перевага тиристорних перетворювачів частоти – це можливість працювати з високими струмами і напругами, одночасно витримуючи тривале навантаження імпульсного характеру.

Тиристор є напівкерованим приладом, тобто для його включення досить подати короткий імпульс на керуючий електрод, але для виключення необхідно або прикласти до нього зворотну напругу, або знизити комутований струм до нуля. Для цього в тиристорному перетворювачі частоти потрібна складна і громіздка система керування. Біполярні транзистори з ізольованим затвором відрізняються від тиристорів повною керованістю, простою менш ергоємнісною системою керування, вищою робочою частотою. Внаслідок цього перетворювачі частоти на IGBT дозволяють розширити діапазон керування швидкості обертання двигуна, підвищити швидкодію приводу в цілому. Для асинхронного електроприводу

з векторним керуванням перетворювачі на IGBT дозволяють працювати на низьких швидкостях без давача зворотного зв'язку.

Застосування IGBT з більш високою частотою перемикання в сукупності з мікропроцесорною системою керування в частотних перетворювачах знижує рівень вищих гармонік, характерних для тиристорних перетворювачів. Як наслідок, менші додаткові втрати в обмотках і магнітопроводі електродвигуна, зменшення нагрівання електричної машини, зниження пульсацій моменту і виключення так званого «крокування» ротора в області малих частот. Знижуються втрати в трансформаторах, конденсаторних батареях, збільшується термін їх служби та ізоляції проводів, зменшуються кількість помилкових спрацьовувань пристроїв захисту і похибки індукційних вимірювальних приладів. Частотні перетворювачі на транзисторах IGBT в порівнянні з тиристорними перетворювачами при однаковій вихідній потужності відрізняються меншими габаритами, масою, підвищеною надійністю за рахунок модульного виконання електронних ключів, кращого тепловідведення з поверхні модуля і меншої кількості конструктивних елементів. Вони дозволяють реалізувати більш повний захист від стрибків струму та від перенапруги, що істотно знижує ймовірність пошкоджень електроприводу.

На даний момент низьковольтні перетворювачі на IGBT мають більш високу ціну на одиницю вихідної потужності, внаслідок відносної складності виготовлення транзисторних модулів. Однак по співвідношенню ціна/якість, виходячи з перерахованих переваг, вони явно виграють у тиристорних. Крім того, протягом останніх років спостерігається поступове зниження цін на IGBT модулі. Головною перешкодою на шляху їх використання у високовольтному приводі з прямим перетворенням частоти при великих потужностях на даний момент є технологічні обмеження. Збільшення комутованої напруги і робочого струму приводить до збільшення розмірів транзисторних модулів, а також вимагає більш ефективного відводу тепла від кремнієвого кристалу.

Нові технології виробництва біполярних транзисторів спрямовані на подолання цих обмежень, і перспективність використання IGBT дуже висока також і в високовольтному приводі. В даний час IGBT транзистори застосовуються в високовольтних перетворювачах у вигляді послідовно з'єднаних декількох одиничних модулів.

## 1.7 Особливості рейкового міського транспорту

Кожне велике по кількості населення місто потребує наявності розвиненої системи громадського транспорту. Найбільшу ефективність перевезення великої кількості людей має рейковий транспорт - такий як метро, швидкісний та звичайний трамвай. Цей транспорт має найбільшу пропускну здатність у порівнянні з іншими видами транспорту, наприклад автобуси або тролейбуси, за рахунок високої швидкості та пасажиромісткості. Можливість зчіплювати вагони до поїздів сприяє підвищенню ефективності використання міських територій. Кількість вагонів у складі поїзда обмежується лише будівельними параметрами лінії, що дозволяє трамвайним потягам досягати довжини, порівнянної з довжиною поїздів метрополітену, однак, у випадку трамваїв, найчастіше експлуатуються поїзда з двох-трьох вагонів. Місткість вагонів, як правило, вище, ніж у автобусів і тролейбусів. Оптимальне завантаження автобусної або тролейбусної лінії - до 3-4 тис. пасажирів на годину, «класичного» трамвая - до 15 тисяч пасажирів на годину, але в певних умовах і більше, та до 80 тисяч у метро. За рахунок того, що потяги рухаються на електричній тязі, вони мають невисоку собівартість перевезень. Лінії швидкісного трамваю та метро досягають своєї високої перевізної здатності також за рахунок великої швидкості, що досягається завдяки відсторонення від пішохідних зон та іншого транспорту, створюється так звана ізольована система. Одною з переваг рейкового міського транспорту є його

екологічність, що викликана використанням електроенергії та відсутністю шкідливих викидів.

Серед недоліків рейкового транспорту слід зауважити потребу у власній інфраструктурі. Трамвайні лінії, а особливо лінії метро, мають великі затрати на будівництво самих колій, а також підстанцій і у випадку з метро – вентиляційних вузлів. Все це не потребується для автобусів або ж тролейбусів. Також зміна маршруту може відбутися лише за рахунок будівництва новий ліній чи перенесення старих, тому рейковий транспорт володіє низькою гнучкістю. Розміщення трамвайних колій потребує виділення земельних ділянок та ускладнює рух автомобільного транспорту.

На сьогоднішній день для великих міст рейковий транспорт є незамінним і його розробка є дуже перспективною, не дивлячись на усі його недоліки та витрати. Саме тому варто займатись розробкою нових, більш економічних та комфортних рухомих одиниць, а також модернізацією старих уже наявних. Серед основних способів підвищення ефективності трамваїв або метро є розробка нових технологій для більш простого та економічного будівництва ліній та сучасних керованих електроприводів змінного струму, що мають високу енергоефективність. Це хоч і вимагає певних витрат, але вони повністю окупаються.

# 2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТРІБНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

## 2.1 Розрахунок потужності

У першу чергу визначається зусилля, що потрібне для приведення трамваю у рух [20]. Для цього ми використаємо як приклад 5-ти секційний трамвай з 4 ведучими осями Електрон Т5В64, його маса складає 35000кг. Далі розрахуємо масу заповненого вагона. Знаючи максимальну кількість пасажирів, а це – 287 чоловік, розрахуємо повну масу нашого трамваю. Приймаємо середню вагу однієї людини в одязі і з пакунками як 80 кг. Тоді споряджена маса трамваю визначається наступним чином:

$$m_{\text{СП}} = m_{\text{ТР}} + \left(m_{\text{Л}} \cdot n_{\text{Л}}\right) = 35000 + \left(80 \cdot 287\right) = 57960 \text{ кг}, \quad (2.1)$$

де $m_{\text{СП}}$ – споряджена маса; кг

$m_{\text{ТР}}$ – маса вагону;

$m_{\text{Л}}$ – маса однієї людини;

$n_{\text{Л}}$ – кількість людей.

Приймаємо середнє прискорення – 1,2 м/с$^2$, тоді

$$F = \frac{\left(1+\gamma\right) m_{\text{СП}} a_{\text{У СР}}}{z} = \frac{1.12 \cdot 57960 \cdot 1.2}{4} = 19474 \text{ Н}, \quad (2.2)$$

де $\left(1+\gamma\right)$ - коефіцієнт інерції обертових частин; $\left(1+\gamma\right) = 1.12$;

$a_{\text{У СР}}$ - середнє встановлене прискорення; $a_{\text{У СР}} = 1.2$ м/с$^2$;

$m_{\text{СП}}$ - споряджена маса трамваю; $m_{\text{СП}} = 57$ т;

$z$ – кількість тягових електродвигунів; $z$=4.

Попередня пускова потужність двигуна трамваю:

$$P = \frac{F v_x}{\eta} = \frac{19474 \cdot 17}{0.879} = 376641 \text{ Вт}, \quad (2.3)$$

де $v_x$ - швидкість виходу двигуна на природну характеристику; $v_x = 17$ м/с;

$\eta$ - загальний ККД передачі трамваю

$$\eta = \eta_{\text{М}}\eta_{\text{Р}}\eta_{\text{ЕЛ}} = 0.95 \cdot 0.93 \cdot 0.995 = 0.879, \qquad (2.4)$$

В формулі (2.4) $\eta_{\text{М}}$ – ККД карданного шарніру; $\eta_{\text{М}} = 0.95$;

$\eta_{\text{Р}}$ - ККД редуктора; $\eta_{\text{Р}} = 0.93$;

$\eta_{\text{ЕЛ}}$ - ККД електричної передачі; $\eta_{\text{ЕЛ}} = 0.995$.

Варто відмітити, що номінальна потужність тягового електродвигуна завдяки його перевантажувальній здатності зазвичай у 3 рази менша ніж пускова потужність у випадку із двигуном змінного струму. Отже, номінальна потужність двигуна буде розраховуватись наступним чином:

$$P = \frac{P_{\text{Д}}}{k_{\text{ПЕР}}} = \frac{376641}{3} = 125547, \qquad (2.5)$$

де $k_{\text{ПЕР}}$ - коефіцієнт перевантажувальної здатності двигуна; $k_{\text{ПЕР}} = 3$

Обираємо асинхронний двигун 4А280М4У3, який має такі параметри [21]:

- Номінальна потужність: $P_N$ = 132 кВт,
- Номінальна напруга: $U_N$ = 380 В,
- Число пар полюсів: $p_n = 2$,
- Активний опір статора: $R_1 = 0.0188$ Ом,
- Активний опір ротора $R_2 = 0.0154$ Ом,
- Індуктивність статора $L_1 = 0.0134$ Гн,
- Індуктивність ротора: $L_2 = 0.0135$ Гн,
- Взаємоіндуктивність $L_{12} = 0.0131$ Гн.

## 2.2 Розрахункові дані для моделювання електромеханічних процесів електропривода

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.1593 \text{ рад/с}. \qquad (2.6)$$

Швидкість ідеального неробочого ходу двигуна:

$$\omega_{НХ} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157.0796 \text{ рад/с.} \quad (2.7)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{НХ}(1 - s_n) = 157.0796 \cdot (1 - 0.023) = 153.4668 \text{ рад/с.} \quad (2.8)$$

або в обертах за секунду:

$$n_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{153.46}{6.28} = 24.43 \text{ об/с.} \quad (2.9)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{132000}{153.4668} = 860.1209 \text{ Нм.} \quad (2.10)$$

Швидкість трамваю при номінальній частоті обертання:

$$v_n = \frac{n_n}{K_p} П = \frac{24.43}{7.36} \cdot 2.2 = 7.3 \text{м/с} = 26.28 \text{км/год}, \quad (2.11)$$

де $K_p$ - передатне число редуктора; $K_p = 7.36$;

$П$ – периметр колеса:

$$П = \pi D = 3.14 \cdot 0.7 = 2.2 \text{ м}, \quad (2.12)$$

де $D$ – діаметр колеса, $D$=0,7 м.

Частота обертання двигуна при максимальній швидкості трамваю:

$$\omega_{max} = \omega_n \frac{v_{max}}{v_n} = 153.46 \frac{70}{26.28} = 408.75 \text{ рад/с}, \quad (2.13)$$

де $v_{max}$ – максимальна швидкість трамваю $v_{max}$=70 км/год;

Приведене значення моменту інерції порожнього вагону $m_{ТР}$=35000 кг:

$$J_П = m_{ТР} \frac{v_n^2}{\omega_n^2} = 35000 \frac{7.3^2}{153.46^2} = 79.19 \text{ кг/м}^2, \quad (2.14)$$

З врахуванням моменту інерції самого двигуна, приведене значення моменту інерції порожнього вагону на кожний двигун складає:

$$J'_П \approx 20 \text{ кг/м}^2, \quad (2.15)$$

приведене значення моменту інерції завантаженого вагону, $m_{СП}$ =57960 кг:

$$J'_{\text{П}} \approx 33 \text{ кг/м}^2 . \quad (2.16)$$

Момент двигуна, який відповідає тяговій силі вагону масою 35000 кг:

$$M_{\text{Т}} = \frac{35000 \cdot D}{2 \cdot z \cdot K_p} = \frac{35000 \cdot 0.7}{2 \cdot 4 \cdot 7.36} = 416.1 \text{кг} \cdot \text{м}. \quad (2.17)$$

Максимальне прискорення порожнього вагону

$$a = 1.8 \text{м/с}^2 . \quad (2.18)$$

Момент опору двигуна при русі завантаженого трамваю на підйом нахилом 9%:

$$F_C = m_{\text{СП}} \cdot 0.09 = 5216.4 \text{кг} = 51120.72 \text{Н}, \quad (2.19)$$

$$M_C = F_C \cdot \frac{D}{2 \cdot z \cdot K_p} = 51120.72 \cdot \frac{0.7}{2 \cdot 4 \cdot 7.36} = 607.753 \text{ Нм}. \quad (2.20)$$

## 2.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна

Математична модель АД отримана для Т-подібної схеми заміщення, що показана на рисунку 2.1, в той час як приведені параметри із каталогу відповідають Г-подібній схемі заміщення, на рисунку 2.2. Перерахунок параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну проводиться наступним чином.

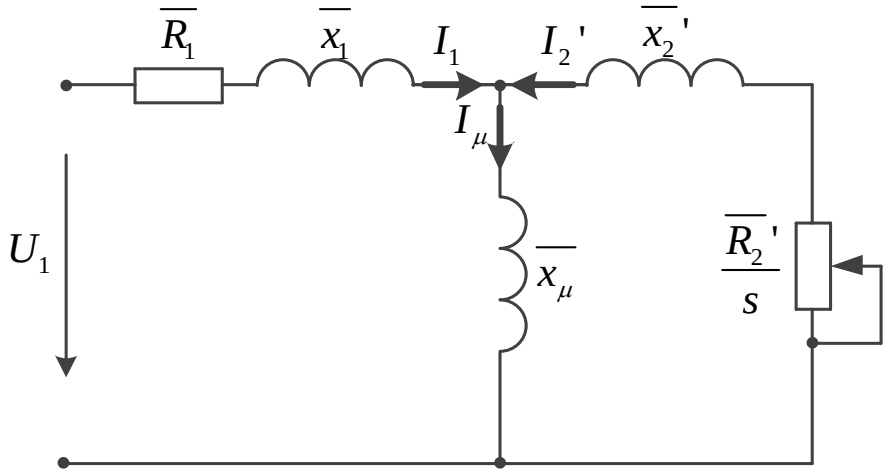


Рисунок 2.1 Т-подібна схема заміщення АД

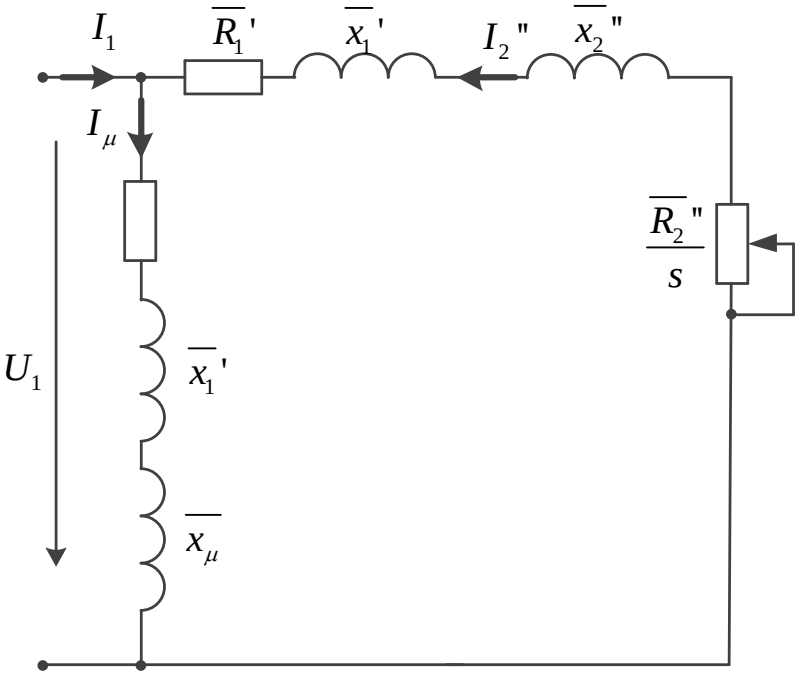


Рисунок 2.2 Г-подібна схема заміщення АД

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення [22]:

$$c_1 = \frac{\overline{x}_\mu + \sqrt{\overline{x}_\mu^2 + 4\overline{x}_1'\overline{x}_\mu}}{2\overline{x}_\mu} = \frac{4.5 + \sqrt{4.5^2 + 4 \cdot 0.115 \cdot 2.1}}{2 \cdot 4.5} = 1.0249.$$

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення подано, як у [1].

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\overline{x}_1 = \frac{\overline{x}_1'}{c_1} = \frac{0.076}{1.0249} = 0.0734, \ \overline{R}_1 = \frac{\overline{R}_1'}{c_1} = \frac{0.098}{1.0249} = 0.0205,$$

$$\overline{x}_2' = \frac{\overline{x}_2''}{c_1^2} = \frac{0.13}{1.0249^2} = 0.1214, \ \overline{R}_2' = \frac{\overline{R}_2''}{c_1^2} = \frac{0.06}{1.0249^2} = 0.0171.$$

Отримаємо значення параметрів Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях:

$$x_1 = \overline{x}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0734 \frac{220}{239.6096} = 0.1027 \text{ Ом},$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0205 \frac{220}{239.6096} = 0.0188 \text{ Ом},$$

$$x_2' = \bar{x}_2' \frac{U_n}{I_n} = 0.1214 \frac{220}{239.6096} = 0.1307 \text{ Ом},$$

$$R_2 = \bar{R}_2' \frac{U_n}{I_n} = 0.0171 \frac{220}{239.6096} = 0.0157 \text{ Ом},$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \frac{U_n}{I_n} = 4.5 \frac{220}{239.6096} = 4.1203 \text{ Ом}.$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.1027}{314} = 0.00032702 \text{ Гн},$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_0} = \frac{0.1307}{314} = 0.00041617 \text{ Гн}.$$

Індуктивність контуру намагнічування:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{4.1203}{314} = 0.0131 \text{ Гн}.$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.0131 + 0.00032702 = 0.0134 \text{ Гн},$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.0131 + 0.00041617 = 0.0135 \text{ Гн}.$$

На основі проведених розрахунків обчислюємо значення параметрів $\alpha$, $\alpha_1$, $\beta$, $\gamma$, $\sigma$, $\mu_1$:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.0157}{0.0135} = 1.162 \text{ Ом/Гн},$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.0188}{0.0134} = 1.402 \text{ Ом/Гн},$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^{\,2}}{L_1 \cdot L_2}\right) = 0,0134 \left(1 - \frac{(0,0131)^2}{0,0134 \cdot 0,0135}\right) = 0,000696 \text{ Гн},$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0,0131}{0,0135 \cdot 0,000696} = 1394.21 \text{ 1/Гн},$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.0188}{0,000696} + 1.402 \cdot 0,0131 \cdot 1394.21 = 52.61 \text{ Ом/Гн}$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,0131}{0,0135} = 1,455 .$$

Висновок по розділу 2

У данному розділі було розраховано зусилля, яке потрібно подолати двигунам трамвая, що розраховується. Після цього отримано потужність одного з чотирьох двигунів та проведено його вибір. В результаті було обрано двигун 4А280М4У3. Розраховано моменти інерції та опору рухомого складу. Також було розраховано параметри двигуна, що будуть використані у наступних розділах для проведення моделювання.

# 3 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ. ОПИС СИЛОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

## 3.1 Розрахунок автономного інвертора напруги

Амплітудне значення струму статора:

$$I_{na} = \sqrt{2} I_n = \sqrt{2} \cdot 239.6096 = 338.8592 \quad (3.1)$$

Прийнявши перевантажувальну здатність для підйомника $k_{ovl} = 1,5$ розрахуємо максимальний струм на виході перетворювача

$$I_{max} = k_{ovl} \cdot I_{na} = 1,5 \cdot 239,6096 = 359.4144 \text{ А}. \quad (3.2)$$

Вибір IGBT здійснюється за критерієм

$$I_C > I_{max}, U_{cemax} > U_{ce}, \quad (3.3)$$

де $I_C$ та $U_{cemax}$ – відповідно тривалий струм колектора та напруга колектор-емітер, які вказані в паспортних даних IGBT. Обов'язковою є умова наявності антипаралельного діода, який в більшості випадків є вбудованим в один корпус із транзистором і не потребує окремого розрахунку. Вибираємо по каталогу [23] IGBT модуль типу IRG5U400SD12B з параметрами $U_{ce} = 1200$ В, $I_C = 400$ А.

## 3.2 Розрахунок зарядного кола для заряду конденсаторів фільтра

При ввімкненні перетворювача необхідно забезпечити заряд конденсаторів фільтра з обмеженим струмом. Для цього включимо в ланку постійного струму резистор з шунтуючим ключем. Схема керування реле представлена на рисунку 3.1 *а*.

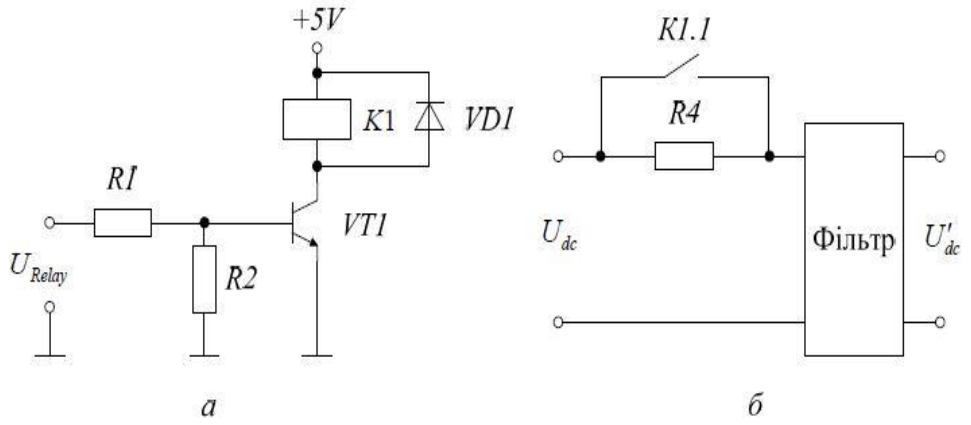


Рисунок 3.1 Зарядне коло конденсаторів фільтра

Опір зарядного резистора дорівнює:

$$R_4 = \frac{U_{dcn}}{I_{cmax}} = \frac{1200}{400} = 3 \text{ Ом.} \quad (3.4)$$

По напрузі $U_{\text{КЕ}}$ та по максимальному струму колектора, що відповідає пусковому струму реле $I_{Kmax} = I_{\text{РЕЛЕ ПУСК}}$, з каталогу вибирається транзистор BSP52 [24] з параметрами $U_{co} = 80$ В, $I_c = 1000$ мА.

Реле К1 обирається залежно від струму в ланці постійного струму $I_{dc} = 410.256$ А.

## 3.3 Ємнісний фільтр

Для зниження пульсацій лінійного струму, а також для захисту схеми від перенапруг контактної мережі служить індуктивно-ємнісний фільтр, що складається з індуктивності LF і батареї конденсаторів CA-CB.

Параметри індуктивності:

- величина індуктивності – 1 мГн;
- струм тривалого режиму – 500 А.

Параметри батареї конденсаторів:

- загальна встановлена ємність батареї – 2200 мкФ;
- максимально допустима напруга батареї – 2200 В;

- подвійна амплітуда пульсацій напруги – 50 В;
- частота пульсацій – 1 кГц.

Батарея зібрана з конденсаторів типу E50.R23-115N10 з наступними параметрами:

- номінальна ємність конденсатора – 1100 мкФ;
- номінальна напруга – 1100 В.

Кожен конденсатор батареї зашунтовано резистором величиною 40 кОм, потужністю 10 Вт.

## 3.4 Розрахунок параметрів баластного опору

Визначаємо опір $R_{\text{В}} = 2$ Ом.

Максимальний струм баластного опору - 450 А.

Потужність баластного опору - 34 кВт.

Зазначена потужність визначена, як:

$$P = \frac{R_{\text{В}}}{T} \int_0^T I_R^2 dt \qquad (3.5)$$

де $I_R$ - струм резистора в режимі динамічного гальмування; $T$ - час динамічного гальмування.

Для відводу потужності баластного резистора останній повинен бути сконструйований з вентилятором примусового обдування.

## 3.5 Розрахунок датчиків струму та напруги

Вибір датчиків струму здійснюють за максимальним струмом, який необхідно вимірювати, тобто щоб вимірюваний діапазон датчика був більшим від максимально допустимого струму в системі. Для вимірювання струмів на виході перетворювача для вибору використовують значення максимального струму.

Вибір датчика струму може бути здійснений на сайті по розрахованому значенню струму $I_{dc}$ . Виходячи з цього, вибираємо датчик струму типу HCS-K5-300A [25].

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика типу LV-25 P.

В документації на датчик вказано, що максимальний струм первинного кола $I_{pmax} = 14$ мА. Тому значення опору резистора $R_1$ дорівнює:

$$R_1 = \frac{U_{dcmax}}{I_{pmax}} = \frac{750}{0.014} = 53571 \text{ Ом.} \quad (3.6)$$

Зі стандартного ряду резисторів вибираємо $R_1 = 56$ кОм.

## 3.6 Опис силової схеми електропривода

Типова функціональна схема сучасного електроприводу змінного струму, побудованого на основі перетворювача частоти з ланкою постійного струму, показана на рисунку 3.2. Основу асинхронного електроприводу складає перетворювач частоти, який поєднує в собі перетворювальний та керуючий пристрій з класичного визначення електроприводу.

Стандартно перетворювач розділяють на дві основні складові:

- 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;
- керуючий контролер, до якого входять власне цифровий контролер, який, як правило, базується на цифровому сигнальному процесорі, та схеми узгодження сигналів.

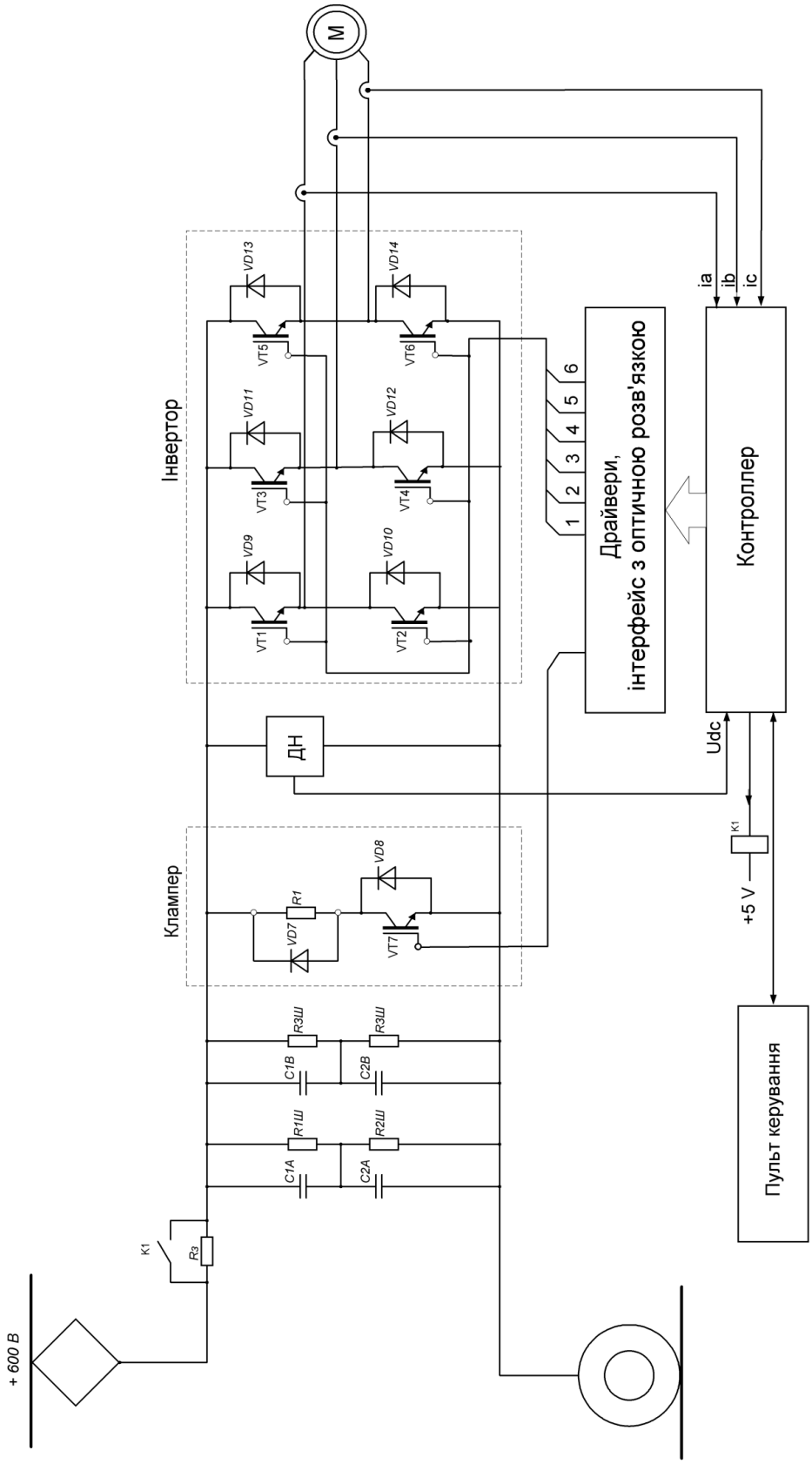


Рисунок 3.2 Функціональна схема електропривода трамвая

На даній схемі показано коло керування одним двигуном. Для решти двигунів будуть використовуватися свої окремі IGBT модулі, сигнали керування яких будуть отримуватися з одного контролера. З таким розподілом елементів ми можемо обрати ключі на значно менші струми, але самих ключів буде більше – на кожний двигун по 6 таких модулів. В першу чергу ми отримаємо змогу більш ефективного охолодження нашого перетворювача частоти, так як він буде не один на 4 двигуни, а розділений на 4 менші підсистеми, які можна буде охолоджувати окремо один від одного. Для отримання значення швидкості ми можемо встановити енкодер лише на один з двигунів. Це зумовлено тим, що всі вони будуть керуватися одним алгоритмом. Значення швидкості буде використовуватись лише для візуального відображення з метою її контролю, в алгоритмі керування, який ми використовуємо, сигнал з давача швидкості не потрібен.

Висновок по розділу 3

В цьому розіділі було проведено розрахунок та вибір таких силових елементів для перетворювача частоти, як: IGBT модулі, ємності та індуктивності для фільтрів напруги, баласний опір, а також давачі струму та на напруги. Було побудовано функціональну схему електропривода та проведено опис її роботи.

# 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

У даному розділі проведено дослідження статичних та динамічних режимів ЕМС шляхом моделювання у програмному середовищі Matlab/Simulink. Було проведено два досліди – розгін, підтримання швидкості та гальмування порожнього вагону, а також компенсація моменту навантаження при зупинці на схилі крутизною 9%. Для моделювання була використана стандартна модель асинхронного двигуна з прямим керуванням моментом із SimPowerSystem з певними модифікаціями для моделювання трамвайного приводу. Загальний вигляд схеми керування представлено на рисунку 4.1.

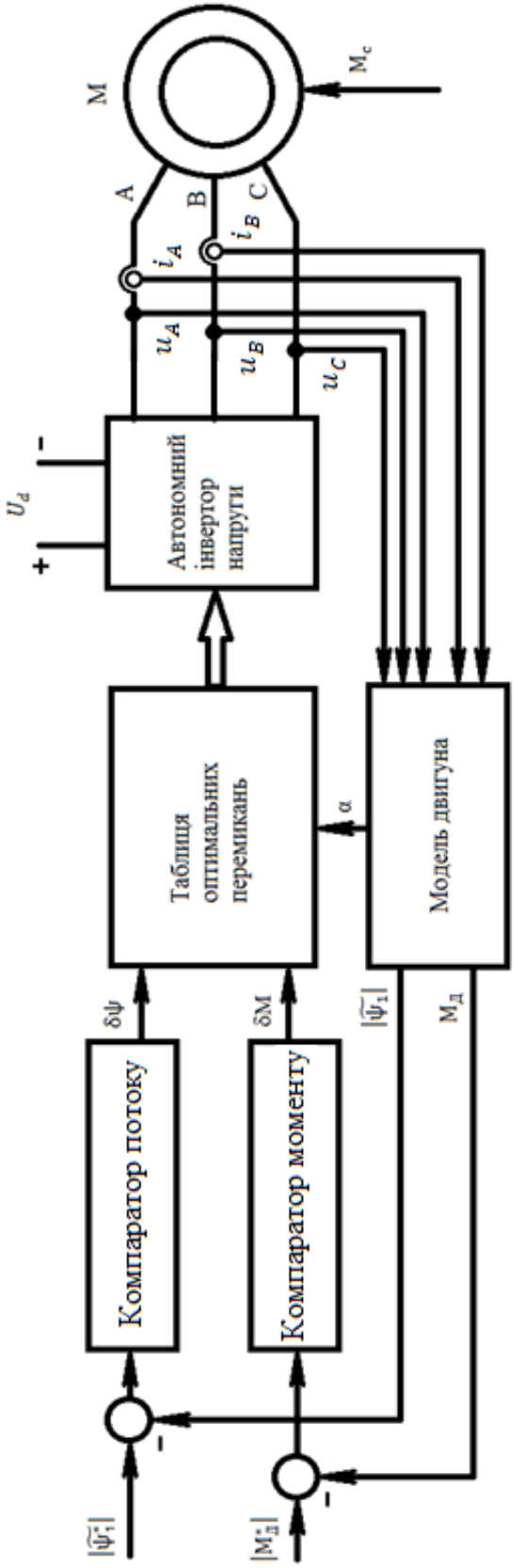


Рисунок 4.1 – Структурна схема керування приводом трамваю

## 4.1 Дослідження перехідних процесів при розгоні порожнього вагону

У першому досліді було виконано накидання та скидання рушійного моменту значенням 400 Нм для розгону, подальше підтримання швидкості та наступне гальмування противмиканням. Розгін проводиться з початку моделювання, тобто з 0 секунди, та закінчується на 8 секунді. З 8 по 10 секунду спочатку підтримується стале значення швидкості рушійним моментом 25 Нм, який на 9 секунді скидається зовсім. Після цього на 10 секунді застосовується електричне гальмування, а через 8 секунд швидкість спадає до нуля. На отриманих нижче графіках можна побачити графіки кутової швидкості обертання ротора двигуна та лінійної швидкості порожнього трамвайного вагону, моменту двигуна та його струму.

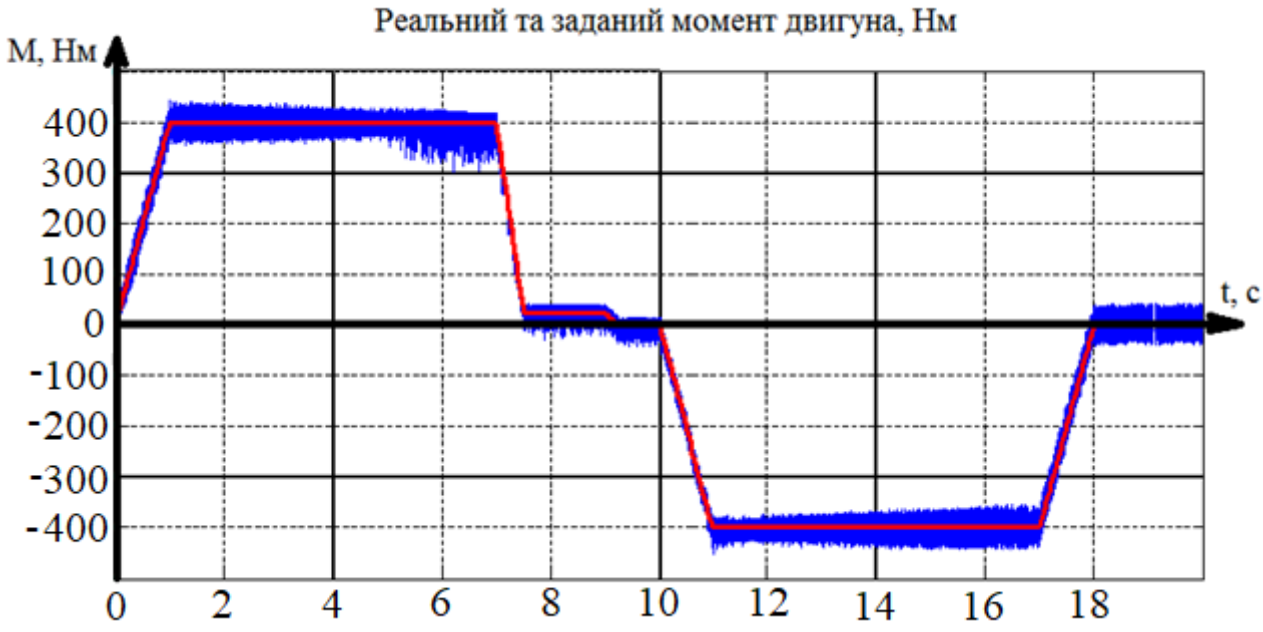


Рисунок 4.2 – Графік заданого та реального моменту

З рисунка 4.2 можна побачити, що реальний момент двигуна (синій графік) має дуже сильні коливання, амплітуда яких у деяких місцях досягає 25% значення самого моменту. Пульсації механічного моменту можуть призвести до швидшого старіння обертових частин, що у свою чергу

призведе до потреби більш частого проведення технічних оглядів, а в гіршому випадку – заміну деталей. Нижче на рисунках 4.3 та 4.4 представлено графіки наростання швидкості та гальмування для кутової швидкості ротора двигуна та лінійної швидкості безпосередньо самого трамвайного вагону. Оскільки ці дві величини прямопропорційні одна одній графіки, відповідно, будуть мати однакову форму.

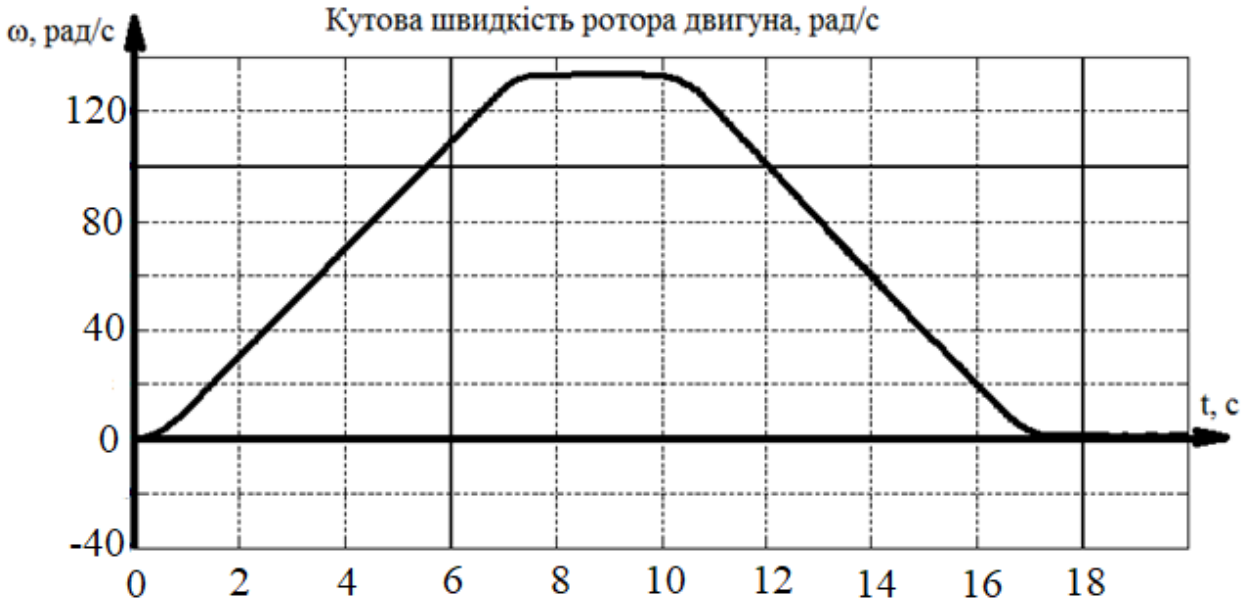


Рисунок 4.3 – Залежність кутової швидкості обертання ротора двигуна від часу

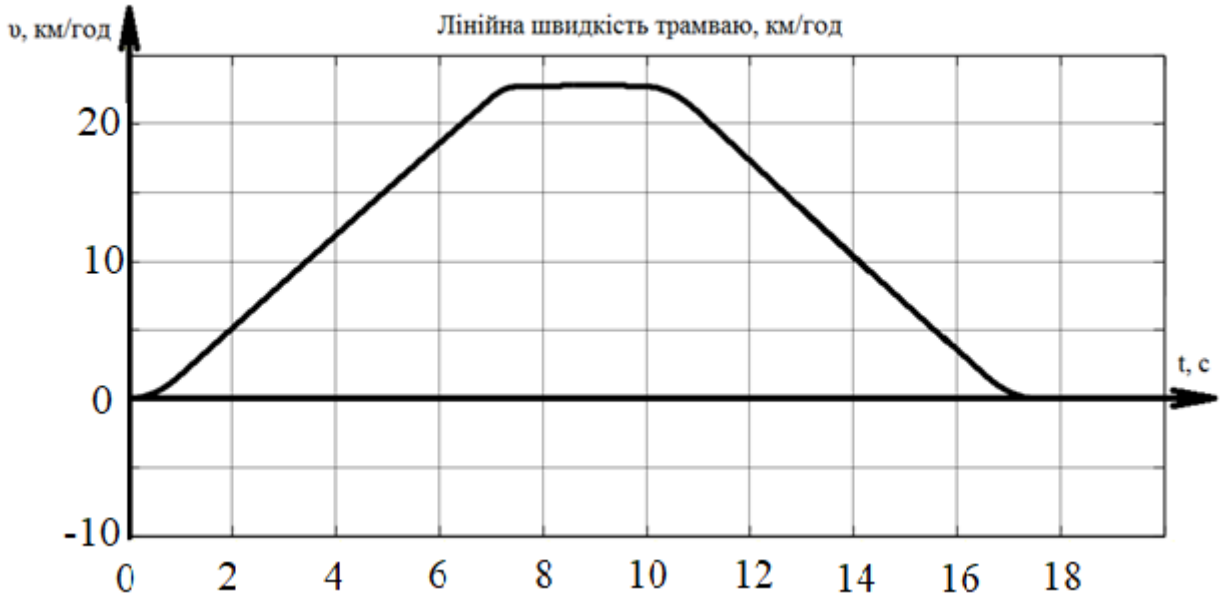


Рисунок 4.4 – Залежність лінійної швидкості вагону трамвая від часу

За результатами отриманих тахограм ми можемо побачити, що графіки швидкостей мають траєкторії другого порядку через те, що момент накидається не миттєво, а поступово. Це зроблено для імітації поступового натискання на важіль тяги.

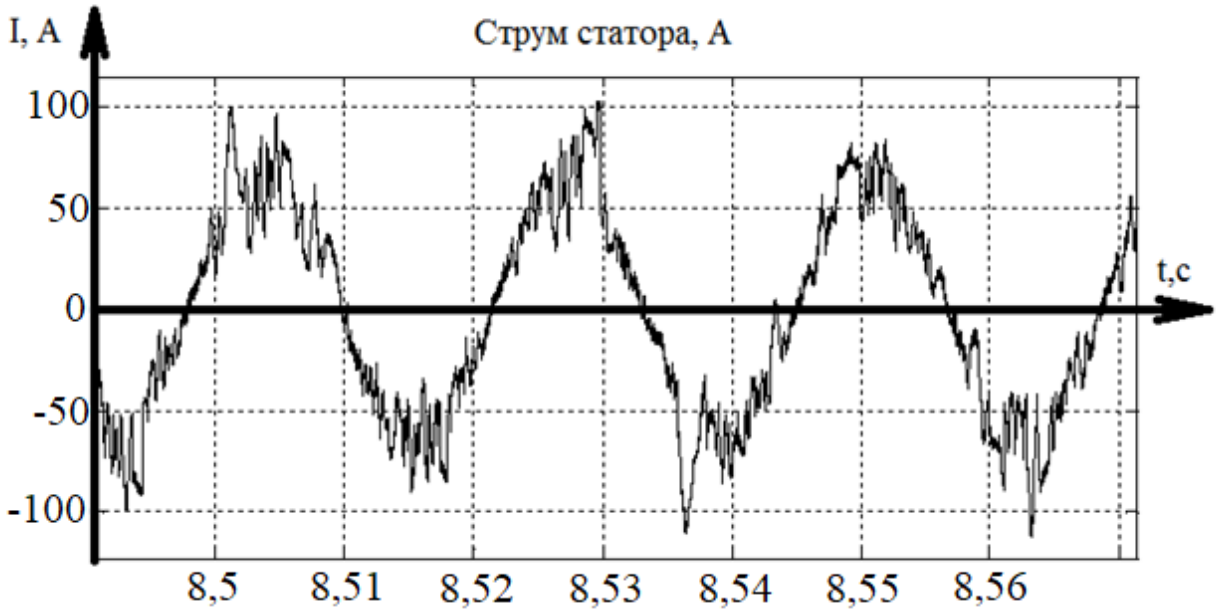


Рисунок 4.5 – Струм статора при роботі на статичній швидкості

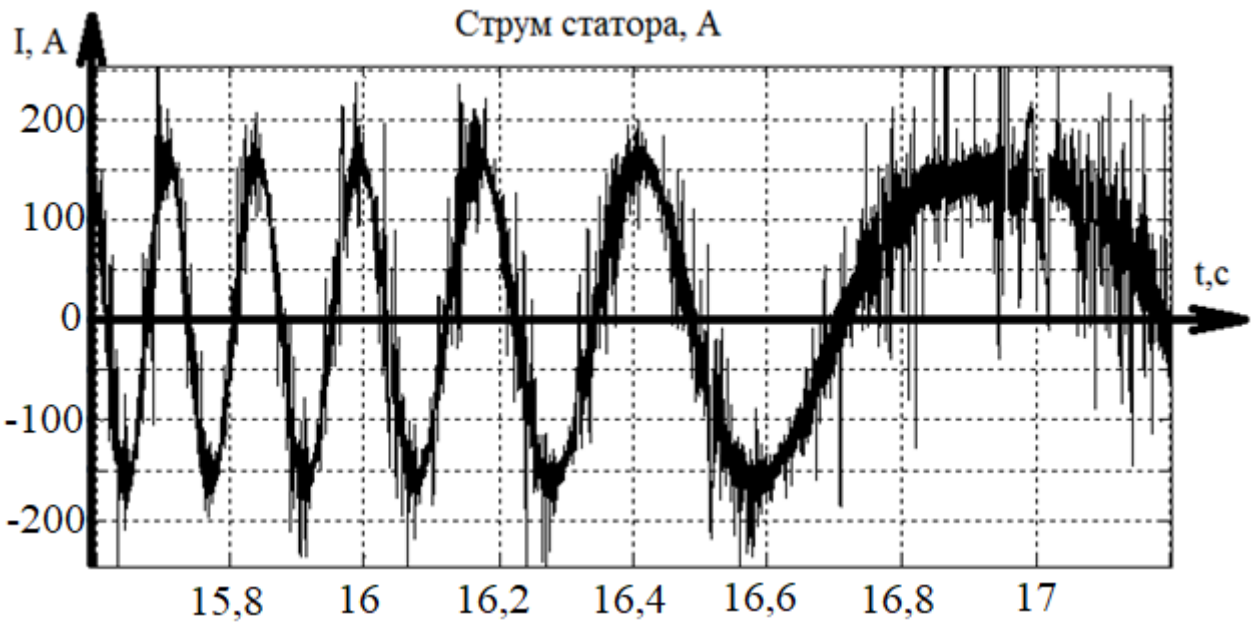


Рисунок 4.6 – Струм статора при зупинці трамвая

З рисунків 4.5 і 4.6 можна побачити, що середнє значення амплітуди струму під час статичної роботи з невеликим значенням моменту для компенсації сил тертя дорівнює приблизно 60 амперам. Під час гальмування амплітуда вже значно більша і дорівнює 160 ампер, також можна побачити поступове зменшення частоти струму. З цих графіків вже дуже сильно видно «рваність» форми струму, що і призводить до сильних коливань моменту описаних вище. У деяких місцях присутні значні стрибки миттєвого значення та суттєве спотворення форми. Це призведе до збільшення електричних втрат через надмірний нагрів обмоток та втрат у магнітопроводі машини. Усунути дану проблему можна за рахунок використання фільтра.

## 4.2 Дослідження перехідних процесів при розгоні та скиданні моменту тяги

У другому досліді буде імітовано розгін трамвайного вагону та його подальший рух у режимі вільного вибігу. Вільний вибіг досягається за рахунок відсутності моменту тяги та наявності достатнього значення лінійної швидкості. При цьому накопичена при розгоні кінетична енергія

вивільняється у вигляді інерції, за рахунок чого трамвай і продовжує свій рух з невеликим сповільненням, що спричинено дією сил тертя. У самому досліді під дією моменту значенням 1000 Нм вагон буде розганятися до 25 км/год після чого момент знімається. На рисунках 4.7-4.11 представлено графіки зміни моменту, швидкості, струму статора та потокозчеплення.

Рисунок 4.7 – Реальний та заданий момент двигуна

На представлених результатах можна побачити, що заданий момент як і у попередньому досліді відпрацьовується по заданій траєкторії, але має при цьому певні коливання, які присутні навіть коли момент скидається. Нижче на рисунку 4.8 можна побачити, що двигун розганяється до своєї номінальної кутової швидкості – 150 рад/с.

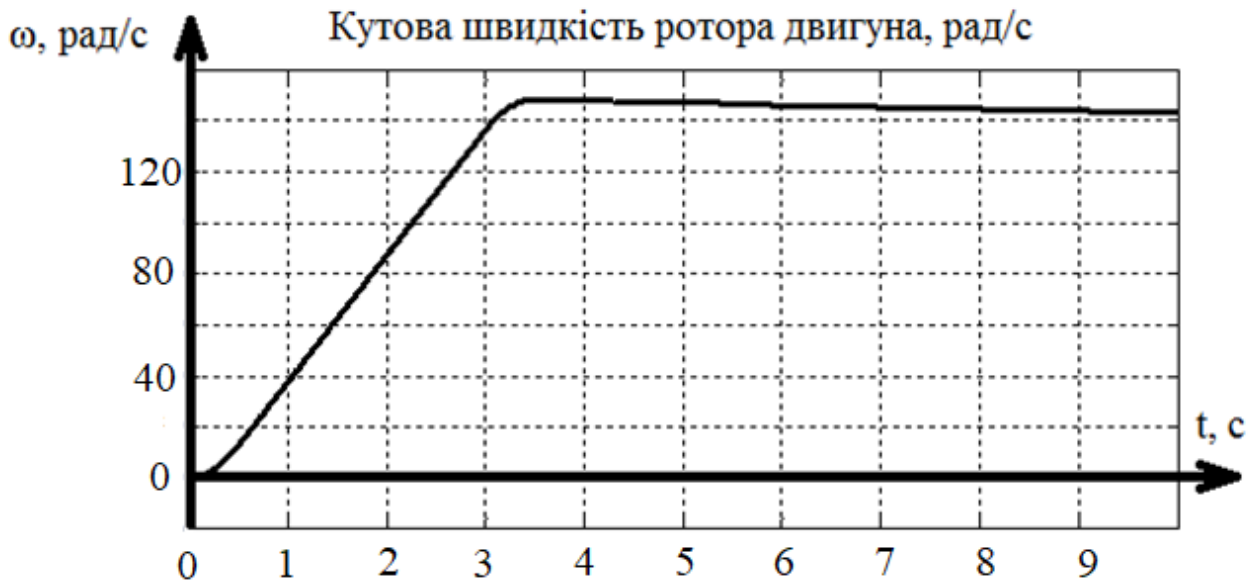


Рисунок 4.8 – Кутова швидкість ротора двигуна

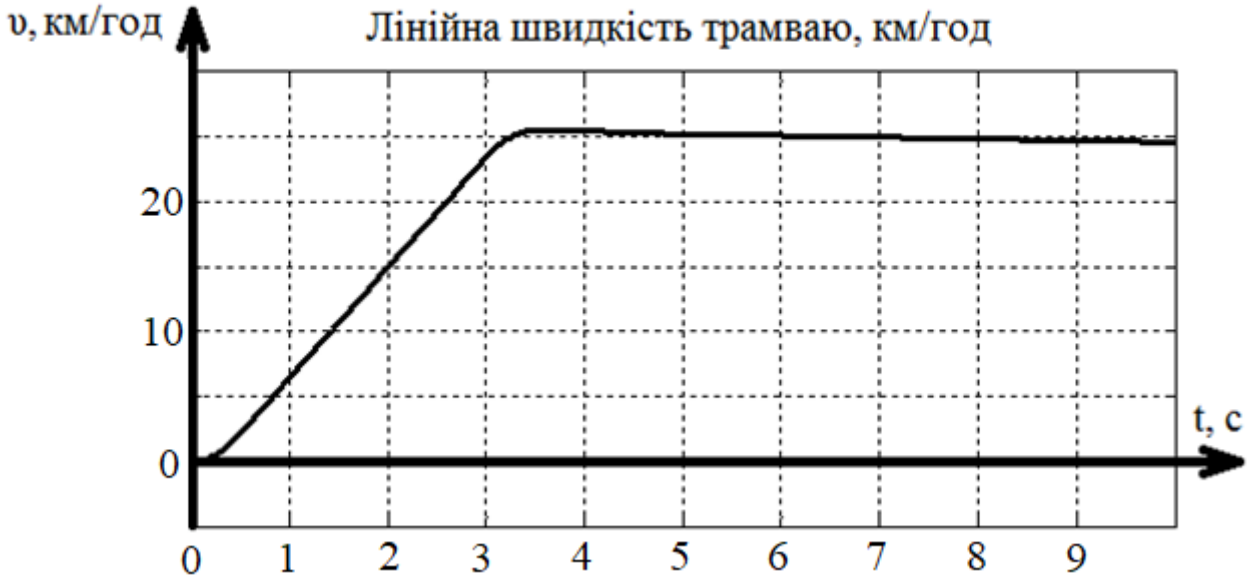


Рисунок 4.9 – Лінійна швидкість трамваю

З рисунку 4.9 видно розгін трамвайного вагону від повної зупинки до 25 км/год. Після розгону на 3.5 секунді починається вільний вибіг, тобто зупинка під дією сил тертя. З отриманого графіку видно що за 6.5 секунд швидкість просідає на 1 км/год. Виходячи з цього отримаємо можливість короткочасного ввімкнення двигуна з подальшим його охолодженням до наступного розгону для підтримання потрібної швидкості.

Нижче на рисунку 4.10 представлено графік струму. З нього видно, що при розгоні амплітудне значення струму дорівнює 400 А. Після скидання моменту струм спадає, але не повністю – з 3.5 секунди маємо амплітудне значення 90 А. Форма має деякі коливання так само, як і у попередньому досліді. Останнє пов'язанно з неідеальністю системи керування та перетворення напруги для нашого двигуна.

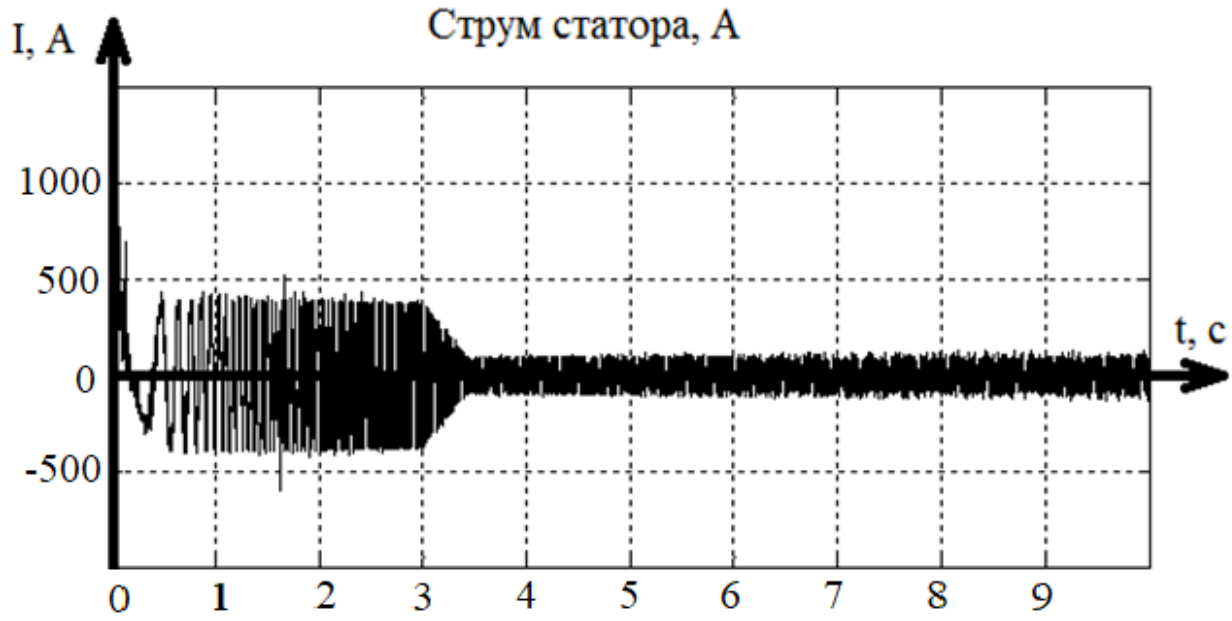


Рисунок 4.10 – Струм статора

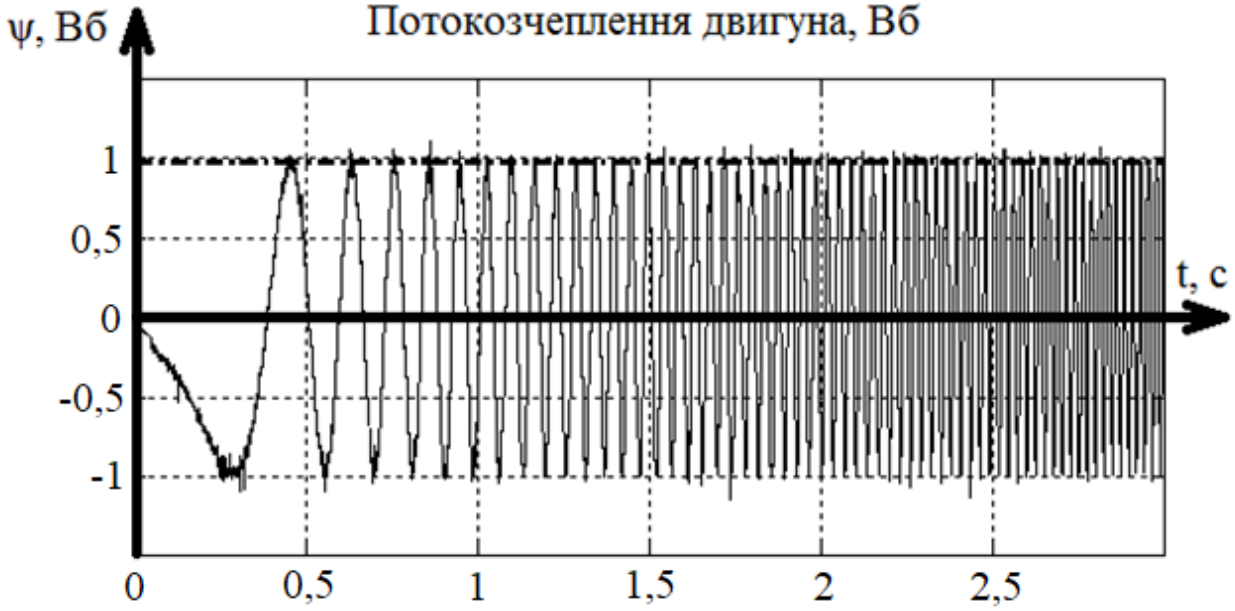


Рисунок 4.11 – Потокозчеплення двигуна

На рисунку 4.11 представлено потокозчеплення двигуна та відмічено рівень його заданого значення – 0.98 Вб. Форма має менші завади ніж у струму, які в даному випадку мають більший вплив ближче до екстремумів та практично зникають під час переходу через нуль. Як бачимо алгоритм керування максимально точно відпрацьовує задане значення модуля потокозчеплення, яке не змінюється при скиданні чи накиданні навантаження. З останнього випливає, що ми маємо розділення каналів керування моментом та потокозчепленням.

## 4.3 Дослідження перехідних процесів при русі трамваю на підйом

У наступному досліді ми виконуємо розгін трамвайного вагону при русі на підйом з нахилом 9% при значенні тагового моменту 1000 Нм, а статичного моменту навантаження – 600 Нм. З 0 до 7 секунди під дією сили тяги ми маємо розгін від 0 до 24 км/год після чого прискорення припиняється за рахунок скидання моменту двигуна до значення, якого достатньо для компенсації моменту навантаження та підтримання сталої швидкості. Нижче на рисунку 4.12 представлено перехідний процес моменту двигуна.

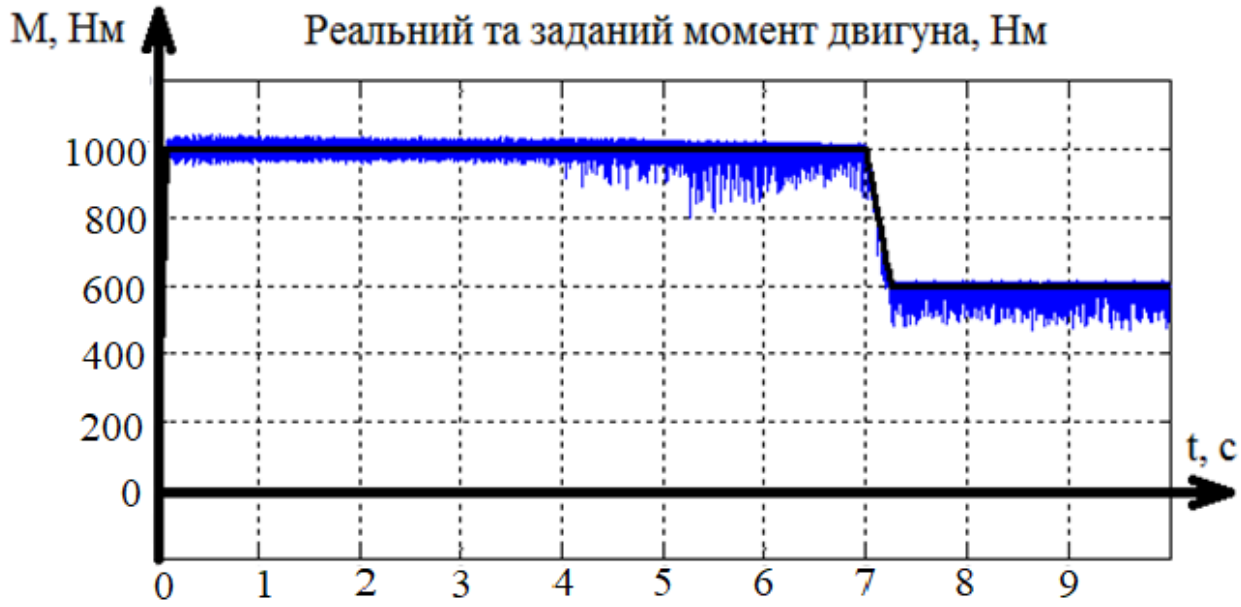


Рисунок 4.12 – Реальний та заданий момент двигуна

Нижче на рисунках 4.13 та 4.14 представлено тахограми руху.

Рисунок 4.13 – Кутова швидкість ротора двигуна

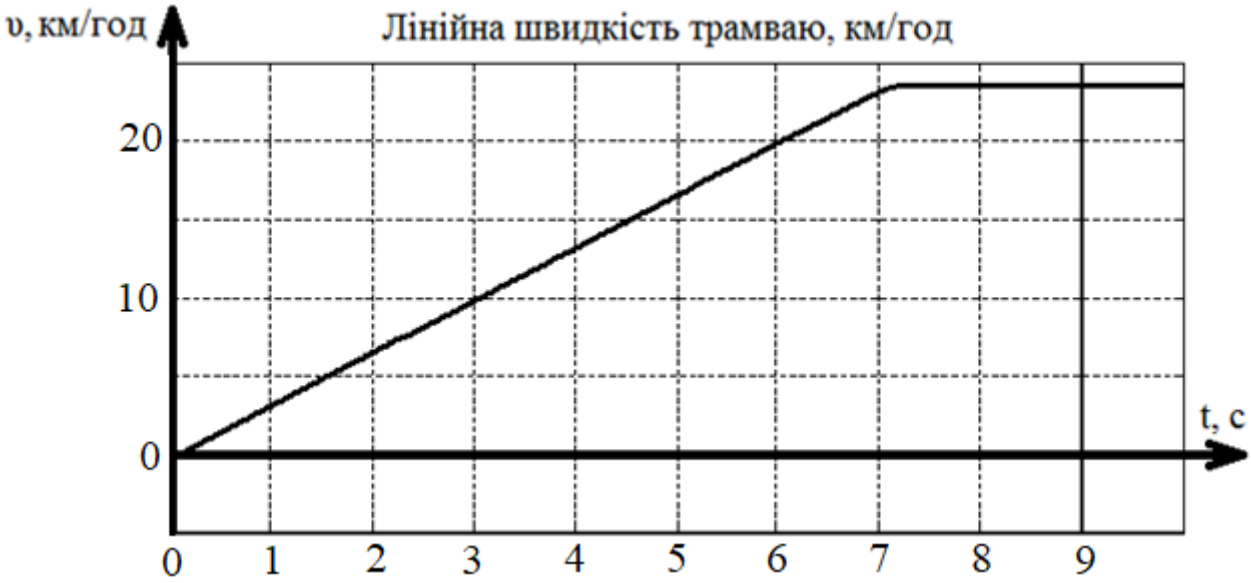


Рисунок 4.14 – Лінійна швидкість трамваю

З графіків перехідних процесів розгону ротора двигуна та вагону трамваю видно, що при зменшенні часу накидання моменту сильно зростає ривок, тобто швидкість наростає не плавно, а майже миттєво. У цьому досліді це було зроблено для запобігання скатування трамваю вниз по схилу під дією сил гравітації оскільки неконтрольований рух назад може призвести до небажаних наслідків.

Нижче зображено графік струму двигуна під час максимального розрахункового навантаження.

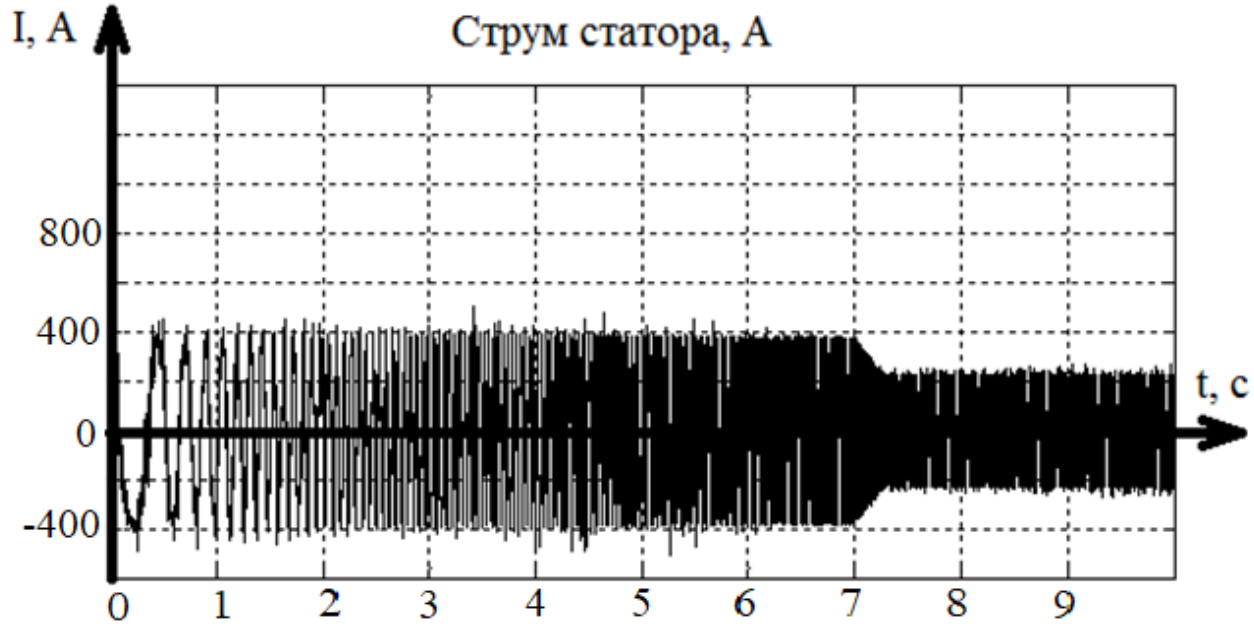


Рисунок 4.15 – Струм статора

З рисунку 4.15 видно, що при моменті двигуна 1000 Нм його струм досягає значення у 400 А. Після спадання моменту до 600 Нм струм також спадає до 240А. На наступному рисунку видно, що система правильно відпрацьовує задане значення потокозчеплення двигуна незалежно від величини навантаження.

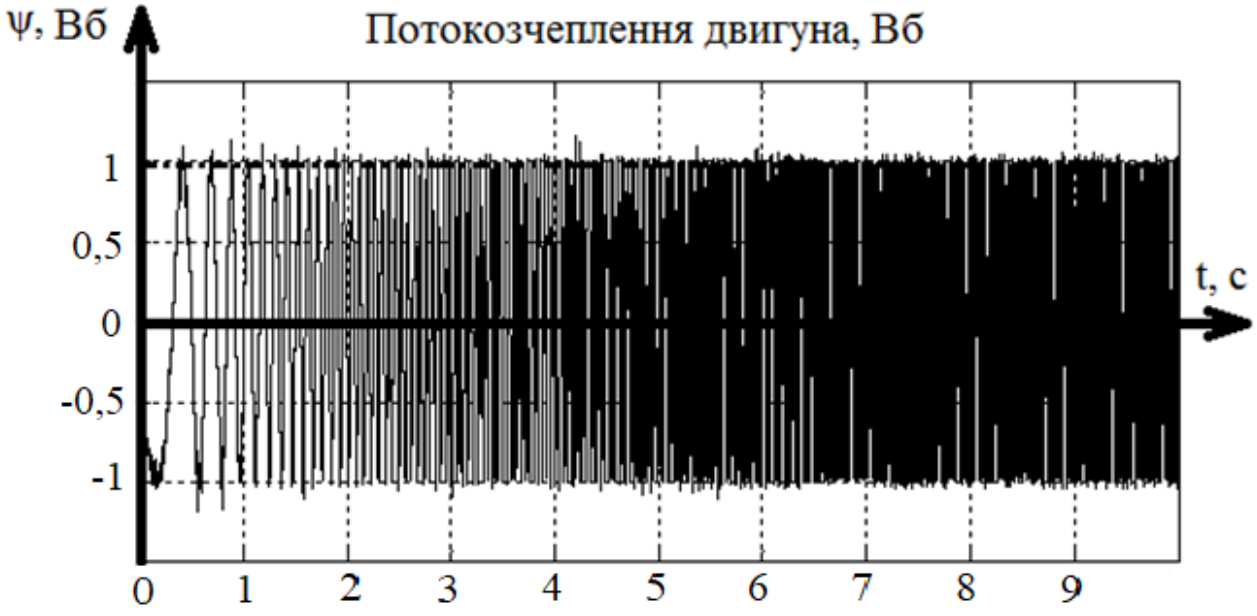


Рисунок 4.16 – Потокозчеплення двигуна

## Висновок по розділу 4

У данному розділі було проведено моделювання розгону, підтримки швидкості вагона трамвая, а також його розгону при руху на підйом з подальшим підтриманням швидкості. З результатів видно, що обраний двигун відпрацьовує дані режими, але при цьому форма струму має значні завади. При розгоні до більших швидкостей перехідні процеси будуть аналогічними за винятком тимчасового збільшення збільшення струму, що абсолютно допустимо оскільки цей режим буде короткочасним, а сам двигун здатен забезпечити певне перевантаження.

# ВИСНОВКИ

У вступі було проаналізовано типи і складові систем керування приводом трамваю, а також різновиди алгоритмів керування. Останні хоч і вимагають складної та дорогої системи керування, але у свою чергу можуть забезпечувати суттєве зменшення втрат при розгоні двигуна за рахунок зменшення пускових струмів, а також дозволяють керувати двигуном за обраним законом зміни траєкторії руху в залежності від умов, які визначає технологічний процес. Виходячи з розглянутих вимог було вирішено, що для керування приводом трамваю буде використовуватись пряме керування моментом (DTC). Також було описано особливості тягового приводу та рейкового міського транспорту в цілому, сформульовано основні вимоги до електроприводу двигуна трамвая.

1. В результаті ознайомлення з особливостями електроприводу трамваю було розраховано зусилля, яке потрібно подолати двигунам для розгону трамвая, після чого за отриманою розрахунковою потужністю було підібрано двигун 4А280М4У3 (один з чотирьох) потужністю 132 кВт та розраховано його параметри схеми заміщення для подальшого моделювання.

2. Було побудовано функціональну схему електропривода та проведено опис її роботи. В цьому розділі було проведено розрахунок та вибір таких силових елементів для перетворювача частоти, як: IGBT модулі, ємності та індуктивності для фільтрів напруги, баласний опір, а також давачі струму та на напруги.

3. Результати моделювання в таких режимах, як: розгін та гальмування порожнього вагону, розгін з подальшим рухом за рахунок інерції (вільний вибіг), а також розгін та підтримання сталої швидкості при русі на підйом з величиною нахилу 9% показали, що обраний двигун цілком підходить для поставленої задачі, тобто запасу його потужності вистачає для розгону розрахункового трамваю навіть у найскладніших умовах. Під час розгону виникає тимчасове збільшення струму, що допустимо, оскільки воно є короткочасним. Для моделювання була використана стандартна модель

асинхронного двигуна з прямим керуванням моментом із SimPowerSystem з певними модифікаціями для моделювання трамвайного приводу.

4. За результатами моделювання було встановлено, що реальне значення струму коли двигун знаходиться під навантаження відповідає розрахунковому значенню. При цьому, обраний двигун відпрацьовує усі можливі режими роботи. З отриманих графіків можна побачити сильні коливання моменту, які місцями складають 25% від заданого значення, та високочастотні завади у формі струму, які можна усунути використанням фільтру. Спотворення форми струму може погіршити техніко-економічні показники приводу – поява вищих гармонік призводить до додаткового нагріву двигуна, що в свою чергу може призвести до швидшого старіння двигуна та можливого несвоєчасного виходу його з ладу. Отже, в дипломному проекті було проведено розробку асинхронного приводу трамвая з подальшим моделюванням різних режимів роботи та вибором елементів силової частини.

# ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Веклич В. Ф. , Збарский Л. В. Проблемы и перспективы развития трамвайного транспорта в Украинской ССР — К.:Общество «Знание» УССР, 1980.

2. Тархов С., Козлов К., Оландер А. Электротранспорт Украины. Энциклопедический путеводитель. — К.: Варто, 2011.

3. Никитин В. В, Пармас А. Я.-Ю., Пивоваров В. М., Саттаров Р. Р., Безредукторный тяговый электропривод городского рельсового транспорта // Современные технологии – транспорту, 2013. №1, С. 3138.

4. Ступичный асинхронный тяговый двигатель с внешним ротором // Железные дороги мира. – № 4. – 2002. С. 29–31.

5. Попович М. Г. Теорія електропривода: Підручник / За ред. Поповича М. Г. –К.:Вища школа, 1993. – 494с.

6. L. Morel, H. Godfroid, J. M. Kauffmann Field Oriented Control of a Double fed Asynchronous Machine. Modelling and Implementation / IFAC Proceedings Volumes, Volume 30, Issue 6, 1997, P. 1101-1106.

7. Abdelsalam A.Ahmed[*]ByungKwon Koh[**]Jung-SuKim[**]YoungIl Lee Finite Control Set-Model Predictive Speed Control for Induction Motors with Optimal Duration, / IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, P. 7801-7806.

8. Dimitrios Karagiannis, Alessandro Astolfi Rotor resistance estimation for current fed induction motors / IFAC Proceedings Volumes, Volume 38, Issue 1, 2005, P. 77-82.

9. Hou-Tsan Lee, Li-Chen Fu, Su-Hau Hsu Adaptive SPR speed/position control of induction motor / IFAC Proceedings Volumes, Volume 35, Issue 1, 2002, P. 513-518.

10. Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть I. Проблемы векторного управления в асинхронном электроприводе: краткий обзор и формулировка проблем // Техн. електродинаміка. Київ, 1999. №27, С. 27–32.

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

12. Novonty D. W. and Lipo T. A. Vector Control and Dynamics of AC Drives. –New York: Oxford University Press Inc, 2000. С. 9-12.

13. P. Vas, “Sensorless Vector and Direct Torque Control” (London, U.K.: Oxford Science Publication, 1998).

14. Карандеев Д. Ю., Энгель Е. А. Прямое управление моментом асинхронного двигателя с использованием адаптивного нейроконтроллера в условиях неопределенности // Интернет-журнал «Науковедение» Том 7, №5 2015.

15. Ефремов И. С. Троллейбусы (теория, конструкция и расчёт). — изд. 3, испр. и доп. — М.: Высшая школа, 1969.

16. Балденков А. А. Структурные методы линеаризации динамических характеристик асинхронных электроприводов с частотным управленим 2019.

17. Подземный транспорт шахт и рудников. Справочник / Под общ. Ред. Г. Я. Пейсаховича, И. П. Ремизова. — М. : Недра, 1985. 565с.

18. Блантер С.Г. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности // М., Недра, 1980. 478с.

19. Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А. Тяговые электрические машины. Учебник для вузов ж.-д. трансп. — М.: Транспорт, 1991.

20. Пушков П.М., Андрейченко В.П., Кульбашный А.В. Методические указания к практическим и самостоятельным занятиям по тяговым расчетам по дисциплине «Основы электрической тяги», Харьков, ХНАГХ, 2008. 86с.

21. Кравчик А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.

22. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. Заведений. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

23. Datasheets для AIH //[Електронний ресурс] / Режим доступу: http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irg5u400sd12b.pdf - Назва з екрану.

24. BSP50; BSP51; BSP52 NPN Darlington transistors //[Електронний ресурс] / Режим доступу: https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/BSP50_51_52.pdf - Назва з екрану.

25. DATA SHEET Hall Effect Current Sensor //[Електронний ресурс] / Режим доступу: http://coretech.com.ua/docs/Sensors-hall/coretech-HCS-K5.pdf - Назва з екрану.

26. Попович М. Г. Теорія електропривода: Підручник / За ред. Поповича М. Г. –К.:Вища школа, 1993. – 494с.

27. Leonhard W. Control of Electric Drives (2nd edition). –Berlin: Springer-Verlag, 1995. –420p.

28. Костенко М. П. Работа многофазного асинхронного двигателя при переменном числе периодов // Электричество. –1925. –№ 2.

29. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М.: Энергия, 1977 г.

30. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов / В.И.Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

31. Михальський В.М. Матричные преобразователи (управление, коммуникация тока): Дис. … канд. техн. Наук: 05.09.12 / НАН Украины. Ин-т електродинаміка. – К., 2003.

32. Михальський В.М. Векторна широтно-імпульсна модуляція в матричних перетворювачах. Навчальний посібник / В.М. Михальский, В.М. Соболєв, Е.М. Чехет. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2003. – 74 с.

33. Михальський В.М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході і виході перетворювачів частоти та напруги з широтно-імпульсною модуляцією. – Київ, Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 340 с.

34. Комп’ютерні пристрої в системах автоматизації. Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи для студентів напрямку підготовки 6.050702 / Уклад: С. М. Ковбаса, С. С. Димко –К.: НТУУ “КПІ”, 2015 р. 25 с.

35. В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько, М. М. Юрченко, Л. І. Сенько, В. В. Ясінський. Електроніка та мікросхемотехніка: У 4-х т. Том 4. Книга 1, 2012. 640 с.

36. Пересада С.М, Ковбаса С.М. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни ТМС-1. К.: «НТУУ» «КПІ», 2011 40 с.

37. Чернішев А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011.– 213 с.

38. Волков И.В. Новая концепция построения силовых цепей частотнорегулируемых асинхронных электроприводов / И.В. Волков // Техн. електродинаміка. – 1999. - №4. – С. 21-26.