

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МОДЕРНІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ ЧС7

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

КРМ.273.42.05.24.01 ПЗ

Розробив: студент групи 214-ЕЕ-Д23
спеціальності 273 «Залізничний транспорт»
освітньої програми «Електровози та
електропоїзди»

(роботу виконано самостійно, відповідно
до принципів академічної доброчесності)

 Андрій КОРНІЮК

Керівник: к.т.н., доцент
Андрій МАСЛІЙ

Рецензент: к.т.н., доцент
Олександр ОБОЗНИЙ

Харків – 2024

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет: механіко-енергетичний

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

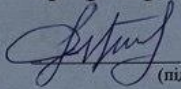
Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

Освітня програма: «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук

 Михайло БАБАШ
(підпис)

«__» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**
Корніюка Андрія Олександровича

1 Тема «Дослідження роботи модернізованого електровозу ЧС7.», керівник Маслій Андрій Сергійович, к.т.н., затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету від 30 вересня 2024 року № 42.

2 Строк подання студентом закінченої роботи 03 січня 2025 року..

3 Вихідні дані: пасажирський електровоз ЧС-7, тягова електрична передача, реостатно-контактна система керування, двигуни постійного струму 1AL4846dT, тяговий асинхронний двигун НБ-607.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки

1 Загальні відомості про електровоз

2 Математичне моделювання двигуна постійного струму 1AL4846dT

3 Математичне моделювання руху потяга

4 Асинхронні двигуни та їх дослідження в якості тягових на математичній моделі

5 Моделювання частотного перетворювача для керування асинхронним двигуном

6 Моделювання руху потяга з асинхронним приводом та векторною системою керування

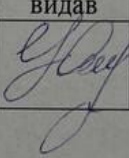
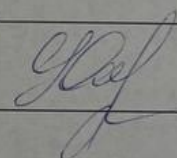
7 Економічний розрахунок запропонованої модернізації

5Перелік графічного матеріалу

1 Загальний вигляд електровозу ЧС7 (1 слайд).

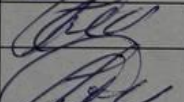
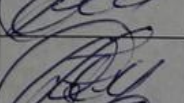
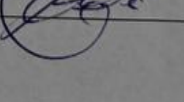
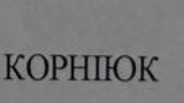
- 2 Математичне моделювання електродвигуна постійного струму 1AL4846dT (1 слайд).
- 3 Результати моделювання (1 слайд).
4. Способи регулювання швидкості електровоза ЧС7 (1 слайд).
- 5 Математична модель поїзда з реостатно-контакторною системою керування та результати моделювання (2 слайди).
- 6 Математичне моделювання руху поїзда із системою підлеглого керування (1 слайд).
- 7 Моделювання асинхронного двигуна НБ-607 з векторною системою керування та результати моделювання (2 слайди).
- 8 Функціональна схема тягового електропривода однієї секції електровоза (1 слайд).
- 10 Моделювання руху поїзда з асинхронним приводом та векторною системою керування (1 слайд).
- 11 Висновки (1 слайд).

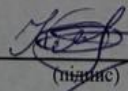
6 Консультанти окремих розділів

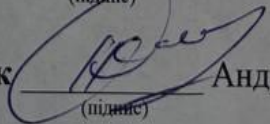
Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М., доцент, канд. екон. наук		

7 Дата видачі завдання: 02 жовтня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1 Отримання завдання на кваліфікаційну роботу. Формування змісту та етапів роботи.	02.10-07.10.24	
2 Збирання та обробка статистичної інформації.	08.10-18.10.24	
3 Виконання роботи по розділам кваліфікаційної роботи.	19.10-19.12.24	
4 Перевірка виконаних завдань у керівника кваліфікаційної роботи, виправлення помилок.	20.12-24.12.24	
5 Робота над оформленням графічної частини.	25.12-31.12.24	
6 Нормоконтроль. Підготовка до захисту.	01.01-05.01.25	

Студент  Андрій КОРНІЮК
(підпис)

Керівник  Андрій МАСЛІЙ
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 112 аркушів пояснювальної записки формату А4, у тому числі 77 рисунків, 5 таблиць, 12 літературних джерел.

Ключові слова: електровоз, система підлеглого керування, тяговий асинхронний двигун, векторне керування

Об'єктом дослідження є модернізований тяговий електропривод та система керування електровозу ЧС-7.

Метою дослідження є пошук засобів для підвищення енегroeфективності електровозу за рахунок застосування систем керування.

У кваліфікаційній роботі розглянуто можливість модернізації електровозу постійного струму ЧС-7 з тяговим електроприводом постійного струму. Для підвищення надійності системи запропоновано замінити двигуни постійного струму на частотнорегульовані асинхронні. Була обрана схема живлення двигунів та розраховані параметри інвертора. Для асинхронного тягового електроприводу була обрана система керування на основі ПІ-регулятора. У останньому розділі був розрахований економічний ефект від впровадження запропонованої системи.

ABSTRACT

This qualification paper includes 112 sheets of A4 explanatory note, including 77 pictures, 5 tables, 12 literary sources.

Keywords: electric locomotive, subordinate control system, traction asynchronous motor, vector control

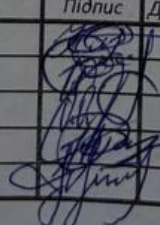
The object of research are modernized control system of electric traction electric locomotive ChS7.

The aim of research is search for means to increase the efficiency of the electric locomotive through the application of control systems.

In the qualification work the possibility of modernization of the electric current of the DC-7 with a traction electric drive of a direct current is considered. To increase the reliability of the system, it is proposed to replace DC motors with frequency-regulated asynchronous ones. The engine power scheme and calculated parameters of the inverter were selected. For an asynchronous traction electric drive, a control system was chosen based on the PI-regulator. In the last section the economic effect from the introduction of the proposed system was calculated.

Зміст

Вступ	8
1 Загальні відомості про електровоз	11
1.1 Призначення та технічна характеристика електровозу	11
1.2 Розташування обладнання на електровозі	12
1.3 Механічна частина	15
1.4 Тягові електродвигуни	17
1.5 Система керування електроприводом електровоза	18
2 Математичне моделювання двигуна постійного струму 1AL4846dT	21
2.1 Статичні характеристики двигуна з послідовним збудженням	21
2.2 Розрахунки та побудова математичної моделі	22
3 Математичне моделювання руху потяга	30
3.1 Математична модель реостатно-контакторної системи керування	30
3.2 Математична модель двухконтурної системи підлеглого керування	34
4 Асинхронні двигуни та їх дослідження в якості тягових на математичній моделі	44
4.1 Математичне моделювання асинхронного двигуна	44
5 Моделювання частотного перетворювача для керування асинхронним двигуном	61
5.1 Вибір та обґрунтування силової схеми тягового електропривода	61
5.2 Вибір та обґрунтування схеми автономного інвертора напруги	63
5.3 Розрахунок та вибір елементної бази чотирьохквadrантного перетворювача та трифазного мостового інвертора	67
5.4 Математичне моделювання перетворювача частоти	

КРМ.273.42.05.24.01 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Корніюк		
Перевір.		Маслій		
Рецензент		Обозний		
Н. Контр.		Маслій		
Затверд.		Бабасєв		
Дослідження роботи модернізованого електровозу ЧС7				
		Літ.	Арк.	Акрушів
			6	112
УкрДУЗТ кафедра ЕТЕМ				

6 Математичне моделювання потяга з асинхронним приводом та векторною системою керування	75
6.1 Основні теоретичні положення роботи векторного керування	75
6.2 Розрахунок параметрів двигуна	83
6.3 Розрахунок регуляторів	88
7 Визначення економічного ефекту від запровадження асинхронних двигунів на електровоз постійного струму	97
7.1 Коротка характеристика запропонованого рішення	97
7.2 Розрахунок економічного ефекту	99
Висновки	110
Список використаних джерел	111
Додаток А	112

Вступ

Вперше ж у світі залізниці з'явилися на початку XIX століття у зв'язку з розвитком великої промисловості. 27 вересня 1825 року в Англії був відкритий рух на першій залізниці загального користування на лінії Стоктон-Дарлінгтон довжиною 56 км. У 1832 році у Франції з'явилася перша залізниця між Ліоном і Сент-Ет'єном довжиною 58 км.

Необхідність будівництва залізниць на Україні виникла вже давно. Географічне положення краю, його природні багатства були цьому передумовою. Україні потрібні були залізниці для вивозу продукції сільського господарства головним чином з родючого Південно-Західного краю і продукції промисловості — з районів Донбасу і Кривого Рога. Після поразки в Кримській війні царський уряд усвідомив необхідність з'єднання центра країни з портами на Чорному та Азовському морях і з західними кордонами, виходячи з стратегічних міркувань. Відповідно до цього на Україні виникло три основних осередки будівництва залізниць: Південно-Західний край, в районі якого поступово виникала мережа Південно-Західних залізниць; промисловий район Донбасу і Кривого Рога, в районі яких виникали Донецька і Катерининська (Сталінська) залізниці; для зв'язку центра з морем і з промисловими районами України будувалась мережа Південних залізниць. Після будівництва лінії Курськ - Харків - Азовська почали будувати залізниці спеціально для вивозу вугілля з Донбасу. Першою такою залізницею була магістраль Костянтинівка - Єленовка, яка стала до ладу у 1872 р. Вона й послужила початком розвитку мережі майбутніх Донецьких залізниць. У 1884 р. стала до ладу Катерининська (Сталінська) залізниця, побудована для вивозу продукції промисловості Кривого Рога. Першою була лінія Нижнедніпровськ - Долинська. У 1904—1906 рр. була побудована так звана Друга Катерининська залізниця (яка об'єдналася потім з Першою) по напрямку Долгінцево-Волноваха. Оскільки залізниці України були побудовані у великих промислових і сільськогосподарських районах, вони за довжиною та обсягом роботи стали найбільшими серед залізниць України. Залізниці України в результаті громадянської

війни зазнали великих збитків. Було зруйновано багато мостів, колій, станцій, засобів зв'язку.

У 1921 р. Почалася відбудова залізниць України, але їх робота порівняно з довоєнним рівнем залишилась все ж низькою. На кінець 1921 р. Перевозка вантажів ще не перевищувала 1/7 вантажообороту 1913 р. Були відбудовані всі постійні споруди, і рух було відкрито майже на всіх лініях. З 1922 р. почали впорядковувати зруйноване лінійне господарство. Почалося будівництво нових ліній на Україні. Була побудована лінія Херсон - Апостолово, добудовувались залізниці, закладані за часів царату,- Дніпропетровськ - Апостолово, Прилуки - Ново білиця, Ново білиця - Цветково, Чернігів – Овруч, загальною довжиною 700 км. У 1935 р. в країні було досягнуто рекордне для того часу вантаження 76 тис. вагонів на добу проти 58 тис. вагонів у 1934 р. У 1935 р. вперше було виконано план перевозом (на залізницях план був виконаний на 107,6 %).

У роки другої і третьої п'ятирічок транспорт республіки разом з залізницями всієї країни продовжував поповнюватися найновішими паровозами і вагонами, з'явилися тепловози і електровози. На залізницях України широко впроваджувалась автоблокіровка, автоматичне зчеплення вагонів, автоматичне гальмування поїздів. Загальна довжина мережі залізниць України збільшилась до 14,8 тис. км, а після возз'єднання з Західною Україною — до 19,7 тис. км, що становило 17,1% мережі залізниць всього Радянського Союзу. За час війни залізничний транспорт України був дуже пошкоджений. Гітлерівці підірвали і знищили всі мости, системи водопостачання, вокзали, паравозні і вагонні депо. Зовсім зруйновані були паравозо- і вагоно- ремонтні заводи. Відступаючи, фашисти повністю зруйнували до 50% залізничних колій України, а решту дуже пошкодили. Великих збитків було задано рухомому складу, який був або знищений, або вивезений фашистами. Відбудова залізниць України почалася ще в ході боїв за звільнення. Великі завдання постали перед залізничниками у четвертій п'ятирічці. Уже в 1948 р. залізниці країни перевершили довоєнний рівень вантажообігу. Була в основному закінчена відбудова основних залізничних магістралей, які зв'язують Москву з Донбасом, Донбас з Ленінградом. До кінця п'ятирічки на Україні було здано в експлуатацію 200 нових

вокзалів. Серед них такі великі, як Сталіно, Микитівна, Попасна, Луганськ, Харків, Дніпропетровськ, Сімферополь, Євпаторія, Феодосія, Нікополь, Кременчук, Полтава, Чернігів, Севастополь та інші. Вантаження на залізницях країни збільшилося за роки п'ятирічки на 43,3%, а продуктивність праці – на 39%. Була побудована лінія Федорівна – Каховка, яка здійснила зв'язок з районом будівництва Каховської ГЕС і дала вихід з Донбасу на Дніпро. У шостій п'ятирічці перед робітниками залізниць було поставлено завдання забезпечити дальше зростання перевозом. У 1958 р. план перевезки вантажів на залізницях України був виконаний на 102%. При цьому порівняно з 1957 р. перевезки вантажів зросли на 8%. У 1960 році в Україні з'явився новий різновид магістрального залізничного транспорту – метрополітен. У Києві наприкінці 1960 року була здана в експлуатацію перша черга метро надзвичайно складного інженерного комплексу. Пізніше, 23 серпня 1975 року, на території України почав діяти другий метрополітен – у місті Харкові. У 70-их і 80-их роках побудована залізниця Полтава-Київ-Брест, Курськ-Харків-Ростов, розгорнулося будівництво залізниць у Донбасі, Наддніпрянщині, Криворіжжі, що сприяло розвитку промисловості в цих районах. У 1987 році експлуатаційна довжина залізниць уже складала 22.7 тис. км. (у 1913 році – 15.6 тис. км.). Експлуатаційна довжина залізниць СРСР -146.1 тис. км. Україна займала одне з перших місць у СРСР по щільності залізничної мережі (37.7 км. на 1000 км території). Частина УРСР у перевозі вантажів залізничним транспортом країни в 1988 році складала 25.2%, у вантажообігу 12.8%. Частина вантажообігу залізничного транспорту в загальному вантажообігу Української РСР складала 53.3%, пасажирообороту 40.8%. У середньому на 1 км експлуатаційної довжини залізниці приходилося 22.2 млн. т./км. і 3.2 млн. пасажиро-кілометрів. Сучасний залізничний транспорт на 40% електрифікований, двох і багатокіліметрові ділянки складають майже третину експлуатаційної довжини.

1 Загальні відомості про електровоз

1.1 Призначення та технічна характеристика електровозу

ЧС7 – пасажирський двосекційний восьмивісний електровоз постійного струму напругою 3 кВ. Випускався в період з 1983 по 1999 роки на заводі Škoda в місті Пльзень (Чехословаччина, згодом Чехія) для залізниць Радянського Союзу (а згодом і України), всього випущено 321 електровоз, більшість яких за станом на 2017 рік знаходиться в регулярній експлуатації.

Основні технічні дані електровоза:

Напруга	3 000 В
Формула ходової частини	2(2 ₀ -2 ₀)
Колія	1520 мм
Передаточне відношення	1,733
Потужність тривалого режиму на валах тягових двигунів	6160 кВт
Сила тяги тривалому режимі	25,5 тс
Швидкість у тривалому режимі	87,8 км/год
Конструкційна швидкість	160 км/год
Вага електровоза з 2/3 запасу піску	172 т±2%
Тиск осі на рейку	21,5 т ± 2%
Висота осі автозчеплення від головки рейки при нових бандажах	1080 мм
Висота від головки рейки до робочої поверхні полоза струмоприймача:	
в опущеному положенні	5240 мм
у робочому положенні	5500—6800 мм
Діаметр коліс по колу катання	1250 мм

Загальний вид електровозу та розміщення його електричного та механічного обладнання представлені на рисунок 1.1.

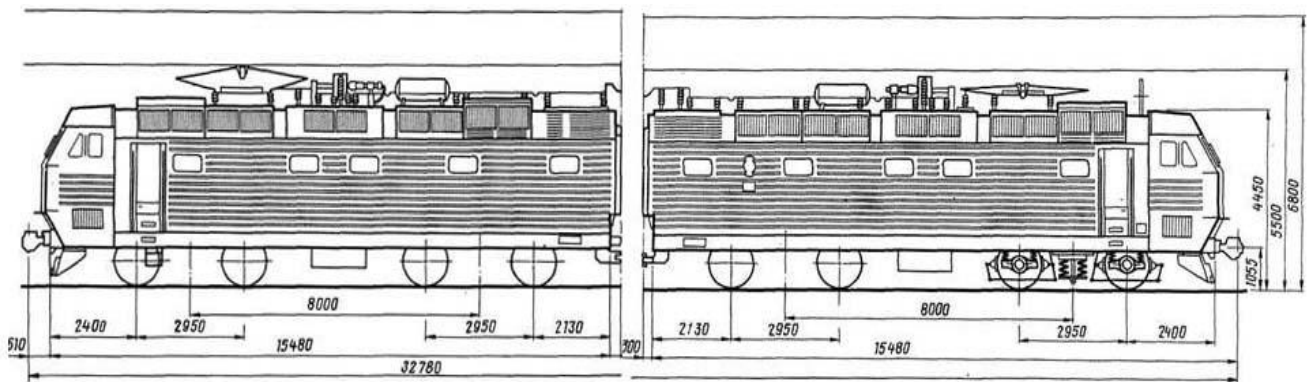


Рисунок 1.1 – Загальний вид електровозу ЧС-7

1.2 Розташування обладнання на електровозі

За тамбуром знаходиться машинне відділення, що має два бічних вузьких проходи вздовж стін, між якими розміщено основне електрообладнання локомотива.

Устаткування розташоване в такий спосіб: в передній частині машинного відділення знаходиться мотор-вентилятор тягових двигунів переднього візка, за

ним проміжний барабанний контролер (ПБК) типу 330; слідом в середині машинного відділення - високовольтна камера, захищена металевими сітками; в задній частині за високовольтною камерою - шафа 100 (збудник), мотор-вентилятор заднього візка; за ним - пневматична панель з кранами і мотор-компресор.

У задній торцевій частині машинного відділення за пневмообладнанням розташований поперечний прохід, що з'єднує два бокових проходи і забезпечує перехід в іншу секцію локомотива через задні торцеві двері секції.

Від головного введення ток розгалужується на дві паралельні ланцюги, через додатковий резистор до встановленого на пульті машиніста вольтметра мережі, і до швидкодіючому вимикача - головному захисному апарату. Після швидкодіючого вимикача - три паралельних ланцюга.

Перша - тяговий ланцюг, тобто ланцюг тягових двигунів, друга - ланцюг допоміжних машин і опалення кабін. Ці два ланцюги мають загальний електролічильник. Третя - ланцюг опалення поїзда, дуже проста, реле перевантаження, контактор включення опалення, електролічильник опалення і високовольтний штекер, розташований на буферному брусі.

Для забезпечення безпеки робіт в високовольтній камері в високовольтній ланцюга встановлені заземлювачі - за конструкцією аналогічні роз'єднувачів. Після відключення роз'єднувача вони заземлюють ділянку між роз'єднувачем і прохідним ізолятором на корпус електровоза. Управління роз'єднувачем, заземлителем і струмоприймачем проводиться одним перемикачем на пульті машиніста, окремим для кожної секції.

Ланцюги тягових двигунів і допоміжних машин досить складні. Всі двигуни - колекторні постійного струму.

Кожен з мотор-вентиляторів встановлений вертикально і складається з високовольтного двигуна, двох вентиляторних коліс (одне закріплено на верхньому кінці вала двигуна, інше на нижньому) і розташованого збоку на корпусі вентилятора колекторного генератора управління.

Генератор управління наводиться від двигуна вентилятора через ремінну передачу і виробляє постійний струм напругою 50 В для живлення ланцюгів управління і освітлення електровоза.

Двигуни вентиляторів розраховані на напругу 1500 В і тому вентилятори кожної секції електровоза постійно з'єднані послідовно. Між собою вентилятори секцій можуть з'єднуватися послідовно (режим низької швидкості) і паралельно (режим високої швидкості) за допомогою розташованих в кожній із секцій перемикачів вентиляторів з пневматичним приводом. У ланцюзі вентиляторів є додаткові резистори.

При включенні в ланцюг введений резистор опором 160 Ом, це забезпечує плавний розгін двигунів. Через 3 секунди спрацьовує реле часу і значна частина опору виводиться, в ланцюзі залишається лише 25 Ом. Чи включається та чи інша швидкість перемикачем на пульті машиніста.

Мотор-компресор призначений для нагнітання запасу повітря в головних резервуарах, використовуваного для роботи гальм, звукових сигналів, пісочниць, склоочисників, електроапаратів з пневматичним приводом. Він розташований горизонтально, складається з високовольтного двигуна і трьохциліндрового компресора.

Забір повітря для компресора - через борти. Пуск компресора може бути як автоматичний, за сигналом реле тиску, що спрацьовує при тиску в головних резервуарах менше 7,5 атм, так і ручної - вибирається перемикачем на пульті машиніста.

Також в картері компресора встановлений електронагрівач для обігріву масла після тривалої стоянки взимку, він включається тим же перемикачем в кабіні. Запуск компресора, як і вентиляторів, реостатний. При включенні в ланцюг введений додатковий резистор опором 69 Ом, і по закінченні 2 секунд, якщо тиск в головних резервуарах більше 3 атмосфер (при меншому тиску навантаження на компресор мала і частота обертання може підвищитися понад межі) майже весь резистор закорачується.

1.3 Механічна частина

Механічна частина призначена для розміщення електричної апаратури і реалізації тягових і гальмових сил, що розвиваються електровозом, а також розміщення пневматичного устаткування, забезпечення заданого рівня комфорту і безпечних умов керування електровозом.

Електровоз складається з однієї секції, вона містить у собі дві тривісні візки на який спирається кузов. Візки між собою з'єднані пружним горизонтальним зчленуванням.

1.3.1 Візок

Кожен візок електровозу складається з рами, колісних пар, зубчастих передач, букс, ресорного підвішування, гальмівної системи, підвісок тягових двигунів.

Рама візка призначена для передачі і розподілу вертикального навантаження між окремими колісними парами (за допомогою ресорного підвішування), сприйняття стискального зусилля, гальмівної сили, бічних зусиль від колісних пар і передачі їх на раму кузова. У рамі візка розміщені колісні пари з тяговими двигунами і зубчастими передачами, букси з ресорним підвішуванням і гальмівне обладнання.

Для передачі обертаючого моменту з вала якоря тягового двигуна на ведучі колеса застосовується однобічна прямозуба зубчаста передача. Передача моменту від валу тягового двигуна до малої шестерні здійснюється приводом спеціальної конструкції, що забезпечує компенсацію зміни відстані між віссю колісної пари і валом тягового двигуна при русі електровоза.

Через букси на колісні пари передається вертикальне навантаження від ваги електровоза, а від колісних пар на рами візків зусилля тяги, гальмування і бічні горизонтальні зусилля. Для пом'якшення ударів при проходженні електровозом по нерівностях шляху і рівномірного розподілу навантажень між колісними парами і колісними центрами служить ресорне підвішування.

Для реалізації гальмівних зусиль і забезпечення безпеки руху служить

підоймова гальмівна система, що передає зусилля від гальмівних циліндрів до гальмівних колодок. Також електровоз обладнаний електропневматичними гальмами, для чого встановлено спеціальне електроустаткування і прокладено два лінійні дроти, які через контакти сполучних рукавів пов'язані з лінійними дротами складу потяга.

Підвіска тягового двигуна — опорно-рамна (двигун жорстко закріплений на рамі візка через спеціальну підвіску з гумовими шайбами (амортизаторами)). Підвіска служить для зм'якшення ударів, що приходяться на тяговий двигун при проходженні електровозом нерівностей шляху і при рушанні з місця, а також для компенсації зміни взаємного положення двигуна і рами візка при русі електровоза.

1.3.2 Кузов

Кузов електровоза складається з однієї секції обтічної форми. Секція з двома кабінами являє собою суцільнометалеву конструкцію, зварену з прокатних і гнутих профілів і аркушів вуглецевої сталі. Основним елементом кузова, що несе усі види навантажень, є його рама. Головна рама кузова складається з двох боковин, шкворневих і буферних брусів і ряду поперечних балок, що виконують роль зв'язків, які збільшують поперечну жорсткість рами, а також служать каркасом, на якому кріпиться устаткування.

У буферних брусах розміщені фрикційні апарати автозчеплень. Сили, що виникають на автозчепленнях, через буферні бруси передаються боковинам. Для установки тягового трансформатора в середній частині рами служать дві поперечні балки, які сполучені зваркою з боковинами рами кузова.

Головна рама кузова електровоза в горизонтальній площині, в отворах між подовжніми і поперечними балками, закриті сталевими листами, що ізолюють внутрішній простір кузова від зовнішнього середовища. Люки забезпечують доступ до другого і п'ятого тягових двигунів. Верхня рамна надбудова кузова складається з двох плоских ферм-розкосів, розташованих вертикально. Ферми жорстко сполучені з верхніми полицями боковин і є елементами кузова, збільшуючи його жорсткість у вертикальному напрямі. Верхнє (дахове) обв'язування кузова дуже легке і несе

навантаження лише від дахового устаткування.

У машинному відділенні розташовані каркаси під допоміжні машини й апаратуру. Прохід у кузові одnobічний. З боку проходу доступ до апаратів здійснюється через засувні щити і дверці. Щити і дверці мають механічне, пневматичне й електричне блокування, що не дозволяє відкривати їх при піднятому струмоприймачі.

1.4 Тягові електродвигуни

Тяговий двигун призначений для перетворення електричної енергії, одержаної з контактної мережі, у механічну, яка передається з вала двигуна на колісну пару. Привід кожної колісної пари електровоза індивідуальний. Малі шестерні змонтовані на кінцях вала двигуна, великі – на осі колісної пари.

Тяговий двигун типа 1AL-4846dT складається з остову, якоря, шести головних полюсів, шести додаткових полюсів, траверси, шести щіткотримачів, двох підшипникових щитів з підшипниками і карданного приводу. Остов є магнітопроводом електродвигуна і служить для зміцнення на ньому головних і додаткових полюсів, траверси і підшипникових щитів. Остов тягового двигуна відлитий із спеціальної сталі з високою механічною міцністю і хорошими магнітними властивостями. Внутрішня і зовнішня поверхні основної частини остову мають циліндрову форму; перетин її 370 см². У верхній частині остову з боку колектора розташований прямокутний вентиляційний люк для приводу повітря, що охолоджує. Для огляду колектора і щіткового апарату передбачено два люки. До внутрішньої поверхні остову кріплять головні і додаткові полюси.

Головні полюси необхідні для створення основного магнітного потоку, який замикається через осердя головних полюсів, якір і остов, утворюючи магнітний ланцюг тягового двигуна. Кожен полюс складається з осердя і котушки. Котушка головного полюса має 10 витків. Вона намотана на ребро із смугової міді перетином 5×45 мм.

Додаткові полюси служать для створення додаткового магнітного поля в комутаційній зоні. Суцільні осердя додаткових полюсів виготовлені з електротехнічної

сталі і кріпляться до остову двома шпильками. Котушка намотана на ребро із смугової міді перетином 7×32 мм і має 10 витків.

Щіткотримачі укріплені на поворотній траверсі, що має форму кільця. Якір тягового двигуна складається з порожнистого валу осердя, обмотки, передньої і задньої натискних шайб і колектора. Для зменшення втрат, осердя якоря набране з штампованих листів електротехнічної сталі. У листах зроблені трикутні отвори із закругленими кутами, які після збірки с осердя утворюють вентиляційні канали. Обмотка якоря в пазах осердя укріплена текстолитовими клинами, а в лобових частинах - двошаровими дротяними бандажами. Для зменшення втрат між шарами бандажів укладена ізоляційна стрічка з силіконового азбесту. Колектор набраний з мідних пластин з додаванням срібла. Колекторні пластини ізолюють один від одного прокладками, товщиною 1 мм, виконаними з колекторного міканіту. Колектор має 261 пластину. Колектор запресовують на фланець, прикріплений до втулки якоря.

1.5 Система керування електроприводом електровоза

Існують три методи керування колекторним електродвигуном — зміна напруги на якорі, зміна опору кола якоря, зміна потоку збудження. На електровозі ЧС7 використовуються три способи.

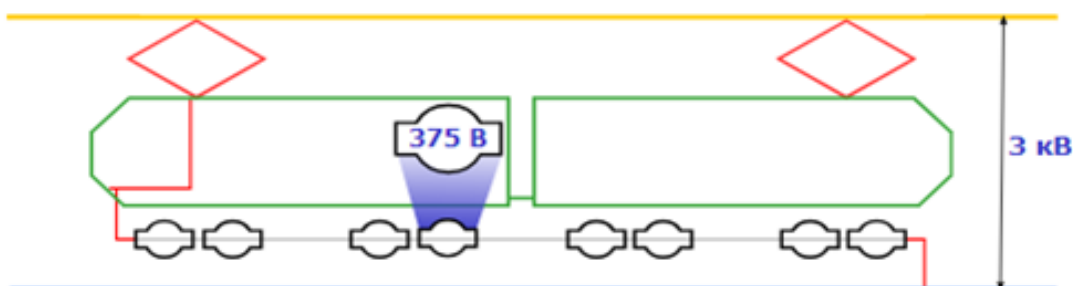
Маючи кілька двигунів, можна регулювати напругу на них, змінюючи схему з'єднання. Якщо при напрузі в контактній мережі 1кВ з'єднати два двигуни послідовно, то на кожен доведеться по 500 В, якщо ж паралельно, то напруга подвоїться і складе 1 кВ, отже, подвоїться і швидкість транспортного засобу. Такий метод економічно обґрунтований (не використовується ніяких додаткових апаратів, крім контакторів, які виконують переключення) і тому застосовується в основному на електровозах, де встановлено багато потужних двигунів. На електровозі ЧС7, призначеному для роботи на лініях, електрифікованих за системою з напругою 3 кВ, встановлено 8 тягових двигунів на номінальну напругу 1,5 кВ кожен. Можливі три схеми їхнього з'єднання (рис.1.2):

Послідовне з'єднання — всі вісім двигунів послідовно, напруга на кожному становить $3000/8 = 375 \text{ В}$;

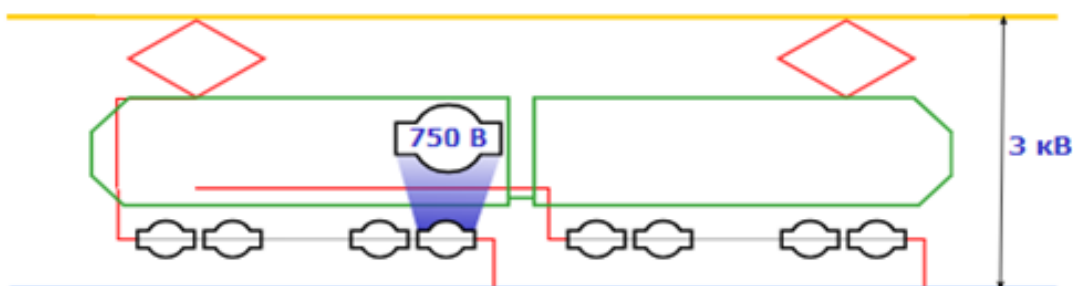
Послідовно-паралельне (воно ж серієсний-паралельне, лат. series — «послідовність») — два паралельні кола по чотири послідовно з'єднаних двигуна в кожному, на кожному двигуні $3000/4 = 750 \text{ В}$;

Паралельне з'єднання (паралельним називається умовно, бо дане паралельне підключення двигунів на напругу 1,5 кВ до мережі на 3 кВ неможливо) — чотири кола по два послідовно з'єднаних двигуна, на кожному двигуні $3000/2 = 1500 \text{ В}$.

Послідовне з'єднання



Паралельно-послідовне з'єднання



Паралельне з'єднання

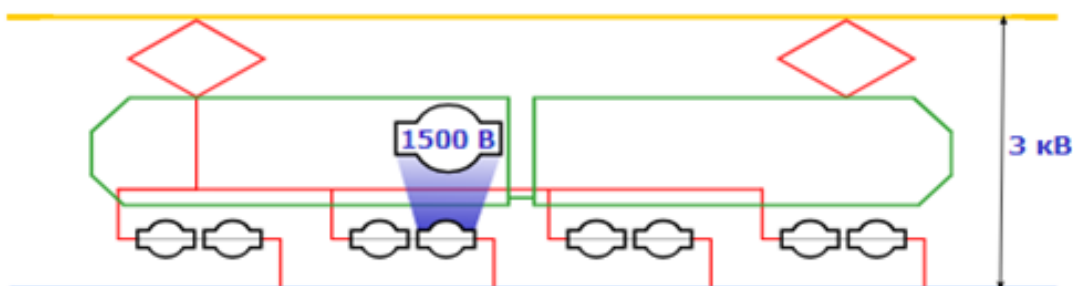


Рисунок 1.2 – Способи з'єднання тягових двигунів на електровозі ЧС7

Другий метод регулювання — зміна опору якорного кола — здійснюється введенням в коло якоря баластних опорів, об'єднаних в пусковий або, у випадку, якщо на транспортному засобі є динамічне гальмування, пуско-гальмівний реостат. Реостат виконаний як окремими резисторами, які перемикаються за допомогою контакторів. З огляду на те, що при реостатному пуску енергія розсіюється на реостаті нагрівання резисторів може призвести до їх перегорання. Тому тривала їзда транспортного засобу на реостатних позиціях реостатного контролера не допускається. Реостати електровозів ЧС7 повітря, яке охолоджує реостати в зимовий час, прямує через заслінку в салон для опалення, а в літній видувається на вулицю.

Третій метод регулювання — ослаблення потоку збудження двигуна. При зменшенні основного магнітного потоку Φ частота обертання двигуна постійного струму зростає. Так як на ЧС7 збудження двигунів послідовне, то для ослаблення потоку паралельно обмотці збудження підключаються шунтуючі резистори і при цьому частина струму проходить по ним в обхід обмотки збудження, Φ знижується, якорний струм і частота обертання зростають.

2 Математичне моделювання двигуна постійного струму 1AL4846dT

2.1 Статистичні характеристики двигуна з послідовним збудженням

Як було сказано в попередньому розділі на електровозі ЧС-7 встановлений двигун постійного струму послідовного збудження. Його функціональна електромеханічна та електрична схеми представлені на рисунку 2.1.

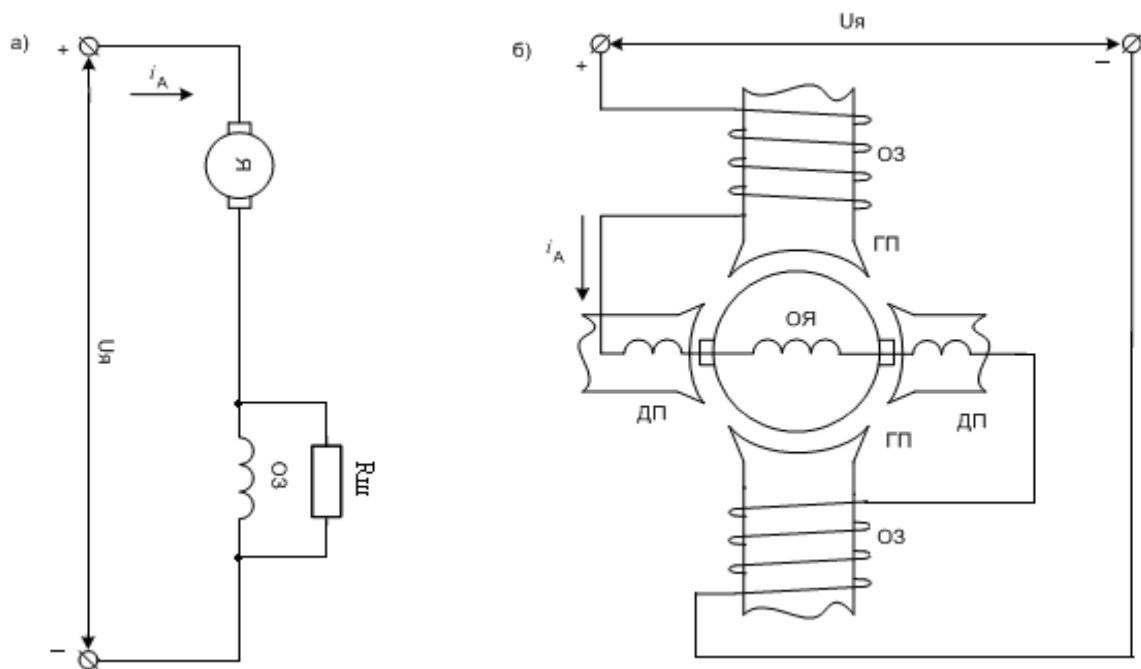


Рисунок 2.1 – Спрощена електрична схема двигуна постійного струму з послідовним збудженням (а) та з'єднання обмоток узагальненої машини (б)

В зв'язку з нелінійністю кривої намагнічування розрахувати природні характеристики двигуна з послідовним збудженням тільки за його номінальними даними неможливо, тому при проектуванні слід користуватися природними характеристиками $\omega = f(I_A)$ і $M = f(I_A)$, що наведені в каталогах (рисунок 2.2). Штучні характеристики можна отримати шляхом зміни активного опору обмоток двигуна, а також зміною прикладеної напруги.

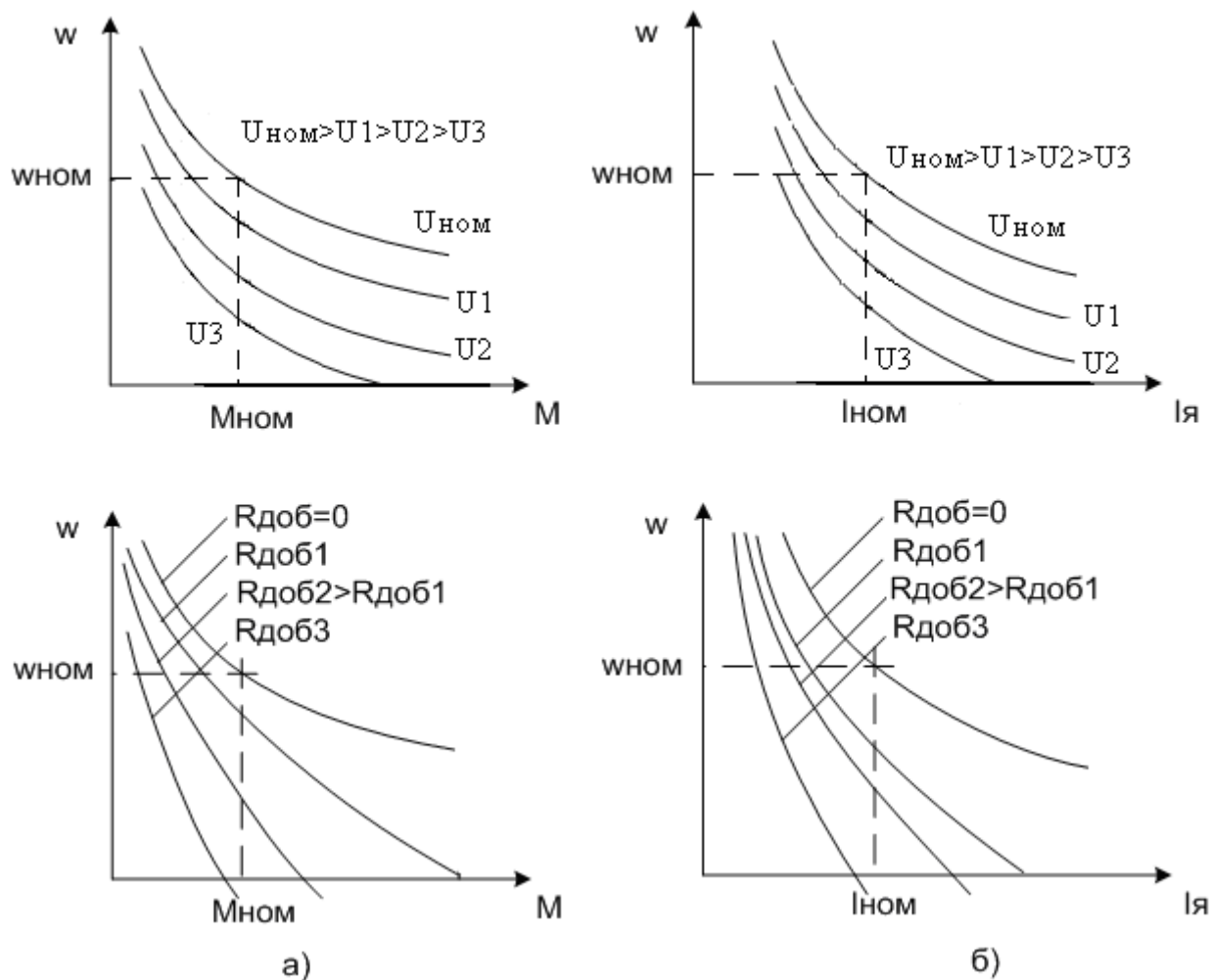


Рисунок 2.2 – Механічні (а) та електромеханічні (б) статичні характеристики двигуна з послідовним збудженням

Статична жорсткість механічної характеристики двигуна послідовного збудження залежить від навантаження. При малому навантаженні двигун має м'яку характеристику, але зі зростанням навантаження модуль жорсткості зростає і при $M \geq M_{ном}$ прямує до сталого значення

2.2 Розрахунки та побудова математичної моделі

Для побудови структурної схеми двигуна постійного струму послідовного збудження використовуємо систему рівнянь, які описують його поведінку:

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = L_{\Sigma} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + r_{\Sigma} \cdot I_{\text{я}} + E \\ M_{\text{дв}} - M_{\text{с}} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ E = C_M \Phi \omega \\ M_{\text{дв}} = C_M \Phi I_{\text{я}} \end{cases} \quad (2.1)$$

де $U_{\text{я}}$ – напруга живлення двигуна;

$I_{\text{я}}$ – струм двигуна;

r_{Σ} – загальний активний опір обмоток двигуна;

ω – кутова частота обертання якоря двигуна;

$M_{\text{дв}}$ – електромеханічний момент двигуна;

Φ – магнітний потік двигуна;

C_M – електромеханічна стала двигуна;

E – електрорушійна сила;

L_{Σ} – загальна індуктивність всіх обмоток двигуна.

На основі цієї системи складаємо структурну схему в вигляді блоків:

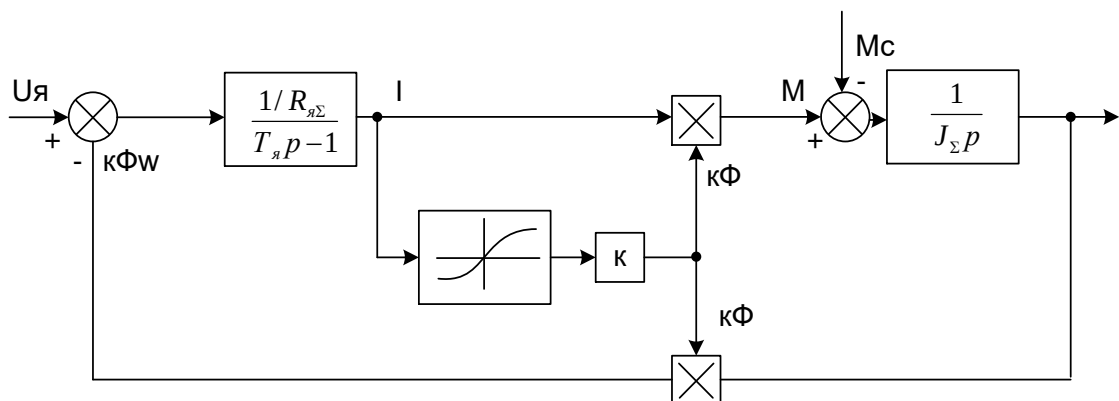


Рисунок 2.3 – Структурна схема двигуна послідовного збудження

Для побудови математичної моделі двигуна розрахуємо всі його невідомі параметри, що входять до структурної схеми.

Розрахунок сумарного опору якірного ланцюга:

$$R_{\text{яе}} = R_{\text{я}} + R_{\text{г.п}} + R_{\text{д.п}} \quad (2.2)$$

де $R_{\text{я}}$ - опір обмотки якоря;

$R_{\text{г.п}}$ - опір котушок головних полюсів;

$R_{\text{д.п}}$ - опір котушок допоміжних полюсів.

$$R_{\text{яе}} = 0,0068 + 0,0053 + 0,004 = 0,0161 \text{ Ом}$$

Розрахунок індуктивності якірного ланцюга:

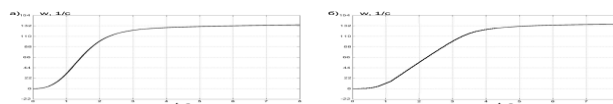
$$L_{\text{я}} = \frac{0,25 U_{\text{н}}^2}{2 p n I_{\text{н}} \pi} \quad (2.3)$$

де $U_{\text{н}}$ - номінальна напруга двигуна;

$I_{\text{н}}$ - номінальний струм двигуна;

n – номінальна частота обертання об/хв;

p – число пар полюсів двигуна.



Розрахунок електромеханічної сталої двигуна:

$$C_{\text{м}} = \frac{pN}{2\pi a} \quad (2.4)$$

де N – число ефективних провідників;

a – число паралельних гілок.

$$C_M = \frac{1050 \cdot 3}{3,14 \cdot 2 \cdot 3} = 167,197$$

Розрахунок магнітного потоку двигуна:

$$\Phi = \frac{M}{C_M \cdot I_H} \quad (2.5)$$

де M - номінальний момент двигуна;

I_H - номінальний струм двигуна.

$$\Phi = \frac{8044}{167,197 \cdot 1100} = 0,044 \text{ Вб}$$

Розрахунок ЕРС двигуна:

$$E = C_M \omega \cdot \Phi \quad (2.6)$$

де ω – кутова швидкість двигуна:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.7)$$

$$\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1210}{60} = 126,647 \text{ c}^{-1}$$

$$E = 167,197 \cdot 126,647 \cdot 0,044 = 901,7 \text{ В}$$

Розрахунок індуктивності обмотки збудження:

$$L_{oz} = \frac{\Psi}{I_z} \quad (2.8)$$

де I_z - струм збудження двигуна;

Ψ – потокозчеплення обмотки збудження.

Для розрахунку індуктивності обмотки збудження L_{oz} потрібно розрахувати спочатку потокозчеплення обмотки збудження Ψ :

$$\Psi = W\Phi\sigma \quad (2.17)$$

де W – кількість витків обмотки збудження;

Φ – магнітний потік двигуна;

σ - коефіцієнт розсіювання полюсів.

$$\Psi = 10 \cdot 0,044 \cdot 1,2 = 0,528$$

$$L_{oz} = \frac{0,528}{466} = 0,00113 \text{ Гн}$$

Еквівалентна стала часу для математичної моделі розраховується за формулою:

$$T_e = \frac{L_{я} + L_{oz}}{R_{я} + R_{oz}}, \quad (2.9)$$

де $L_{я}$ – індуктивність якірного ланцюга;

L_{oz} – індуктивність обмотки збудження;

$R_{я}$ - опір якірного ланцюга;

R_{oz} - опір обмотки збудження.

$$T_e = \frac{0,000858 + 0,00113}{0,0161} = 0,123 \text{ c}$$

Розрахунок моменту інерції якоря:

$$J = \frac{mR^2}{2}, \quad (2.10)$$

де m – маса якоря;

R – радіус якоря.

$$J = \frac{1490 \cdot 0,37^2}{2} = 101,99 \text{ кг м}^2$$

На основі структурної схеми (рисунок 2.4), а також використовуючи всі розраховані параметри будуюмо математичну модель привода постійного струму. На рисунку 3.5 представлена математична модель електропривода постійного струму з двигуном послідовного збудження, зроблена за допомогою ПЗ Matlab, яка моделює прямий пуск, а також пуск зі ступеневим підвищенням напруги.

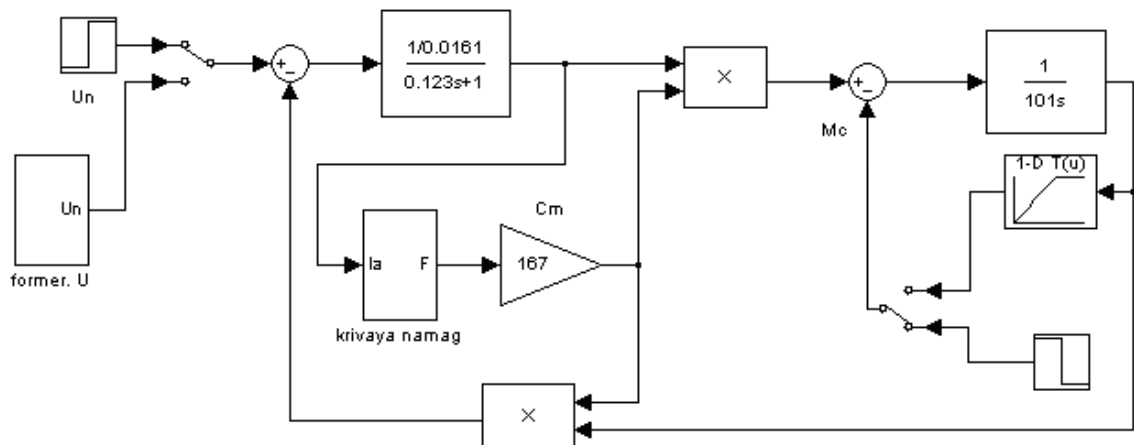


Рисунок 2.4 – Математична модель електропривода постійного струму

На рисунках 2.5 та 2.6 показані відповідно характеристики моменту та швидкості електродвигуна при прямому пуску та при ступеневому підвищенні напруги з номінальним навантаженням.

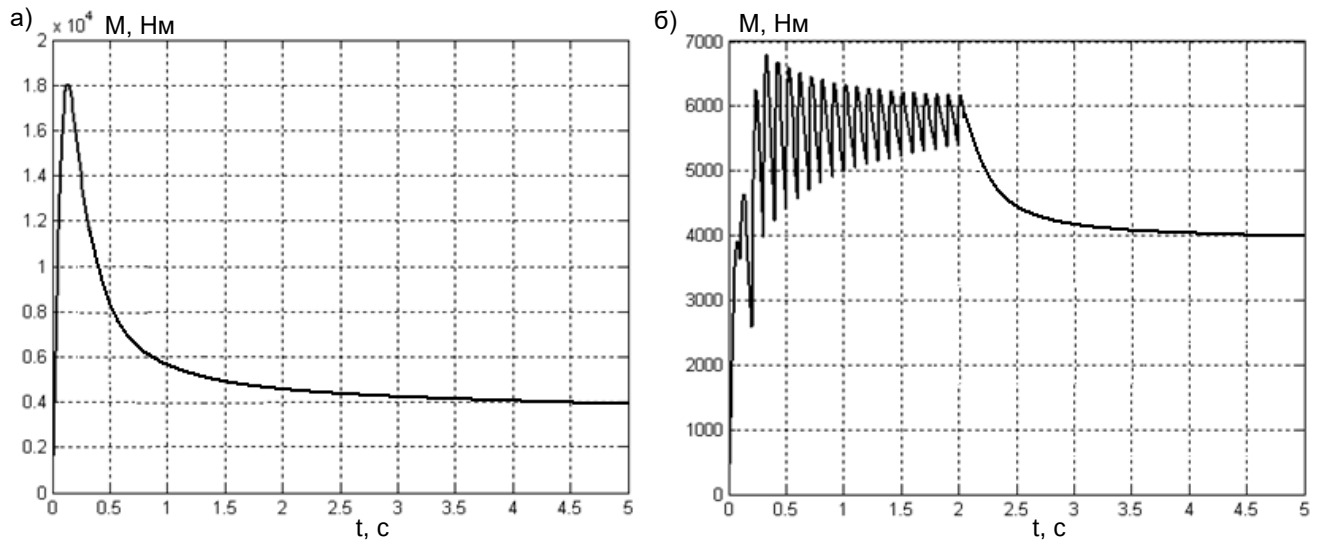


Рисунок 2.5 – Характеристика моменту електродвигуна: а) – при прямому пуску, б) – при ступеневому підвищенні напруги

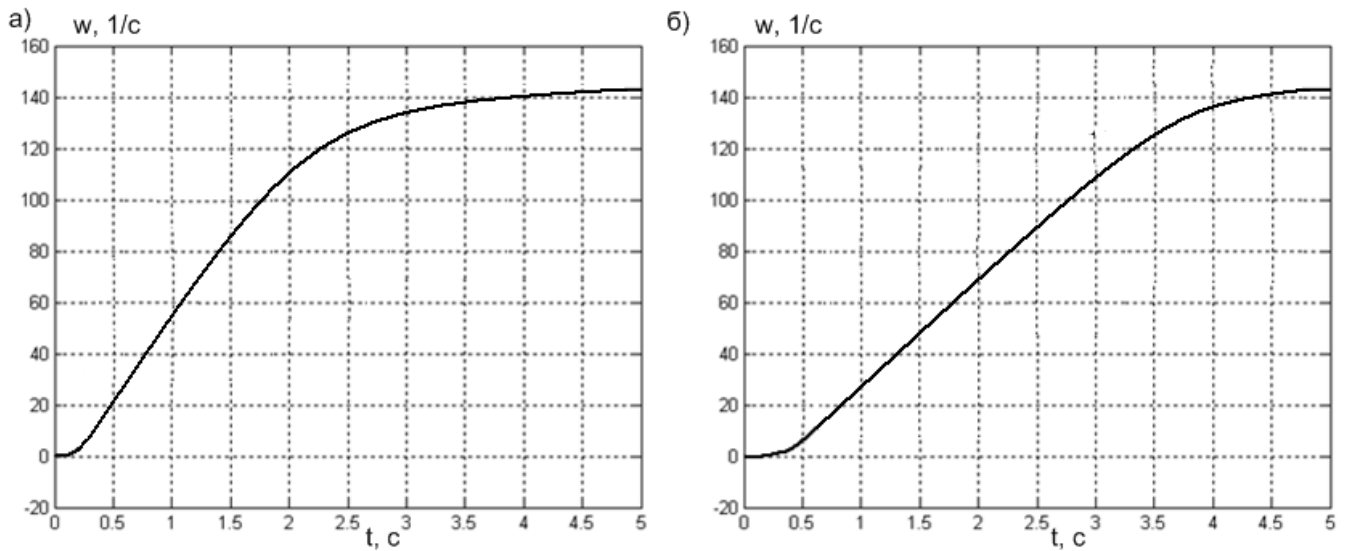


Рисунок 2.6 – Характеристика швидкості двигуна а) – при прямому пуску, б) – при ступеневому підвищенні напруги

В подальшому для уніфікації моделі отримана раніше структура маскується та узагальнюється, після чого модель двигуна матиме наступний вигляд:

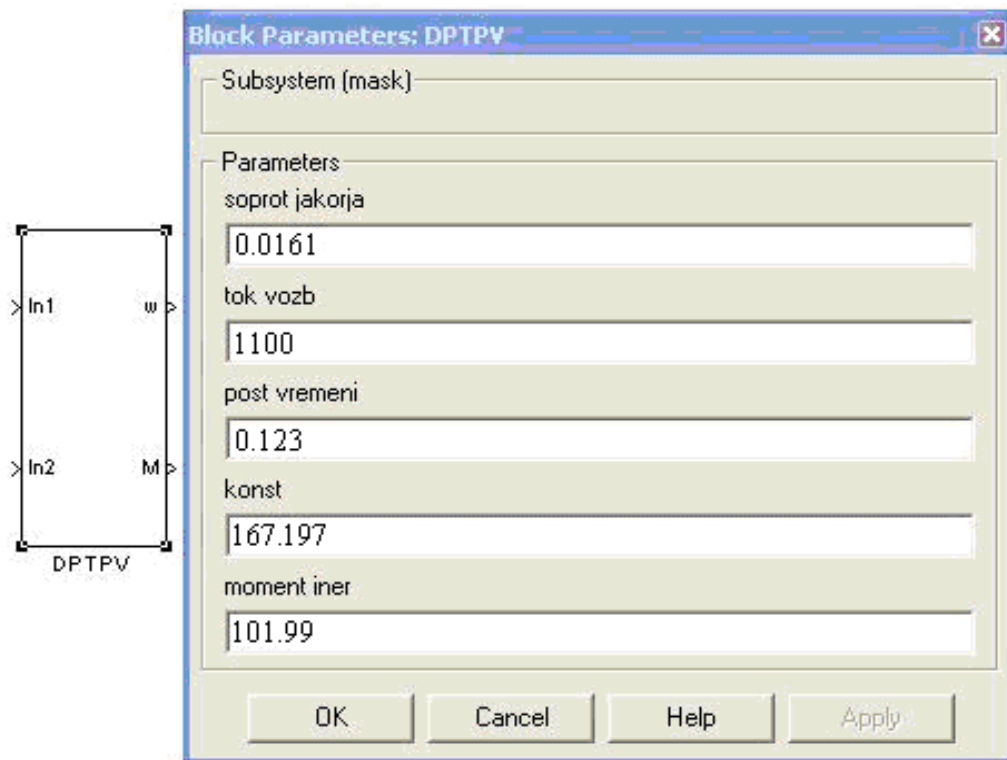


Рисунок 2.7 - Маска моделі двигуна постійного струму

Тобто в моделі за схемою 2.1 всі числові дані в блоках замінені на літерні, а відповідні їм числові значення вводяться в діалогове вікно маски, що з'являється при подвійному кліку по блоку «DPTPV». Таким чином отримано узагальнену модель, що дозволяє отримувати характеристики довільної машини постійного струму за означеними параметрами.

3 Математичне моделювання руху потяга

3.1 Математична модель реостатно-контакторної системи керування

Для розрахунку математичної моделі нам потрібні декілька формул, а саме залежності основного опору руху рухомого складу.

Електровоз на ланковому шляху тяга та електричне гальмування:

$$w_0' = 1,9 + 0,01 \cdot v + 0,0003 \cdot v^2 \quad (3.1)$$

Чотирьохвісні завантажені вантажні вагони:

$$w_0'' = 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot v + 0,0025 \cdot v^2}{m_{kn}} \quad (3.2)$$

Сила опору:

$$W_0 = \frac{w_0' \cdot m_e + w_0'' \cdot m_c}{N_{\partial g}} \quad (3.3)$$

Момент опору:

$$M_{on} = \frac{W_0 \cdot D_{\kappa}}{2 \cdot \mu \cdot \eta_{nep}} \quad (3.4)$$

Лінійна швидкість електрорухомого складу:

$$v = \frac{\omega \cdot D_{\kappa}}{2 \cdot \mu} \quad (3.5)$$

де w_0' - питомий опір електрорухомого складу;

m_e - вага електрорухомого складу, кН;

w_0'' - питомий опір складу;

$N_{\text{дв}}$ - кількість електричних двигунів;

W_0 - сила опру, що приходить на один двигун електрорухомого складу, Н;

$M_{\text{оп}}$ - момент опору, що приходить на один двигун;

D_{κ} - діаметр колеса, м;

μ - співвідношення редуктора;

$\eta_{\text{пер}}$ - ККД редуктора;

ω - кутова швидкість двигуна;

v - лінійна швидкість ЕРС.

На базі отриманих рівнянь складаємо математичну модель руху потяга з реостатно контакторною системою керування, яка представлена на рисунку 3.1.

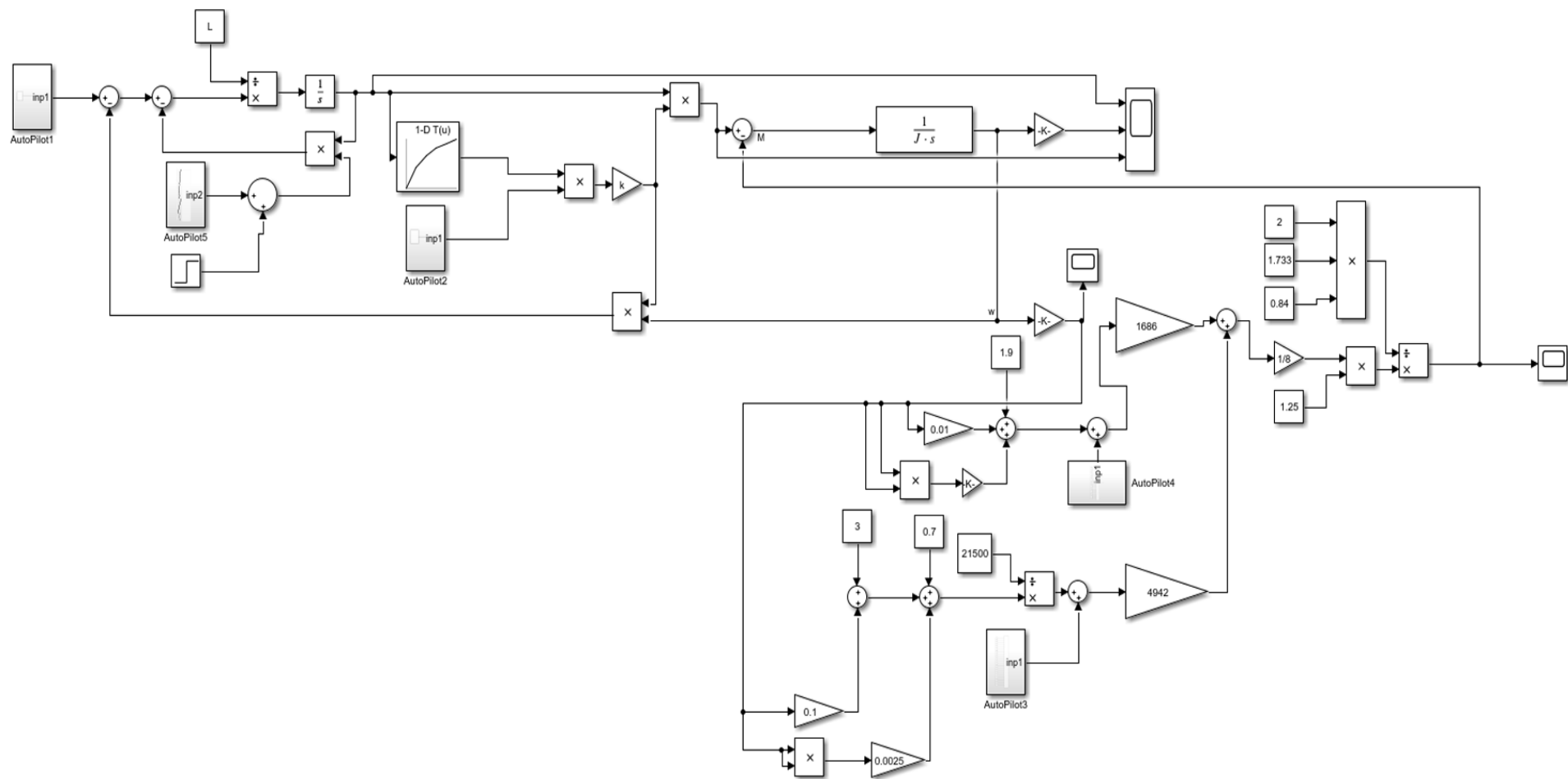


Рисунок 3.1 – Математична модель руху потяга з реостатно-контакторною системою керування

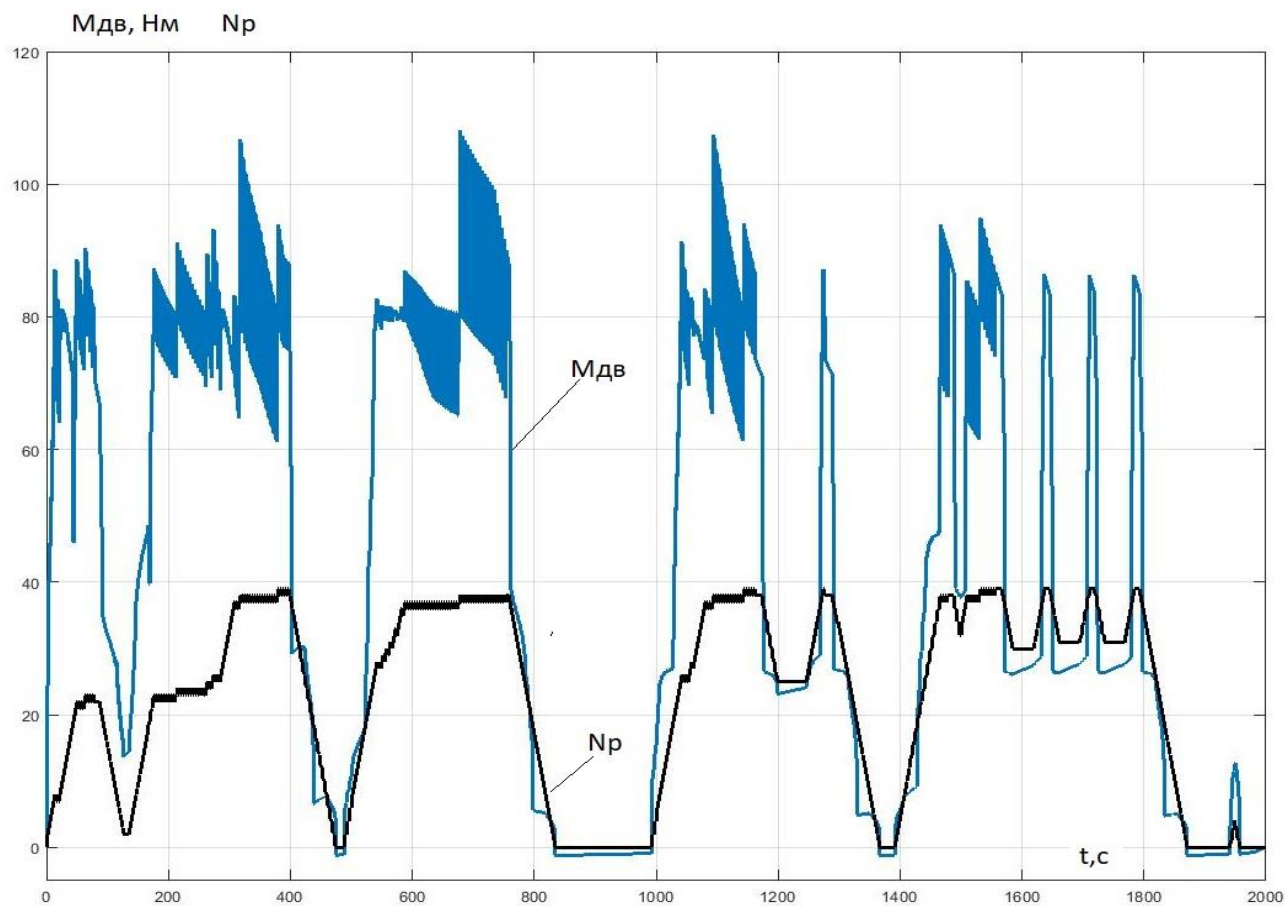


Рисунок 3.2- Характеристика моменту двигуна та номера позиції контролера машиніста

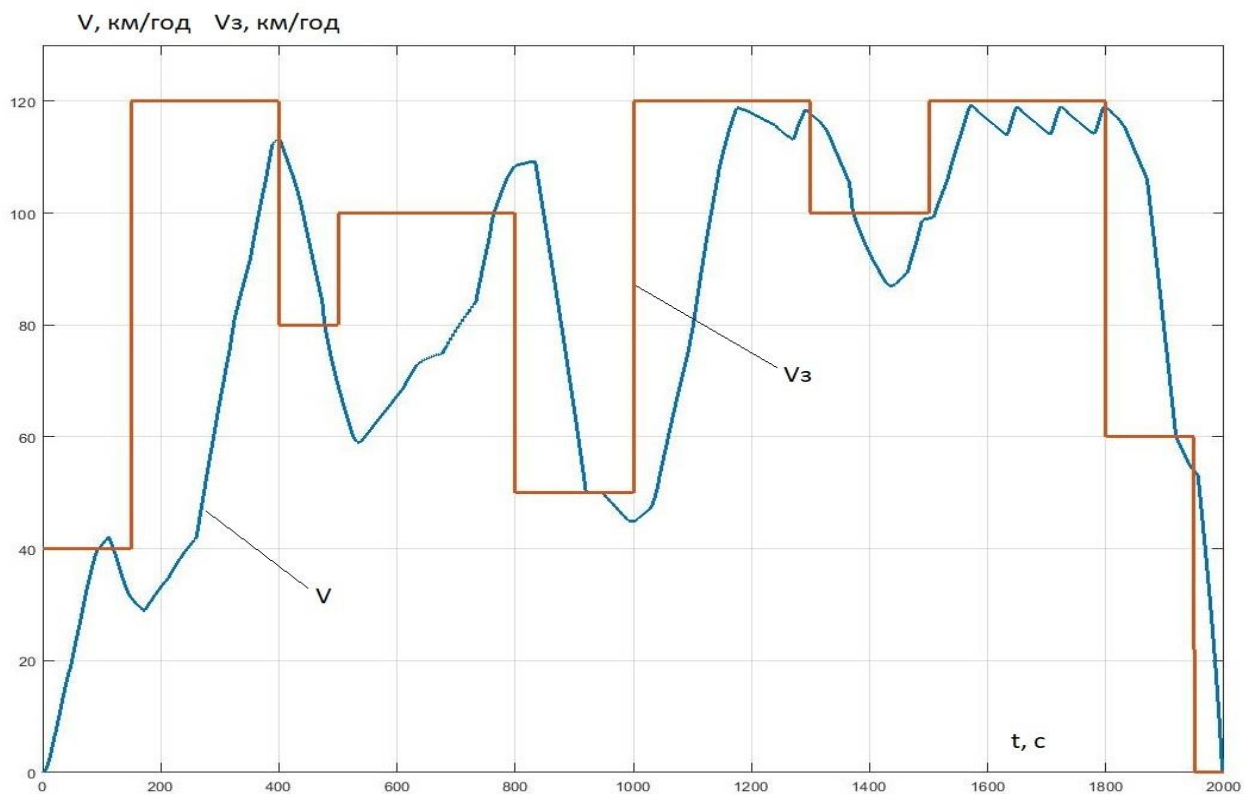


Рисунок 3.3 - Характеристики швидкості руху потяга (фактична та задана)

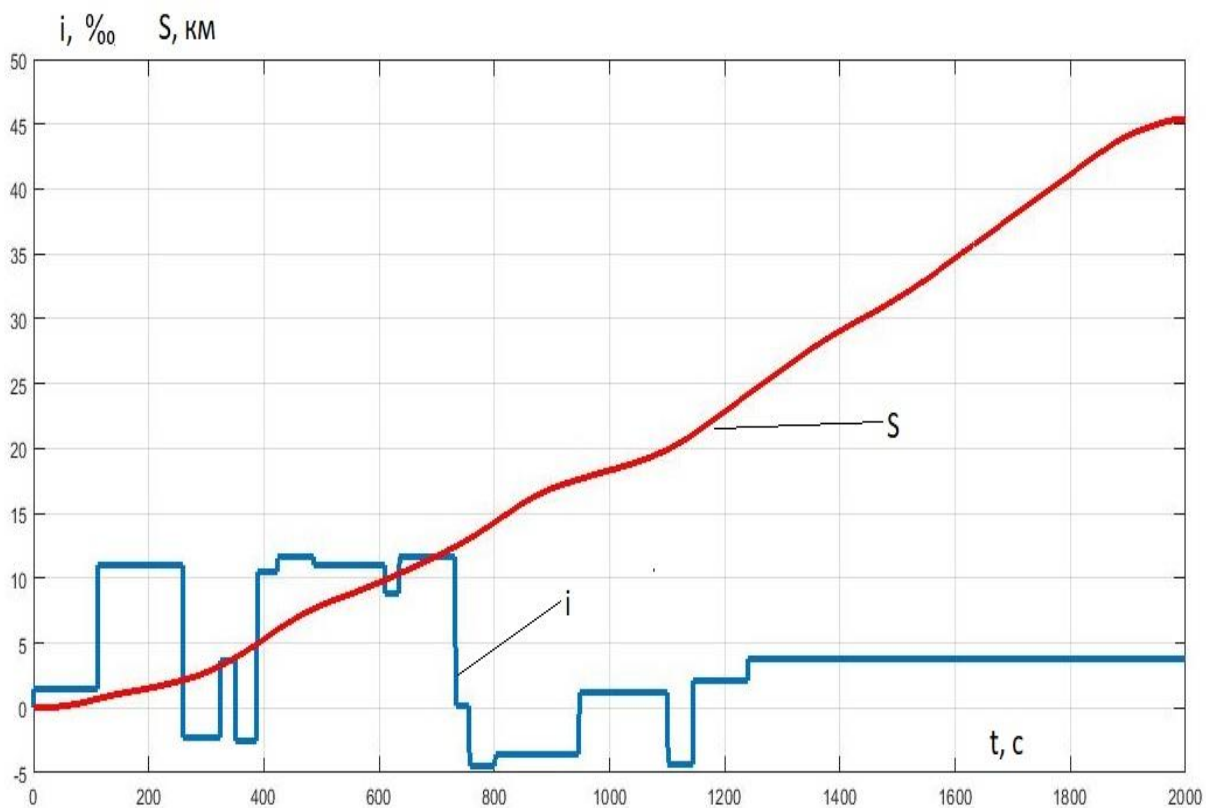


Рисунок 3.4 – Характеристика переміщення поїзда

3.2 Математична модель двухконтурної системи підлеглого керування

Регулювання і стабілізація швидкості обертання є однією з найбільш часто зустрічаються завдань автоматизованого приводу.

Найбільш характерним для систем регулювання швидкості (СРШ) є тривалий режим роботи, хоча можливий і короткочасний режим, наприклад, в верстатах з програмним управлінням, томографах і різних виконавчих механізмах. Основними параметрами, що характеризують якість СРС, є: встановлена і динамічна похибки, діапазон регулювання, якість динаміки. Перераховані якісні характеристики тісно пов'язані. Наприклад, хороші динамічні властивості сприяють підвищенню динамічної точності СРС, а зниження діапазону спрощує вирішення питань підвищення інших якісних показників. Найбільш важливим показником є точність підтримки (стабілізації) заданого значення швидкості, про яку судять по відхиленню швидкості від заданої в сталому режимі. Найчастіше для оцінки статичної точності використовують відносну оцінку $\delta\epsilon = \Delta\omega / \omega_0$, де $\Delta\omega = \omega_0 - \omega$ - відхилення швидкості від заданої, ω_0 - задане значення швидкості. Відносна похибка може бути виражена також у відсотках.

Зміна передавального коефіцієнта веде до зміни динамічних властивостей системи, що, в кінцевому рахунку, може позначитися на динамічній точності. В сучасних імпульсних або цифрових системах при інтегральному управлінні забезпечується досить висока статична точність. У зв'язку з цим важливим показником виявляється показник динамічної точності, пов'язаний з оцінкою миттєвих відхилень швидкості на різних часових інтервалах.

Миттєве відхилення швидкості залежить від ряду факторів: динамічна зміна моменту і напруги; параметричні збурення в двигуні, перетворювачі і механічній передачі; похибки вимірювання швидкості; перешкоди в каналі управління. Якщо один із зазначених факторів виявляється більш значним у порівнянні з іншими, то точність визначається тільки з урахуванням його. В іншому випадку треба враховувати всі фактори. Динамічна точність може оцінюватися так само, як і

статична, тобто по відношенню миттєвого відхилення швидкості до заданої, або середньоквадратичного відхилення.

Залежно від вимог і особливостей застосування СРШ виконуються з різними електродвигунами, інформаційними і керуючими пристроями. По виду сигналів завдання і вимірювання швидкості, виявлення або обчислення неузгодженості розрізняються аналогові, імпульсні, цифрові і аналого-цифрові системи. Є відмінності і в силовій частині приводу у виборі перетворювача напруги, типу двигуна, кінематичної схеми передачі. Загальні рекомендації тут дати неможливо. Однак можна відзначити, що для високоточних систем необхідно застосовувати добре керовані двигуни постійного струму (колекторні або вентильні) з імпульсним керуванням і використовувати безредукторного кінематичну схему.

В силу достоїнств систем підпорядкованого регулювання, вони знаходять застосування в системах регулювання швидкості. Функціональна схема такого приводу представлена на рис. 3.5, де позначено РТ - регулятор струму, ДТ - датчик струму, БО - блок обмеження, $U_{от}$ – сигнал зворотного зв'язку по струму.

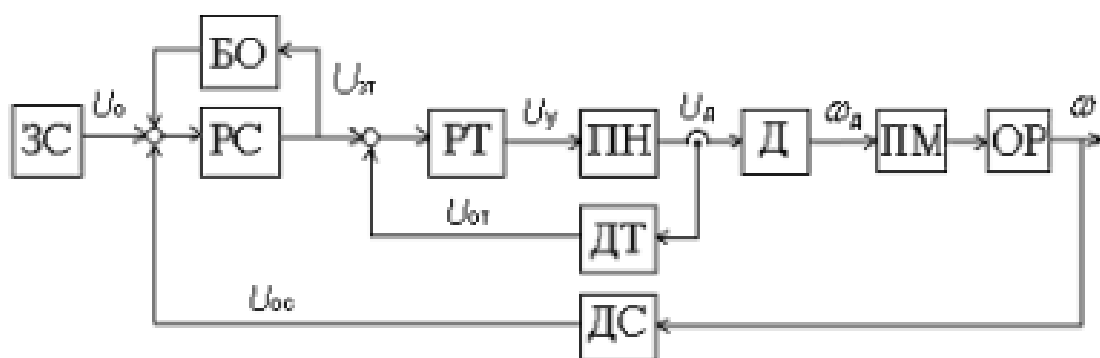


Рисунок 3.5 - Функціональна схема системи регулювання швидкості з подчиненно-струмовим керуванням

Обмеження по струму в даній системі здійснюється шляхом обмеження вихідної напруги регулятора швидкості, тобто обмеженням сигналу завдання струму $U_{ст}$ за рахунок охоплення регулятора швидкості нелінійної зворотним

зв'язком (блок БО), як це показано на рис. 3.5. Структурна схема системи має вигляд рис. 3.6.

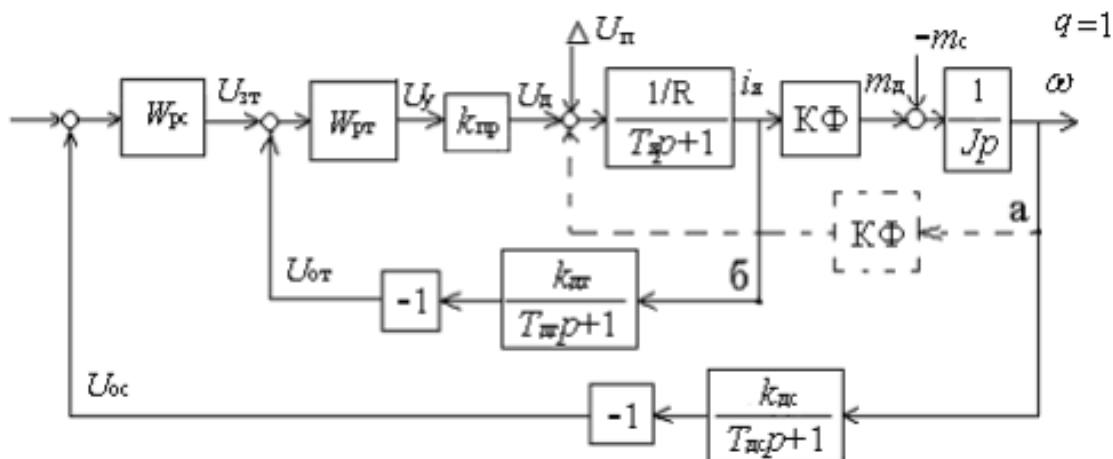


Рисунок 3.6 - Структурна схема системи підлеглого регулювання швидкості

При описі налаштування регулятора струму, прийнемо ток якоря безперервним, і не будемо враховувати обмеження струму. Відмінність структурної схеми реального приводу рис. 3.6 від ідеалізованої схеми на якій пояснювався принцип підлеглого регулювання, полягає в тому, що на вхід динамічного ланки, відповідного якірного ланцюга, діє зворотний зв'язок по ЕРС обертання e . Припустивши, $\Delta u_{\pi} = 0$, $m_c = 0$, перенесемо на структурній схемі рис. 3.15 вихід контура швидкості (точка «а») на вихід контура струму (точка «б»). Передавальну функцію виникаючого в контурі струму об'єкта с прямим каналом, який має передавальну функцію $1 / (R_c (T_{я}p + 1))$ та каналом обратного зв'язку $-(K\Phi)^2 / (Jp)$ отримаємо у вигляді співмножника, що відображає вплив зворотного зв'язку по ЕРС двигуна

$$W_{об}(p) = \frac{1}{R_c(T_{я}p+1)(1+\frac{(K\Phi)^2}{JR_cp} \cdot \frac{1}{T_{я}p+1})} = \frac{1}{R_c(T_{я}p+1)} A(p), \quad (3.6)$$

$$A(p) = \frac{T_{я}p(T_{я}p+1)}{T_{я}p(T_{я}p+1)+1} \quad (3.7)$$

Передавальна функція розімкнутого токового контуру отримає вигляд

$$W_i(p) = W_{pm}(p) \frac{k_{np} k_{\partial m}}{(T_{\partial m} p + 1)(T_{я} p + 1) R_c} = A(p) \quad (3.8)$$

Якщо для налаштування на оптимум по модулю використовувати ПІ-регулятор струму, вибравши

$$k_{pm} = T_{я} R_c / (2 T_{\partial m} k_{np} k_{\partial m}), \quad \tau_{pm} = T_{я} \quad (3.9)$$

Можна записати як $W_i(p) = W_i^{onm}(p) A(p)$.

$$W_i^{onm}(p) = \frac{1}{2 T_{\partial m} p (T_{\partial m} p + 1)} \quad (3.10)$$

Тут передавальна функція розімкнутого токового контуру, налаштованого на оптимум по модулю при нехтуванні впливом зворотного зв'язку по ЕРС двигуна.

Найчастіше така зневага можливо, так як вплив е.р.с. можна розглядати як обурення для контуру регулювання струму. Причому швидкість зміни е.р.с. визначається електромеханічної сталої двигуна, а швидкодія контуру регулювання швидкості, як випливає з виразу, визначається постійної часу датчика струму, яка менше постійної якорного ланцюга і, отже, багато менше електромеханічної сталої. Таким чином, вказане обурення з е.р.с. може бути відпрацьовано контуром регулювання струму без динамічної помилки, і

його впливом на динамічні властивості приводу можна знехтувати, прийнявши $A(p) = 1$ і вважаючи, що струм якоря визначається напругою завдання струму U_{zt} , що надходять з виходу регулятора швидкості. Для пояснення настройки регулятора

швидкості уявімо передавальний функцію постійної частини контуру швидкості у вигляді

$$W_{nc}(p) = W_{iz}(p) = \frac{k_{oc}}{T_{oc}p+1} \frac{K\Phi}{Jp} \quad (3.11)$$

де передавальну функцію замкнутого контуру регулювання струму отримаємо з виразу відповідно до співвідношення

$$W_{iz}(p) = \frac{W_i^{onm}(p)}{W_i^{onm}(p)+1} \frac{T_{om}p+1}{k_{om}} = \frac{1}{2T_{om}^2 p^2 + 2T_{om}p+1} \frac{T_{om}p+1}{k_{om}} \quad (3.12)$$

$$W_{iz}(p) \approx \frac{1}{k_{om}} \frac{1}{T_{iz}p+1} \quad (3.13)$$

Оскільки в даному випадку об'єкт контуру швидкості є інтегруючим ланкою з передавальною функцією, то для настройки на оптимум по модулю слід застосовувати пропорційний регулятор з передавальним коефіцієнтом.

$$k_{pc}^{onm} = \frac{T_M}{2T_{\mu\omega} \frac{R_c}{(K\Phi)^2} \frac{k_{ДС}}{K\Phi}} \quad (3.14)$$

Оскільки величина $R_c/(K\Phi)^2$ характеризує помилку розімкненої системи, тобто падіння швидкості двигуна на природній характеристиці, то ясно, що в замкнутій системі помилка буде тим менше, чим менше $T_{\mu\omega}$ по порівнянню з T_M . Якщо ця помилка велика, контур можна налаштувати на симетричний оптимум, застосувавши ПІ-регулятор швидкості з $\tau_{pc} = 4T_{\mu\omega}$ і значенням k_{pc} , визначеним раніше.

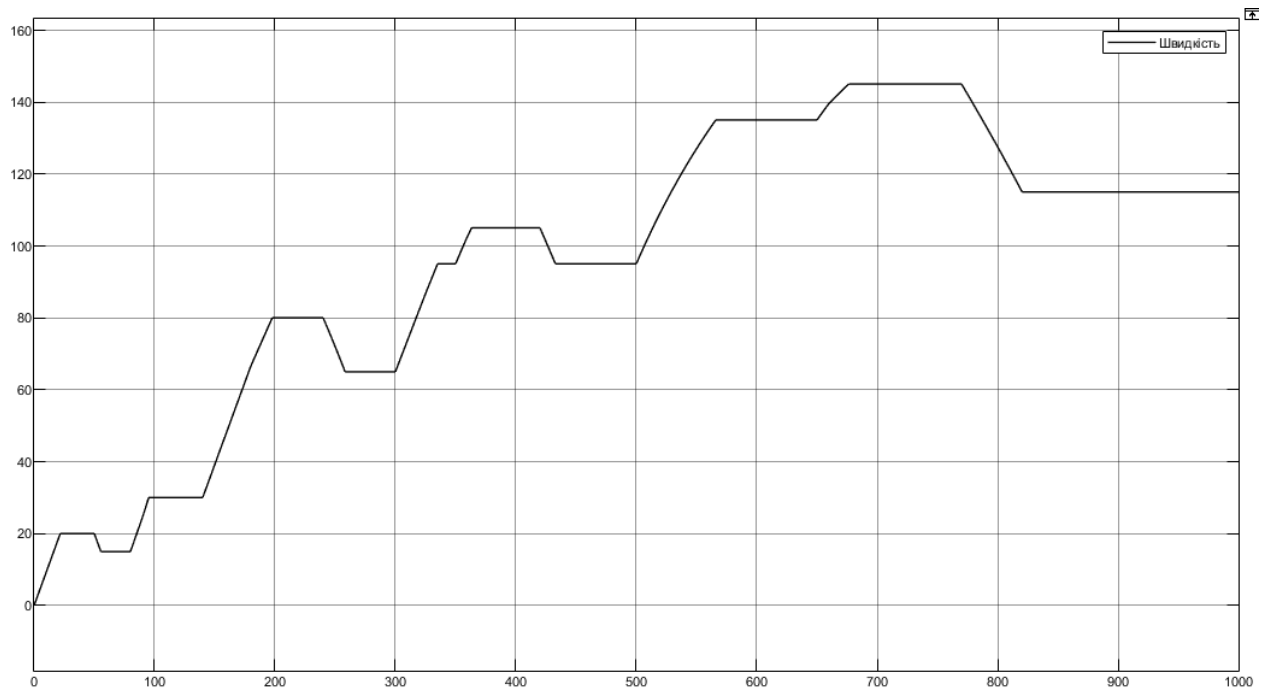


Рисунок 3.8 - Характеристика швидкості руху поїзда

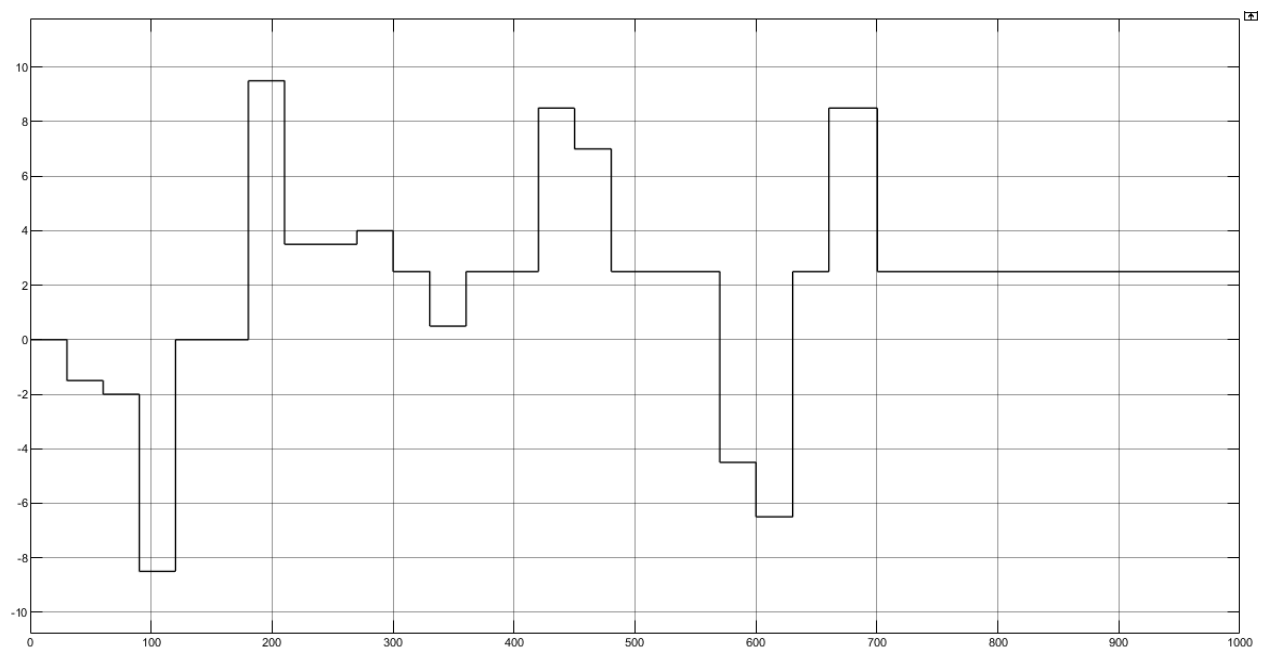


Рисунок 3.9 - Характеристика профілю шляху

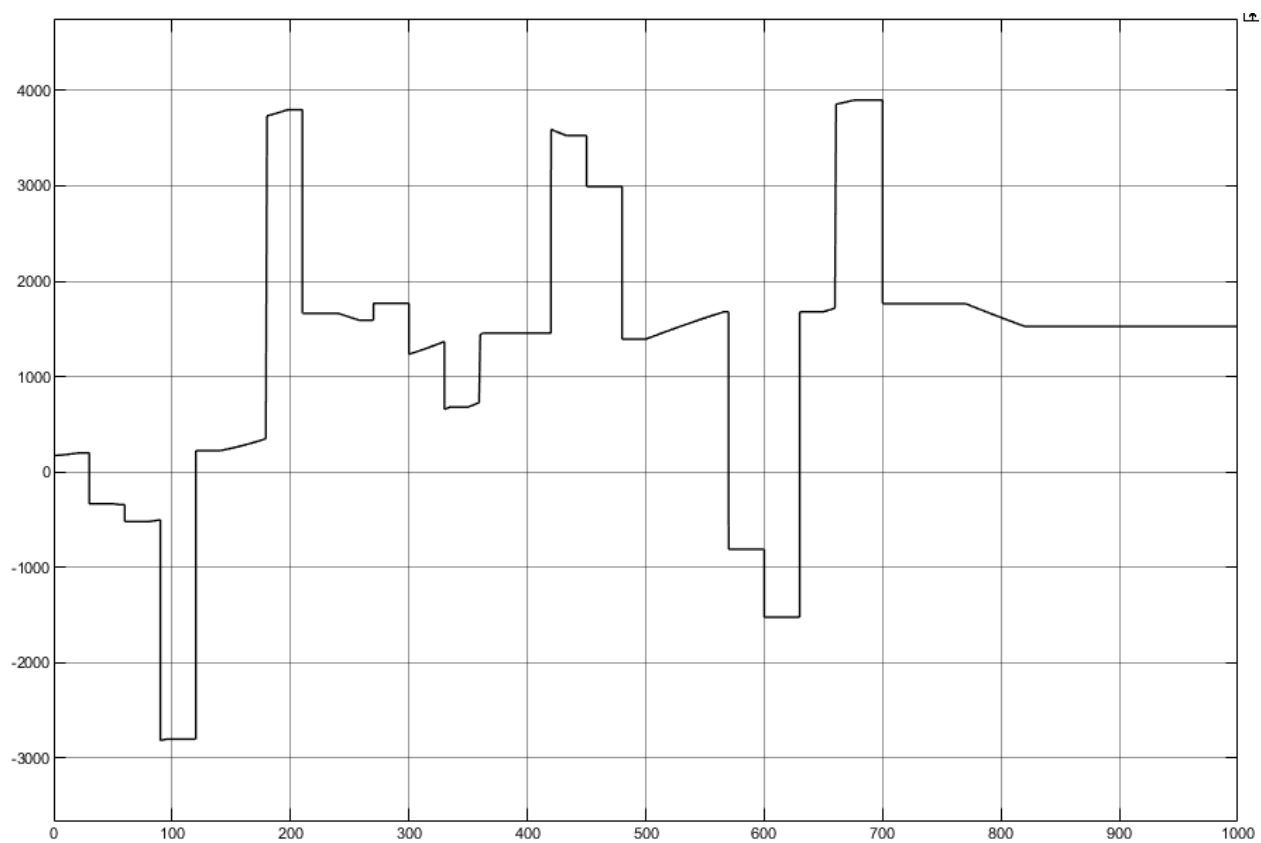


Рисунок 3.10 - Характеристика моменту опору

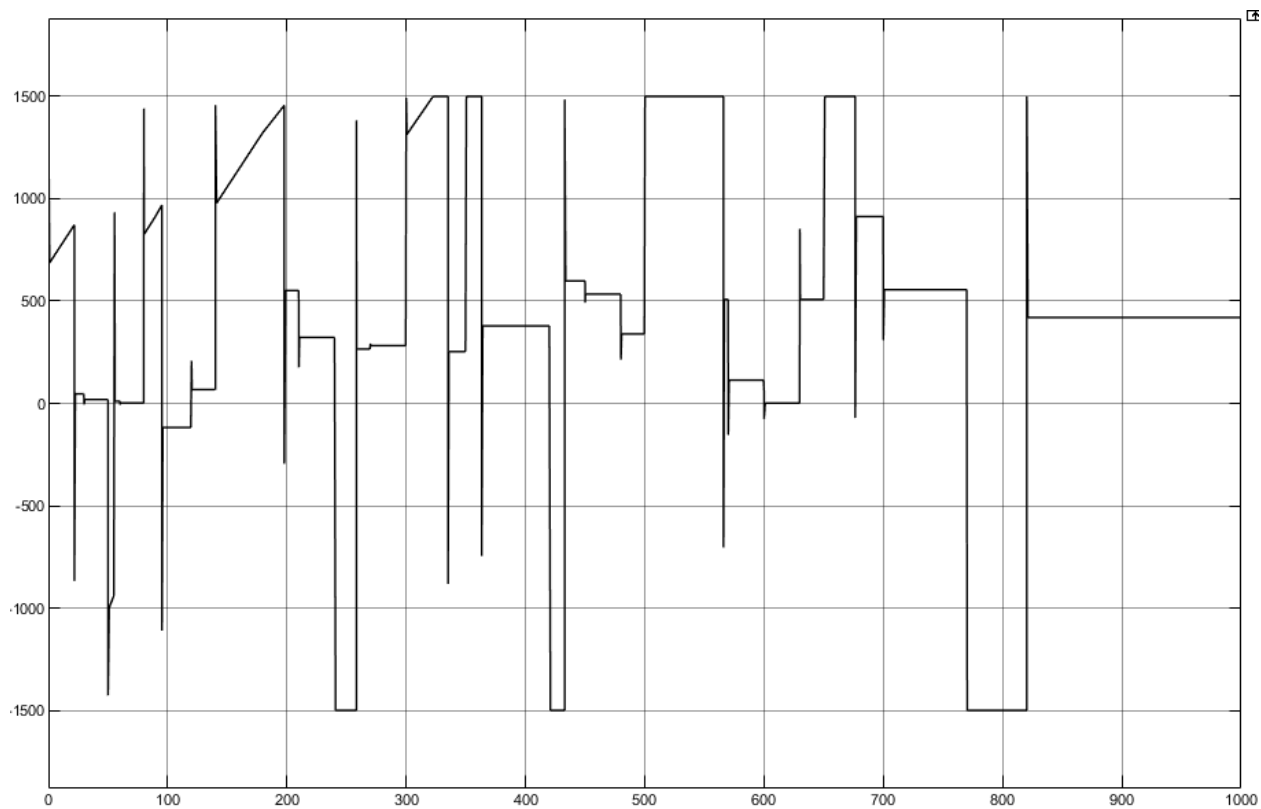


Рисунок 3.11 - Характеристика струму

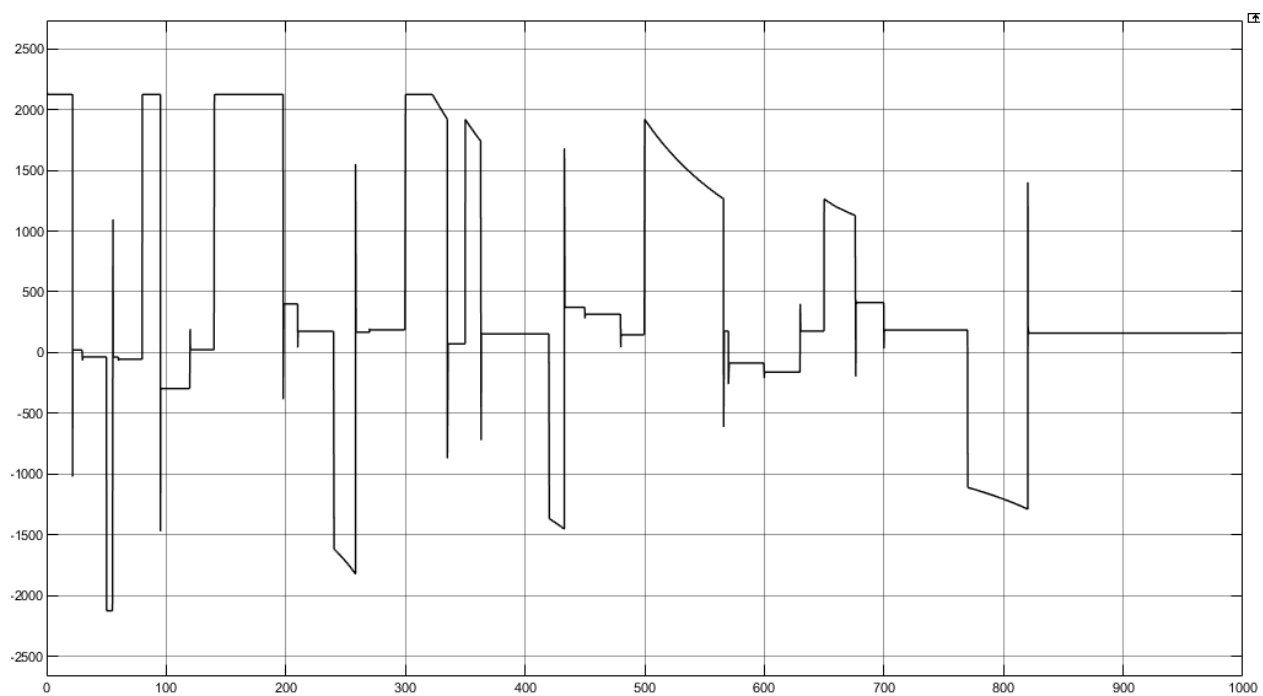


Рисунок 3.12 - Характеристика моменту двигуна

4 Асинхронні двигуни та їх дослідження в якості тягових на математичній моделі

4.1. Математичне моделювання асинхронного двигуна

Для спрощення математичного опису машин змінного струму дуже часто використовують еквівалентне перетворення координат, в основі якого лежить припущення про повну симетрію електричної машини, а також поняття узагальненого вектора. Введемо ортогональну систему координат статора α, β , одна вісь якого (наприклад, α) співпадає з віссю A для сигналів статора, а друга (β) є ортогональною до неї (повернутою на кут 90° проти часової стрілки).

При дослідженні динамічних режимів асинхронних двигунів використовуються двофазні математичні моделі, які адекватно відображають процеси, що протікають в реальній машині. Найбільш загальною формою математичного опису двофазних моделей є система диференціальних і алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases}
U_{\alpha s} = \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} + r_s \cdot i_{\alpha s} + \psi_{\beta s} \cdot \omega_k \\
U_{\beta s} = \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} + r_s \cdot i_{\beta s} - \psi_{\alpha s} \cdot \omega_k \\
U_{\alpha r}' = \frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} + r_r' \cdot i_{\alpha r}' + \psi_{\beta r} \cdot (\omega_k - \omega) \\
U_{\beta r}' = \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} + r_r' \cdot i_{\beta r}' - \psi_{\alpha r} \cdot (\omega_k - \omega) \\
M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_{\alpha s} \cdot i_{\beta s} - \psi_{\beta s} \cdot i_{\alpha s}) \\
M - M_c = \left(\frac{J}{p}\right) \cdot \frac{d\omega}{dt} \\
i_{\alpha s} = A \cdot (\psi_{\alpha s} \cdot L_r' - \psi_{\alpha r} \cdot L_\mu) \\
i_{\beta s} = A \cdot (\psi_{\beta s} \cdot L_r' - \psi_{\beta r} \cdot L_\mu) \\
i_{\alpha r} = A \cdot (\psi_{\alpha r} \cdot L_r' - \psi_{\alpha s} \cdot L_\mu) \\
i_{\beta r} = A \cdot (\psi_{\beta r} \cdot L_r' - \psi_{\beta s} \cdot L_\mu)
\end{cases} \quad (4.1)$$

де ω_k – швидкість обертання координатної ортогональної системи, в якій досліджується двофазна модель, а коефіцієнт A розраховується за формулою:

$$A = \frac{1}{(L_s \cdot L_r - L_\mu^2)} \quad (4.2)$$

При використанні нерухомої системи координат $\omega_k = 0$. Для моделювання використана Т – образна схема заміщення фази двигуна.

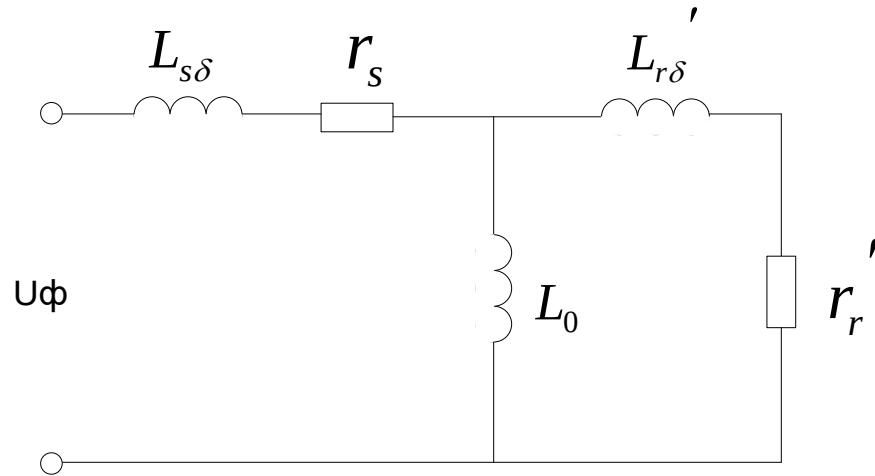


Рисунок 4.4 - Т-образна схема заміщення фази двигуна

$L_{s\delta}$ – індуктивність розсіяння обмотки статора;

$L_{r\delta}'$ – приведена індуктивність обмотки ротора;

L_0 – індуктивність контуру, що намагнічує;

r_s – активний опір статора;

r_r' – приведений активний опір ротора.

При дослідженні динамічних режимів взаємний вплив трьох фаз двигуна характеризується збільшенням взаємної індукції в $3/2$ разу в порівнянні з індуктивністю контуру, що намагнічує:

$$L_{\mu} = \frac{3}{2} \cdot L_0. \quad (4.3)$$

Відповідно повна індуктивність статора:

$$L_s = L_{s\delta} + \frac{3}{2} \cdot L_0 \quad (4.4)$$

Повна індуктивність ротора:

$$L_r' = L_{r\delta}' + \frac{3}{2} \cdot L_0. \quad (4.5)$$

Для побудови моделі, як і в попередньому розділі, використаний блоковий метод. Проте тут в підсистемі «Asynchronous machine» як блоки реалізується одне з рівнянь системи (5.1). Таким чином маємо дев'ять основних блоків:

- блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення статора на вісь β ;
- блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення статора на вісь α ;
- блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення ротора на вісь β ;
- блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення ротора на вісь α ;
- блок, що моделює проекцію вектора струму статора на вісь β ;
- блок, що моделює проекцію вектора струму статора на вісь α ;
- блок, що моделює проекцію вектора струму ротора на вісь β ;
- блок, що моделює проекцію вектора струму ротора на вісь α ;
- блок, що моделює електромагнітний момент на валу ротора;

Щоб спростити читабельність моделі застосовані блоки «goto» і «from», що дозволило прибрати численні лінії зв'язки, що неминуче ускладнюють модель в подібних випадках.

$$L = \frac{X}{\omega} \quad (4.6)$$

З причини того, що із зміною частоти живлячої напруги згідно формули 5.6 змінюватимуться значення індуктивностей ротора, статора і намагнічуючого контуру, а отже і решти майже всіх параметрів двигуна, то в

моделі застосований розрахунок цих параметрів в підсистемах шляхом відстежування зміни частоти живлячої напруги в перетворювачі частоти. Значення цієї частоти за допомогою блоку «goto» подається у відповідні блоки. За базову частоту узята частота контактної мережі 50Гц. При використанні динамічного гальмування, як відомо, на одну з фаз подається постійна напруга. В цьому випадку частота рівна нулю, що викликає помилку «ділення на нуль». Для уникнення цього спеціальним блоком в перетворювачі при динамічному гальмуванні штучно значення частоти приймається рівним 50 Гц, начебто це було при початковому завданні частоти при ручному розрахунку параметрів моделі.

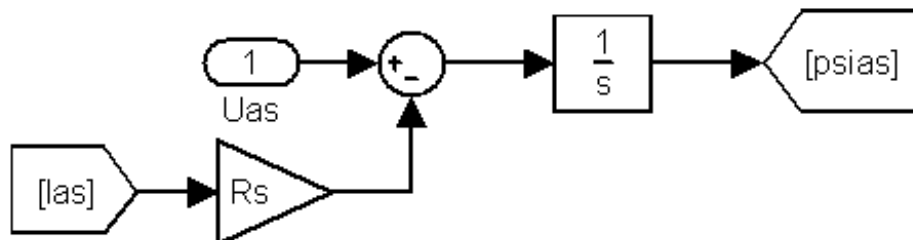


Рисунок 4.5 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення статора на вісь α

У цьому блоці реалізовано перше рівняння системи (5.1):

$$\frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} = U_{\alpha s} - r_s \cdot i_{\alpha s} \quad (4.7)$$

Від значення входу «Uas» віднімається значення величини проекції струму статора на вісь α (вхід «Ias»), помножене на активний опір статора. Результат інтегрується і подається на вихід «psias».

Реалізація другого рівняння системи 5.1 показана на рисунку 5.6.

$$\frac{d\psi_{\beta s}}{dt} = U_{\beta s} - r_s \cdot i_{\beta s} \quad (4.8)$$

Від значення входу «Ubs» віднімається значення величини проекції струму статора на вісь β (вхід «Ibs»), помножене на активний опір ротора. Результат інтегрується і подається на вихід «psibs».

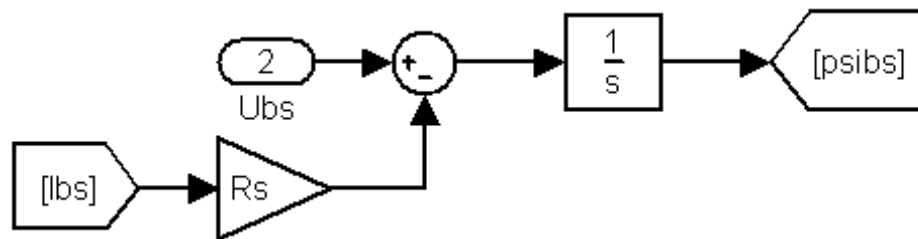


Рисунок 4.6 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення статора на вісь β

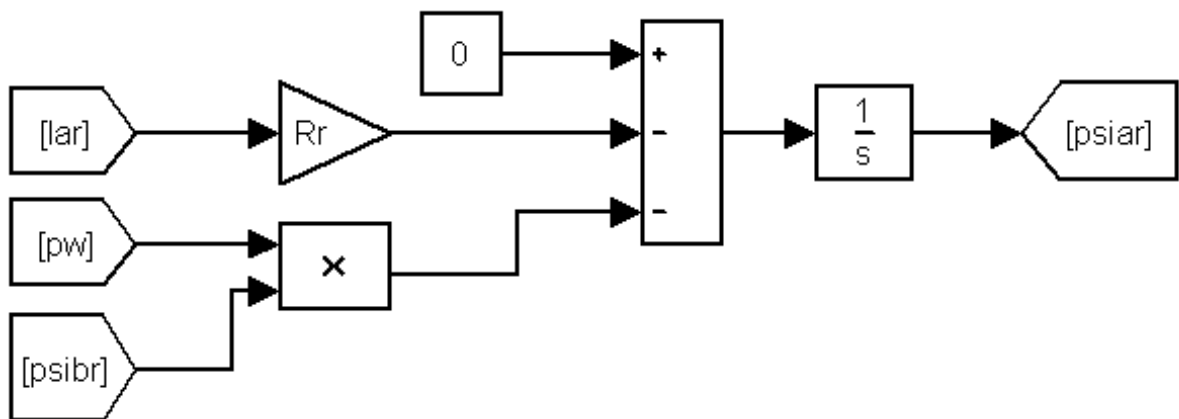


Рисунок 4.7 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення ротора на вісь α

У цьому блоці реалізовано третє рівняння системи 5.1:

$$\frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} = 0 - r_r' \cdot i_{\alpha r}' - \psi_{\beta r} \cdot \omega \quad (4.9)$$

Від значення входу «0» віднімається значення величини проекції струму ротора на вісь α (вхід «Iar»), помножене на активний опір ротора і віднімаються перемножені значення величини проекції потокозчеплення ротора (вхід «psibr») на вісь β з кутовою частотою обертання поля (вхід «pw»). Результат інтегрується і подається на вихід «psiar».

Четверте рівняння системи 5.1 реалізується блоком, представленим на рисунку 5.8.

$$\frac{d\psi_{\beta r}}{dt} = 0 - r'_r \cdot i'_{\beta r} - \psi_{\alpha r} \cdot \omega \quad (4.10)$$

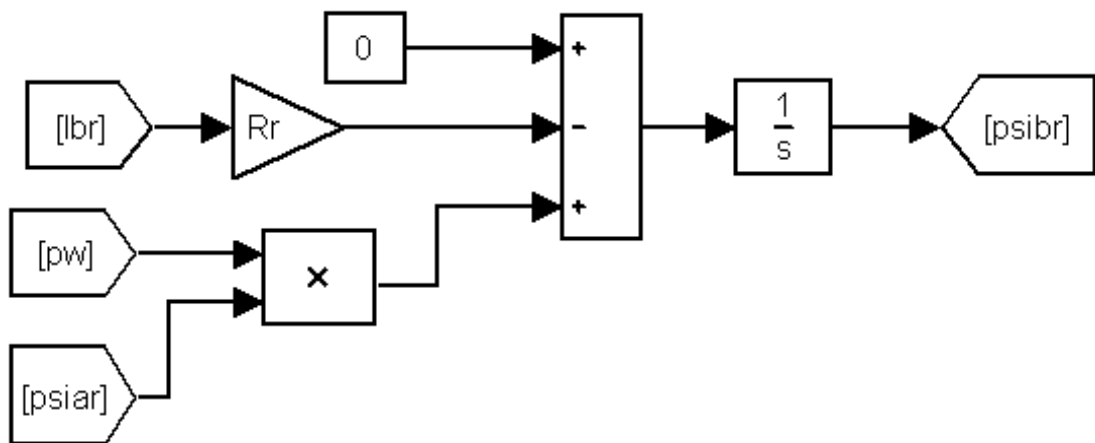


Рисунок 4.8 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення ротора на вісь β

Від значення входу «0» віднімається значення величини проекції струму ротора на вісь β (вхід «Ibr»), помножене на активний опір ротора і віднімаються перемножені значення величини проекції потокозчеплення ротора на вісь α (вхід «psiar») з кутовою частотою обертання поля (вхід «pw»). Результат інтегрується і подається на вихід «psibr».

На рисунку 4.6 показано обчислення коефіцієнта A згідно формулі (5.12).

$$A = \frac{1}{(L_s \cdot L_r - L_\mu^2)} \quad (4.12)$$

Від добутку значень сигналів підсистем, що обчислюють індуктивність статора і приведену індуктивність ротора, віднімається квадрат значення сигналу підсистеми, що обчислює індуктивність намагнічуючого контуру. На одиницю ділиться результат і сигнал від блоку «produkt» подається на вихід.

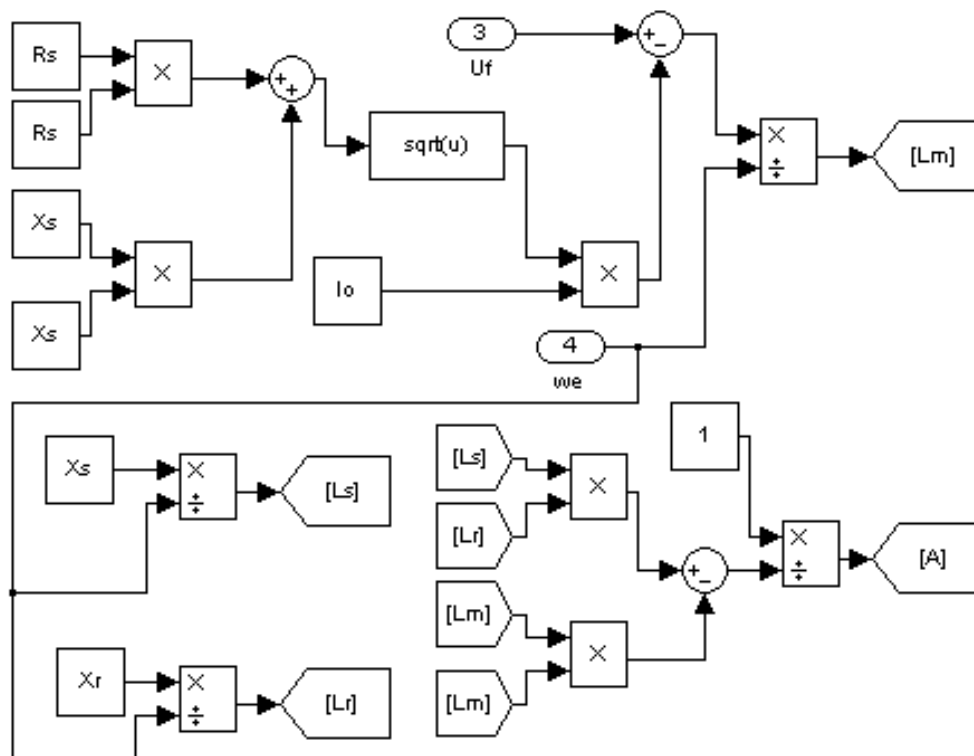


Рисунок 4.9 – Розгортка блоків, що формують індуктивність намагнічуючого контуру та коефіцієнта A.

Далі показана розгортка блоку, що обчислює індуктивність намагнічуючого контуру. Тут реалізована проста формула:

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_s} \quad (4.13)$$

де L_m - індуктивність намагнічуючого контуру

X_m - реактивний опір намагнічуючого контуру

ω_s - кутова частота обертання поля статора

Значення сигналу блоку, що обчислює реактивний опір намагнічуючого контуру, ділиться на значення кутової частоти обертання поля статора, яке заводиться з частотного перетворювача за допомогою блоків «goto» і «from», і сигнал подається на вихід.

Далі показана розгортка підсистеми, що обчислює реактивний опір намагнічуючого контуру. У цьому блоці реалізується наступна формула для розрахунку реактивного опору намагнічуючого контуру:

$$X_m = \frac{U_\phi - I_0 \sqrt{R_s^2 + X_s^2}}{I_0}, \quad (4.14)$$

де U_ϕ - фазна напруга

I_0 - струм холостого ходу

R_s - активний опір статора

X_s - реактивний опір статора

Сигнал фазної напруги, яка відстежується в частотному перетворювачі, приходить з входу «3». Сигнали констант, відповідні активному і реактивному струму статора, зводяться в квадрат за допомогою блоків «produkt», і з їх суми витягується квадратний корінь, за допомогою блоку витягання функцій «fcp». Набуте значення помножується на струм холостого ходу і результат віднімається із значення фазної напруги, ділений на значення струму холостого ходу. Результат подається на вихід.

Розгортка блоку, що моделює проекцію струму на вісь α за формулою 5.11 представлена на рисунку 5.10.

$$i_{\alpha s} = A \cdot (\psi_{\alpha s} \cdot L_r' - \psi_{\alpha r} \cdot L_\mu) \quad (4.11)$$

Значення проекції вектора потокозчеплення статора на вісь α і проекції вектора потокозчеплення ротора на вісь α помножуються на приведену повну індуктивність ротора і індуктивність намагнічуючого контуру, відповідно, після чого їх різниця помножується на коефіцієнт A , і результат подається на вихід.

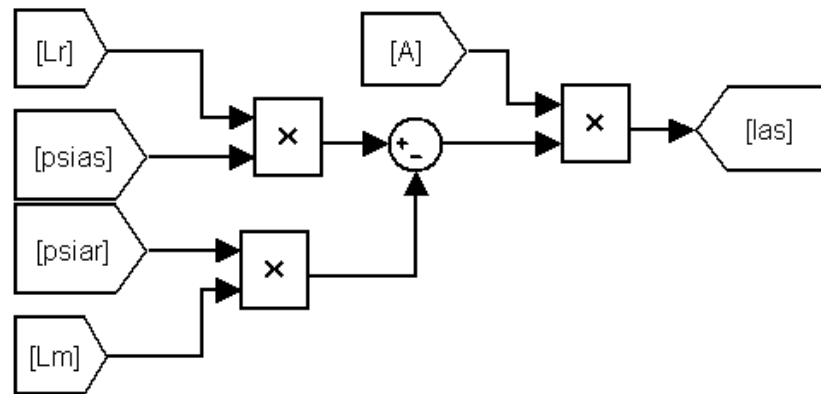


Рисунок 4.10 – Блок, що моделює проекцію вектора струму статора на вісь α

У розгортці блоку (рисунку 5.11) обчислюється значення проекції вектора струму статора на вісь β по формулі восьмого рівняння системи (5.1)

$$i_{\beta s} = A \cdot (\psi_{\beta s} \cdot L_r' - \psi_{\beta r} \cdot L_\mu) \quad (4.15)$$

Значення проекції вектора потокозчеплення статора на вісь β і проекції вектора потокозчеплення ротора на вісь β помножуються на приведену повну індуктивність ротора і індуктивність намагнічуючого контуру, відповідно,

після чого їх різниця помножується на коефіцієнт A , і результат подається на вихід.

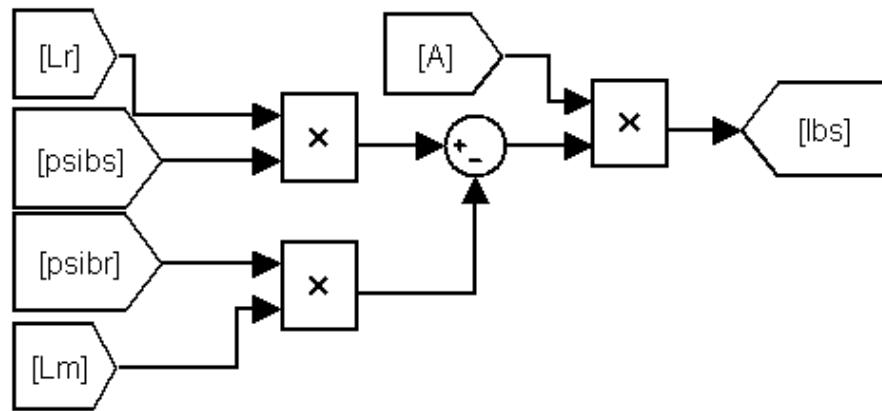


Рисунок 4.11 – Блок, що моделює проекцію вектора струму ротора на вісь β

У блоці на рисунку 4.12 обчислюється значення проекції вектора струму ротора на вісь α по формулі дев'ятого рівняння системи 4.1.

$$i_{\alpha r} = A \cdot (\psi_{\alpha r} \cdot L_r' - \psi_{\alpha s} \cdot L_{\mu}) \quad (4.16)$$

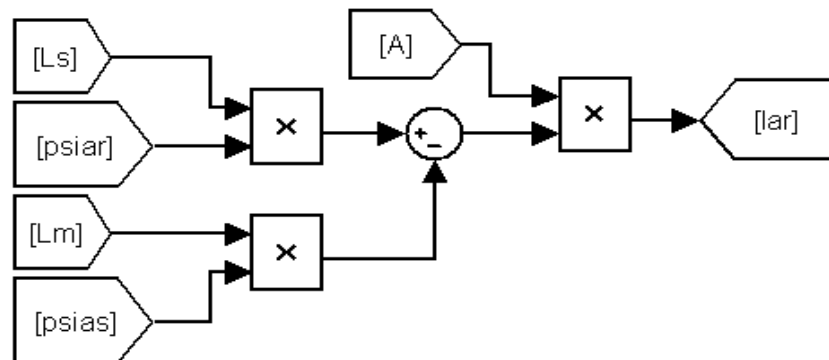


Рисунок 4.12 – Блок, що моделює проекцію вектора струму ротора на вісь α

Значення проекції вектора потокозчеплення ротора на вісь α і проекції вектора потокозчеплення статора на вісь α помножуються на приведену повну індуктивність ротора і індуктивність намагнічуючого контуру, відповідно,

після чого їх різниця помножається на коефіцієнт A , і результат подається на вихід.

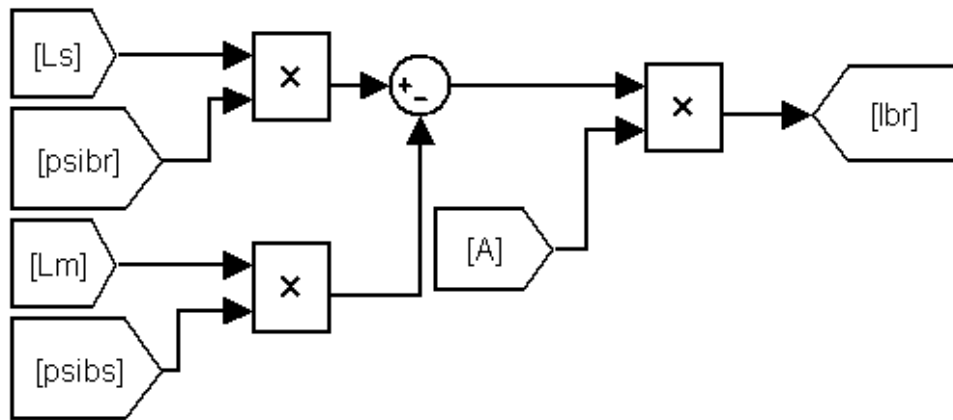


Рисунок 4.13 – Блок, що моделює проекцію вектора струму ротора на вісь β

У цьому блоці обчислюється значення проекції вектора струму ротора на вісь β по формулі десятого рівняння системи (5.1):

$$i_{\beta r} = A \cdot (\psi_{\beta r} \cdot L_r' - \psi_{\beta s} \cdot L_\mu) \quad (4.17)$$

Значення проекції вектора потокозчеплення ротора на вісь β і проекції вектора потокозчеплення ротора на вісь β помножуються на приведену повну індуктивність статора і індуктивність намагнічуючого контуру, відповідно, після чого їх різниця помножається на коефіцієнт A , і результат подається на вихід.

У розгортці блоку, яка представлена на рисунку 5.14 обчислюється значення моменту двигуна по формулі п'ятого рівняння системи (5.1), а також частота обертання ротора двигуна по рівнянню 6:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_{\alpha s} \cdot i_{\beta s} - \psi_{\beta s} \cdot i_{\alpha s}) \quad (4.18)$$

$$M - M_c = \left(\frac{J}{p}\right) \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4.19)$$

Значення сигналів входів, які перемножуються в блоці «product» – проекція вектора потокозчеплення статора на вісь α і проекція вектора струму статора на вісь β відповідно, а значення сигналів інших двох входів – проекція вектора потокозчеплення статора на вісь β і проекція вектора струму статора на вісь α відповідно. Від добутку перших двох входів віднімаються добуток третього і четвертого, і результат перемножується із значенням блоку «gain», в якому вказується добуток значення кількості полюсів машини та константи 1,5. Отримане значення подається на вихід «3» та на блок суматора, де від отриманого значення віднімається момент опору (вхід «5»). Результат подається на інтегратор після чого отримуємо значення частоти обертання ротора машини (вихід «4»). Це значення перемножуємо зі значенням кількості пар полюсів та подаємо на блок «Goto».

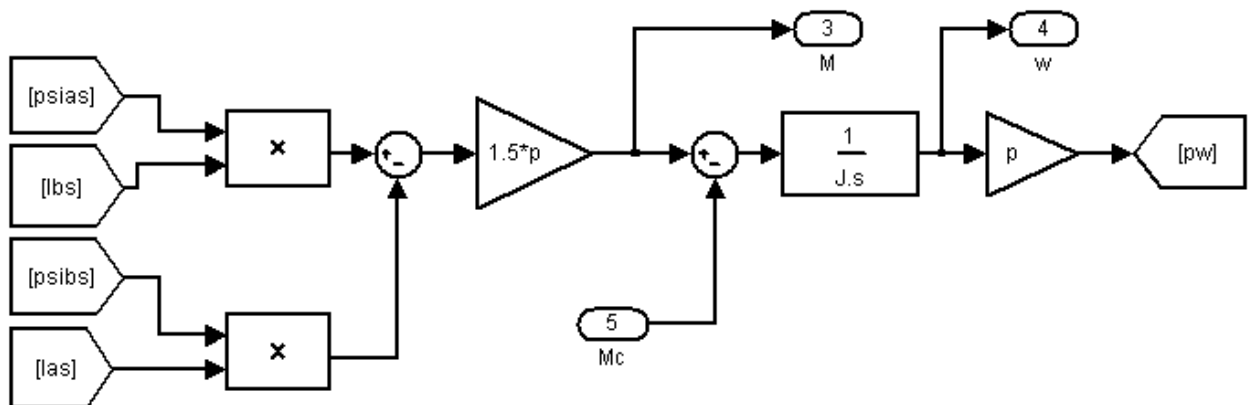


Рисунок 4.14 – Блок, що моделює момент та частоту обертання ротора двигуна

Блоки, що моделюють перерахунок із декартової системи координат x, y в ортогональну систему координат α, β та навпаки, а також їхні розгортки представлені на рисунках 5.15 та 5.16 відповідно.

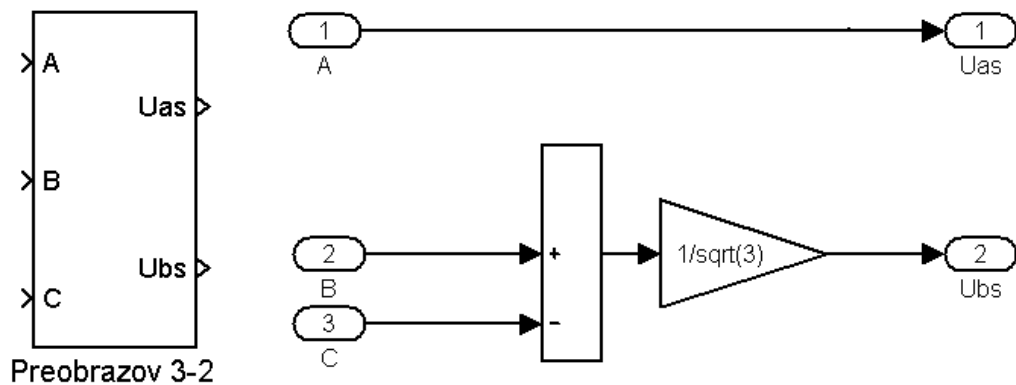


Рисунок 4.15 – Блок, що моделює перерахунок координат системи x, y в систему координат α, β та його розгортка

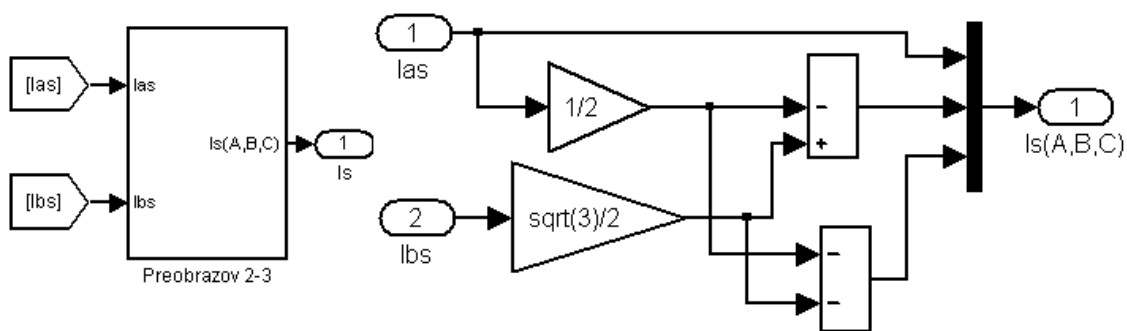


Рисунок 4.16 – Блок, що моделює перерахунок координат системи α, β в систему координат x, y та його розгортка

Як відомо живиться асинхронна машина від трьохфазної напруги, зміщеної одна від одної на 120° , а тому є необхідність змодельовати блок, який буде формувати таку трифазну напругу. Цей блок, а також його розгортка показані на рисунку 5.17.

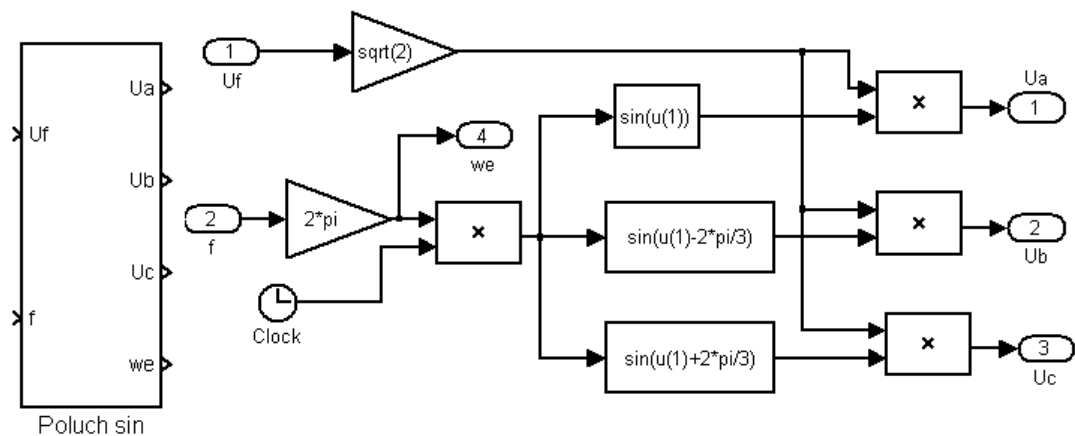


Рисунок 4.17 – Блок, що моделює трифазну напругу та його розгортка

На рисунку 4.17 зображено загальний вид моделі асинхронної машини, де зібрані всі раніше описані блоки. На рисунку 4.19 показана маска підсистеми «Mashina», а на рисунках 4.20 та 4.21 – загальний вид моделі асинхронного приводу та осцилограма його розгону.

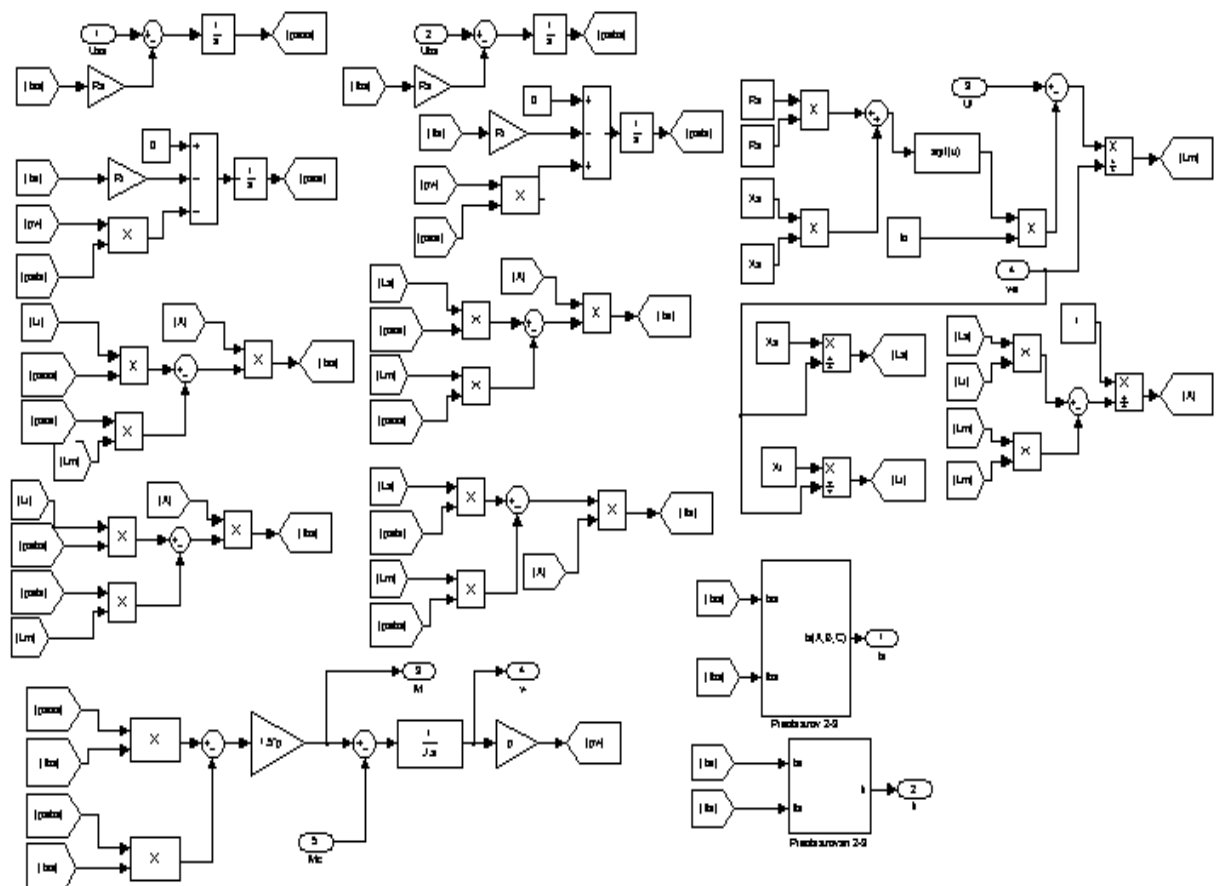


Рисунок 4.18 – Загальний вид моделі асинхронного двигуна

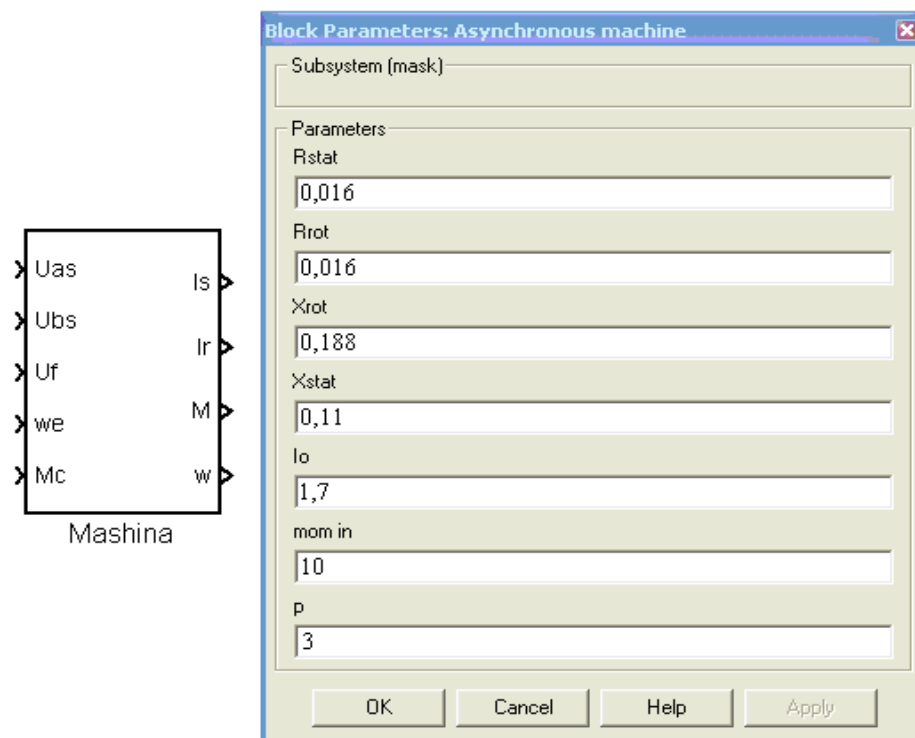


Рисунок 4.19 – Маска моделі асинхронного двигуна

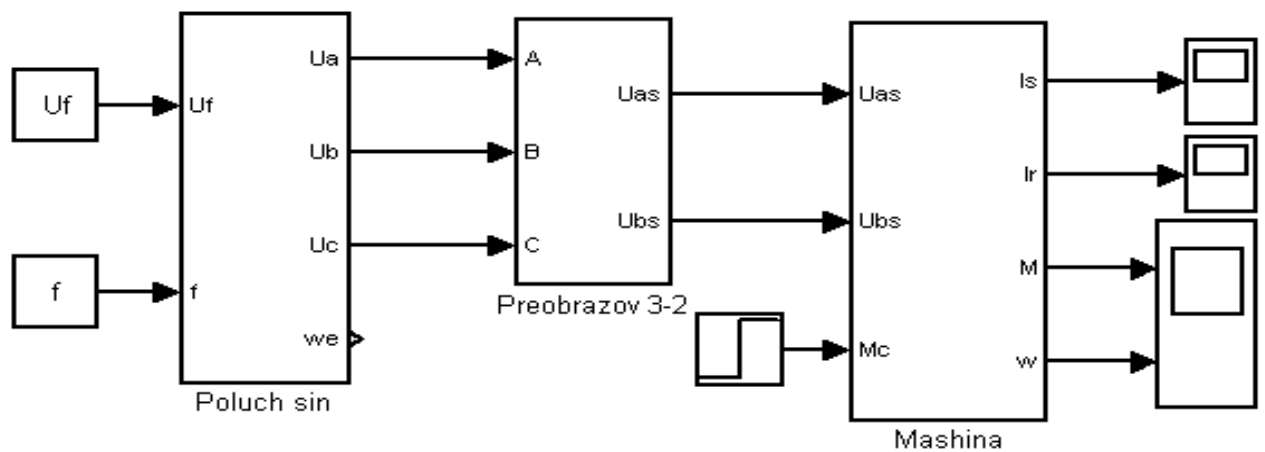


Рисунок 4.20 – Загальний вид моделі асинхронного приводу

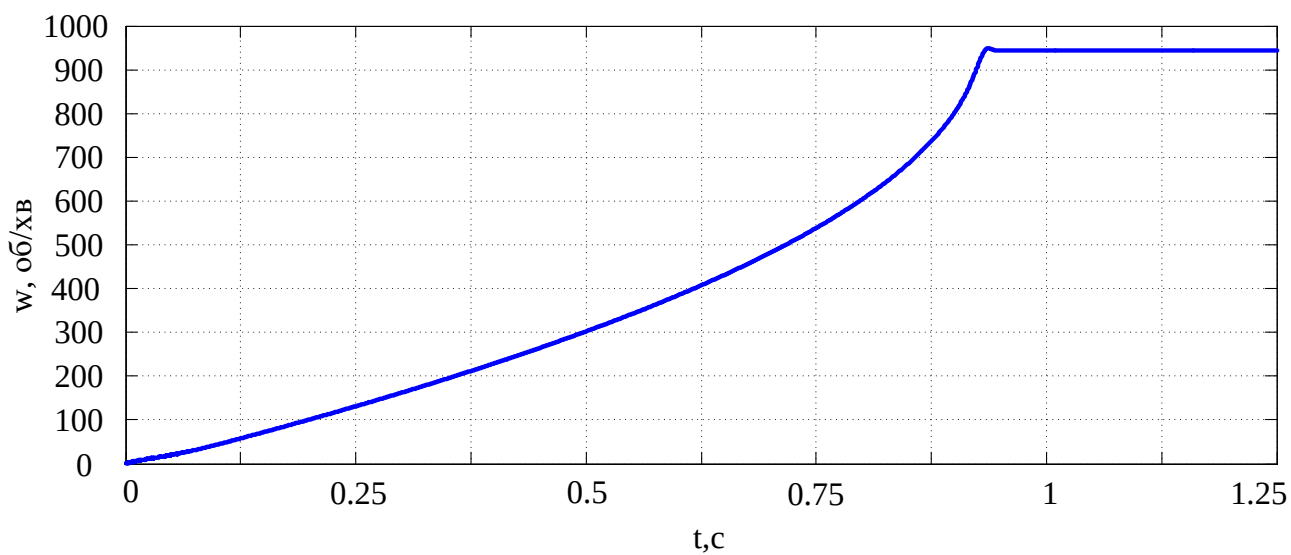


Рисунок 4.21 – Осцилограма розгону двигуна НБ-607

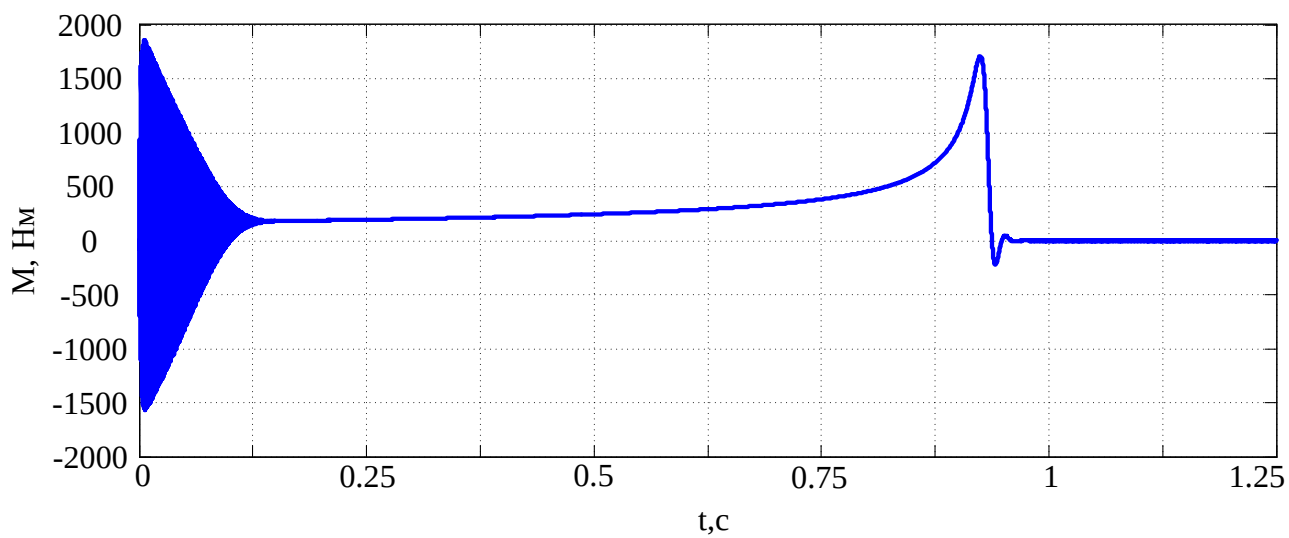


Рисунок 4.22 – Осцилограма моменту двигуна НБ-607

5 Моделювання частотного перетворювача для керування асинхронним двигуном

5.1 Вибір та обґрунтування силової схеми тягового електропривода

Частотні перетворювачі призначені для регулювання частоти обертання валу АД в широких межах. Частотні перетворювачі є інверторами напруги. Це пояснюється тим, що інвертори напруги можуть працювати в більш широкий діапазон зміни вихідної частоти.

Силова схема тягового електроприводу повинна забезпечувати роботу АТД в режимах тяги та електричного рекуперативного, реостатного або рекуперативно-реостатного гальмування у всьому діапазоні змінення швидкості руху. При цьому перехід від одного режиму роботи до іншого не повинен супроводжуватися скачкоподібними змінами сил, які діють на потяг.

Для можливості реалізації тяговим двигуном будь-якої характеристики в областях, обмежених граничними тягової і гальмівної характеристиками, перетворювач повинен забезпечувати незалежне регулювання частоти струму статора АТД в діапазоні від 0,5-1,0 Гц до 100-150 Гц і амплітуди першої гармоніки напруги на обмотках двигуна від мінімальної, з урахуванням компенсації падіння напруги на обмотках статора, до максимальної рівній або якій перевищує номінальну напругу на статорі.

Силовая схема ЕРС може складатися з вхідного та вихідного перетворювачів, які призначені відповідно для того, щоб регулювати вихідну напругу та перетворювати напругу однієї частоти в напругу іншої частоти.

В якості вхідного перетворювача ЕРС, експлуатованого на ділянках змінного струму, може бути використаний тяговий трансформатор, а в якості вихідного - дворівневий автономний інвертор напруги. При живленні ЕРС від однофазної мережі змінного струму система перетворення електроенергії в ланцюзі асинхронних тягових двигунів виконується з ланкою постійного

струму. У цьому дипломному проєкті ми застосуємо чотириквadrантний перетворювач, який встановлений у електровозі ДС-3, цей перетворювач повністю задовольняє параметрам та вимогам модернізації електровозу ЧС-7.

Застосуємо у тяговому електроприводі локомотива замість машин постійного струму асинхронні тягові електродвигуни з короткозамкненим ротором, які в наш час знаходять все ширше застосування, в тому числі і на транспорті. Для регулювання частоти обертів ротора (у широкому діапазоні швидкостей) таких двигунів необхідно їх живити багатофазною ($m_1 \geq 2$) змінною напругою регульованої частоти. На електрорухомому складі змінного струму спочатку використовуємо випрямляч напруги. для створення ланки постійного напруги. Для поліпшення енергетичних показників електроприводу використовуємо чотириквadrантний перетворювач.

Вибираємо силову схему - чотириквadrантний перетворювач та дворівневий трифазний мостовий інвертор, який живить три паралельно ввімкнені асинхронні тягові двигуна (рисунок 5.1).

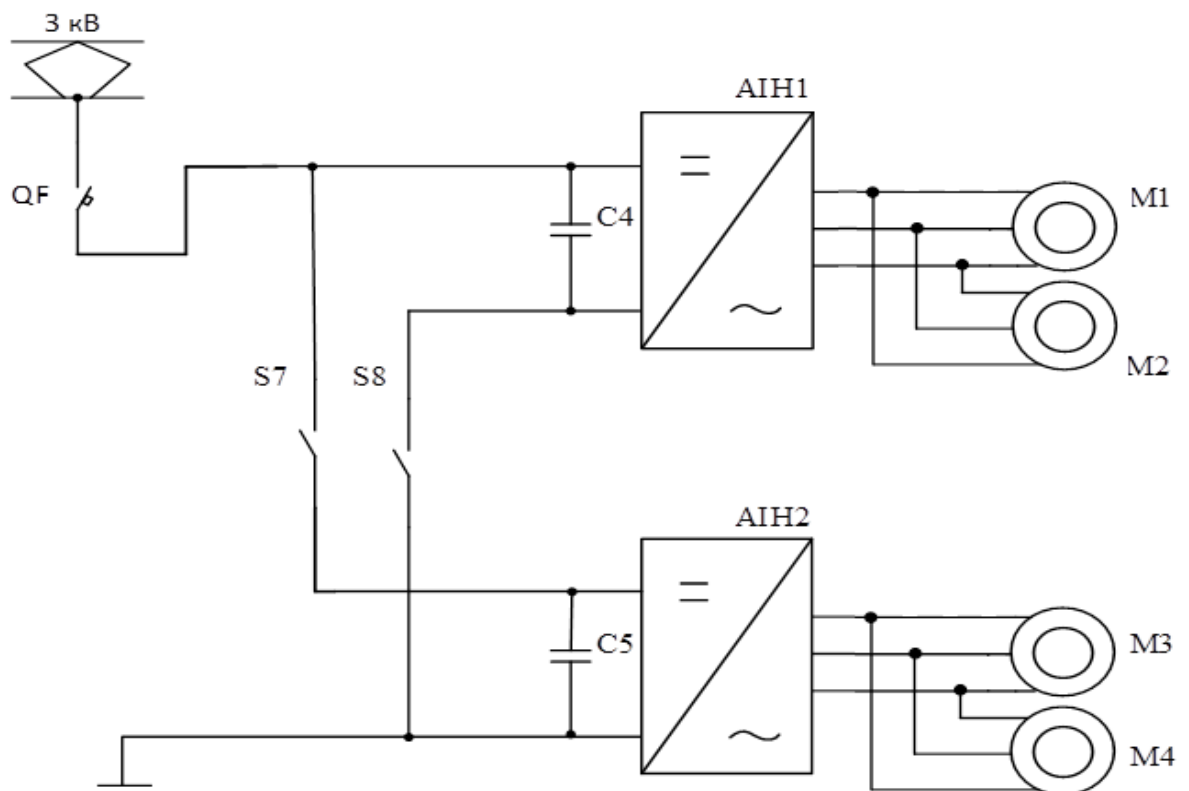


Рисунок 5.1 – Функціональна схема тягового електропривода

5.2 Вибір та обґрунтування схеми автономного інвертора напруги

Автономні інвертори напруги (АІН) останнім часом найбільш широко використовуються в електроприводі змінного струму з частотним управлінням в якості перетворювачів змінної напруги. Такі приводи все частіше застосовуються в загальному, тяговому та в інших видах електропривода, все більше витісняє приводи постійного струму. Діапазон потужностей частотних приводів з АІН дуже широкий: від кількох ватів до одиниць і десятків мегават.

В якості двигуна в такому електроприводі використовується асинхронний трифазний електродвигун з короткозамкненим ротором (АД). Для забезпечення можливості регулювання вихідних параметрів двигуна необхідно, щоб інвертор міг регулювати трифазну напругу одночасно по амплітуді та частоті.

У типовій схемі автономного інвертора напруги міститься 6 ключів. Транзисторні ключі, перемикаючись в певній послідовності, формують на виході інвертора періодичний трифазний сигнал. У такому інверторі фази двигуна можуть бути підключені до потенціалів постійної напруги $2^3 = 8$ різними способами. Результируючий вектор напруги на виході АІН має, відповідно, 8 положень, з яких 2 положення є виродженими, тому що вони призводять до нульового значенням результируючого вектора.

Недоліком такої схеми є те, що форма одержуваного фазної напруги значно відрізняється від синусоїди. У результаті енергетичні характеристики асинхронного двигуна погіршуються, якщо їх порівнювати з енергетичними характеристиками двигуна, що живиться від трифазного синусоїдальної напруги.

Регулювання частоти трифазної напруги на виході АІН здійснюється шляхом зміни частоти перемикань транзисторних ключів. Зміна амплітуди трифазної напруги здійснюється за допомогою широтно-імпульсного регулювання.

АІН має характеристиками джерела напруги, його вихідним регульованим параметром є напруга на затискачах АД. Сучасні АІН виконуються на основі повністю керованих силових напівпровідникових приладів біполярних IGBT-транзисторів з ізольованим затвором. Розглянемо 3-х фазну мостову схему. Класифікаційні ознаки схеми - наявність ємнісного вхідного фільтра та включених зустрічно-паралельно керованим ключам діодів зворотного струму. За рахунок почергового переключення вентилів, постійне вхідна напруга перетворюється в змінну прямокутно-імпульсне вихідна напруга.

Регулювання вихідної напруги АІН можна здійснювати двома способами: амплітудним методом за рахунок зміни величин вхідної напруги та широтно-імпульсним (ШІМ) за рахунок зміни програми перемикавання вентилів при постійній напрузі.

Через керовані ключі протікає активна складова струму АД, через діоди - реактивна складова струму АД. Конденсатор фільтра є джерелом реактивної потужності, яку споживає АД, через нього замикається змінна складова вхідного струму інвертора.

До силових ключів АІН пред'являються великі вимоги високої швидкодії і малих динамічних втрат.

У гальмівному режимі АІН з режиму інвертування переводиться в режим випрямлення (працює міст діодів зворотного струму, через керовані ключі підводиться енергія збудження АД). Полярність напруги на вході АІН зберігається, а струм змінює свій напрямок. Тому для реалізації гальмівного режиму наведена схема тягового електроприводу повинна бути доповнена силовими елементами - або зворотним керованим випрямлячем (працює в режимі залежного мережевого інвертора) для регенерації енергії в мережу, або керованим ключем і гальмівним резистором у колі постійної напруги для здійснення електродинамічного гальмування.

Слід відмітити, що у інверторному електроприводі загальне розповсюдження отримав традиційний трьохфазний асинхронний

електродвигун з короткозамкненим ротором, і зусилля розроблювачів були направлені, в основному, на відпрацювання схемотехніки і режимів перетворювачів частоти при їхній сумісній роботі з трьохфазною машиною, на вдосконалення конструкції трьохфазного електродвигуна з ціллю зниження впливу високих гармонік струму, викликаних несинусоїдальністю живлячих напруг.

Досягнення високих динамічних показників приводу вимагають, щоб швидкодія перетворювачів біла на порядок більша ніж швидкість протікання електромагнітних процесів в АТД, а для реалізації граничних по умовам зчеплення коліс з рейками сил тяги (гальмування) перетворювач повинен витримувати краткочасні перенавантаження по струму.

Дискретність процесів перетворення визиває значні пульсації електромагнітного моменту АТД, а імпульсний характер споживання потужності від джерела первинного енергопостачання оказує заважаючий вплив на інші споживачі, а також пристроїв СЦБ та зв'язку. Тому перетворювачі повинні забезпечувати таку форму напруги та струму на АТД, які не приводили б до значних зростань втрат в двигуні, виключали динамічні навантаження на механічну передачу приводу.

В наш час для живлення асинхронних двигунів від контактної мережі 25 кВ змінного струму найбільше розповсюдження отримала схема дворівневого автономного інвертора напруги (рисунок 6.2). Виготовлення високовольтних IGBT - модулів дозволяє використовувати дворівневі інвертори для контактної мережі 25 кВ змінного струму, що дає можливість значно спростити силові схеми перетворювачів, знизити затрати на їх виготовлення та експлуатацію. До того ж, на відміну від трирівневих інверторів, вони мають менші габаритні розміри, а також підвищену надійність за рахунок меншої кількості компонентів.

На транспорті автономні інвертори використовують для створення тягових приводів з двигунами змінного струму, у першу чергу асинхронними.

Крім того, вони застосовуються також для живлення бортових систем електропостачання транспортних засобів.

У цьому дипломному проєкті застосуємо дворівневий автономний інвертор напруги оскільки він вже широко застосовується на залізницях України, насамперед на електровозі українського виробництва ДС-3.

Схема дворівневого трифазного мостового інвертора отримується простим об'єднанням за загальним джерелом вхідної напруги трьох полу мостових однофазних інверторів, в цьому випадку при з'єднанні фаз трифазного навантаження в зірку або трикутник не потрібна наявність середньої точки вхідної напруги.

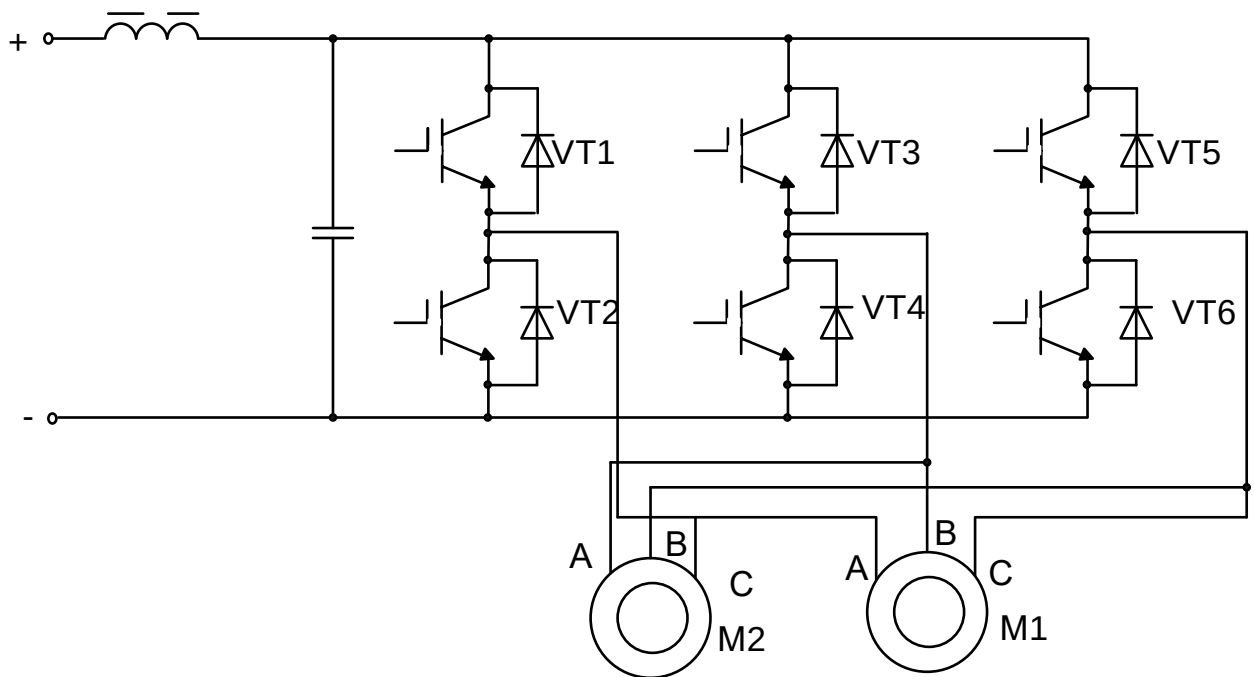


Рисунок 5.2 – Трифазний дворівневий мостовий інвертор напруги

5.3 Розрахунок та вибір елементної бази чотирьохквadrантного перетворювача та трифазного мостового інвертора

5.3.1 Розрахунок та вибір елементної бази трифазного мостового інвертора

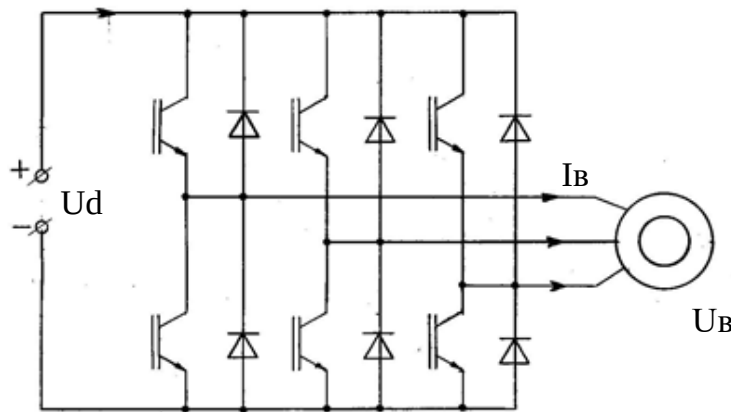


Рисунок 5.3 – Трифазний мостовий інвертор

Номінальне значення першої гармоніки вихідної напруги фази, що діє:

$$U_{B1} = \frac{u_{\Pi N}}{2\sqrt{2}} \cdot K_M . \quad (5.1)$$

де $u_{\Pi N}$ – номінальна напруга живлення;

K_M – коефіцієнт перемодуляції, який рівний 1,15.

$$U_{B1} = \frac{3000 \cdot 1,15}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1223,4 \text{ В}$$

Значення першої гармоніки вихідного струму фази:

$$I_{B1} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{B1} \cdot \cos \varphi_{B1}} . \quad (5.2)$$

де $\cos\varphi_{Bl}$ - коефіцієнт потужності в номінальному режимі.

$$I_{Bl} = \frac{960000}{3 \cdot 12234 \cdot 0,83} = 393,92 \text{ A}$$

Номінальний середній вхідний струм перетворювача:

$$i_{do} = \frac{3 \cdot K_m}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot I_{Bl} \cdot \cos\varphi_{Bl}. \quad (5.3)$$

$$i_{do} = \frac{3 \cdot 1,15}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot 393,92 \cdot 0,83 = 399,9 \text{ A}$$

Номінальний середній струм керованого ключа і діода:

$$I_V = I_D = \frac{I_{Bl}}{\sqrt{2} \cdot \pi} + \frac{i_{do}}{6}. \quad (5.4)$$

$$I_V = I_D = \frac{393,92}{\sqrt{2} \cdot 3,14} + \frac{399,9}{6} = 372,63 \text{ A}$$

Оскільки номінальний середній струм керованого приладу для трифазного мостового інвертора менший, ніж в чотириквadrантному перетворювачі, то можна узяти інший тип ключа з каталогів фірми «Consept»; в даному випадку вибраний IGBT транзистор виробництва «Еурес», розрахований на напругу 3300 В, струм 800 А; тип FZ800R33KF1. Силлові діоди вибрані вітчизняного виробництва; тип – Д223-500, розраховані на напругу 2400-4000В, та струм 1070А.

5.3.2 Розрахунок фільтрів

Оскільки перетворювач є для фільтру джерелом струму вищої гармоніки пульсації I_H (діюче значення), то фільтр повинен починатися з паралельної ємності. Схема фільтру представлена на рисунку 4.5.

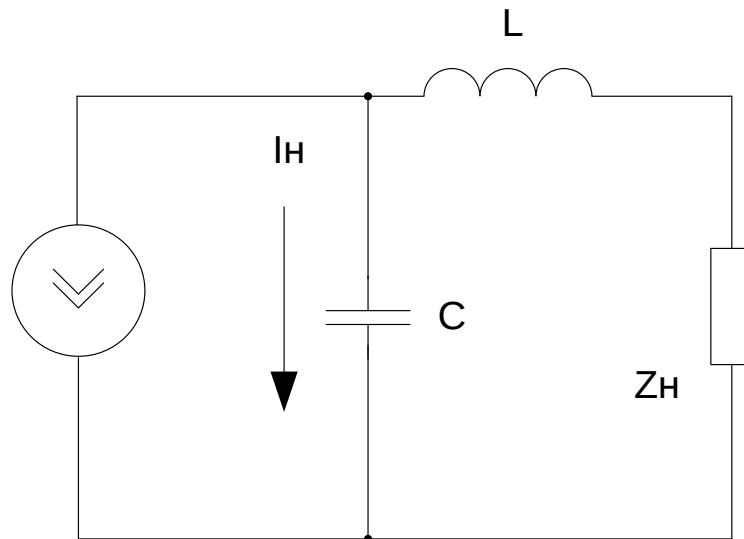


Рисунок 5.4 – Схема фільтра

Ємність фільтру знаходиться по допустимій напрузі гармоніки на навантаженні. Вважаючи, що весь струм йде через конденсатор, отримаємо:

$$\omega C = \frac{I_z}{U_z}. \quad (5.5)$$

де ω – частота фільтрованої гармоніки.

Радіостанції 42-РТМ, що використовуються на локомотивах, працюють на частоті 2,130 кГц при зв'язку машиніст - машиніст, машиніст - ДСП, машиніст – диспетчер. Для цієї частоти і вироблений розрахунок параметрів фільтру:

$$C = \frac{28235}{7952 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 2130} = 2,65 \cdot 10^{-5} \Phi$$

Оскільки опір навантаження фільтру малий, то його необхідно підвищити введенням в схему фільтру послідовного дроселя L (рисунок 6.5). Вважаючи, що вся напруга прикладена до дроселя, отримуємо необхідну індуктивність з умови:

$$\omega L = \frac{U_{\varepsilon}}{I_{н2}} \quad (5.6)$$

де $I_{н2}$ – допустимий вміст фільтрованої гармоніки в струмі навантаження.

Величина $I_{н2}$ визначається по допустимому коефіцієнту пульсації струму:

$$\sqrt{2} I_{н2} = K_{ni} I_{в1} \quad (5.7)$$

де $I_{в1}$ – перша гармоніка струму навантаження.

$$I_{н2} = \frac{0,01 \cdot 39392}{\sqrt{2}} = 2,79 \text{ А}$$

$$L = \frac{7952}{2,79 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 2130} = 0,021 \text{ Гн}$$

Для фільтру (рисунок 4.3) величина U_{Γ} є проміжною і тому може варіювати в достатньо широких межах. Чим більше величина U_{Γ} , тим менше ємність фільтру і більша індуктивність. При невисоких вимогах до згладжування пульсацій струму в навантаженні, наприклад, якщо навантаженням є бортова мережа, задаються зазвичай значеннями K_{ni} порядку 0,05, а при високих вимогах, характерних для контактних мереж, слід

приймати ці величини в межах 0,01-0,02, оскільки інакше дросель фільтру вийде дуже важким.

5.4 Математичне моделювання перетворювача частоти

Модель перетворювача частоти виконана за принципом формування синусоїди по наступних виразах:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.8)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (5.9)$$

Логіка процесу наступна: сформоване значення f помножається на 2π , таким чином задаючи ω . Далі за допомогою блоку «Clock» формується значення ωt . Після цього від отриманого береться функція синус в блоці «Fsn». Для набуття амплітудного значення напруги її діюче значення множиться на $\sqrt{2}$. Сигнал після цього перемножується з синусом. Отримане значення буде відповідати напрузі фази А. Напругу фази В та С формуємо аналогічно лише у блоці «Fsn» задаємо необхідний зсув по фазі 120° та 240° . Модель формування синусоїди представлена на рисунку 6.6.

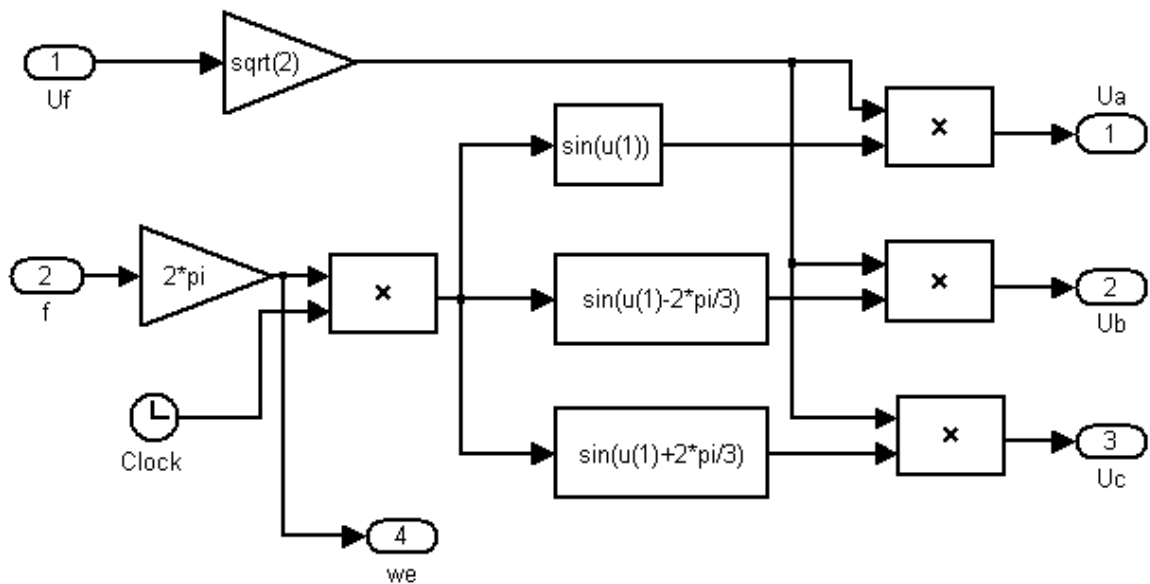


Рисунок 5.5 – Формування фази А в частотному перетворювачі

Формування фазної напруги та частоти відбувається відповідно закону частотного керування, який відповідає наступній формулі:

$$\frac{U}{f} = \text{const} \quad (5.10)$$

Такий принцип був змодельований в блоках “former.napr.” та “former.chast.” завдяки блокам “step”. Повністю перетворювач частоти представлений на рисунку 6.7. Сформована у відповідності з максимальним пусковим струмом напруга, а також частота перемножуються з блоками Uz та fz і отриманий результат за частотним законом керування двигуном подається на блок формування синусоїди по фазам.

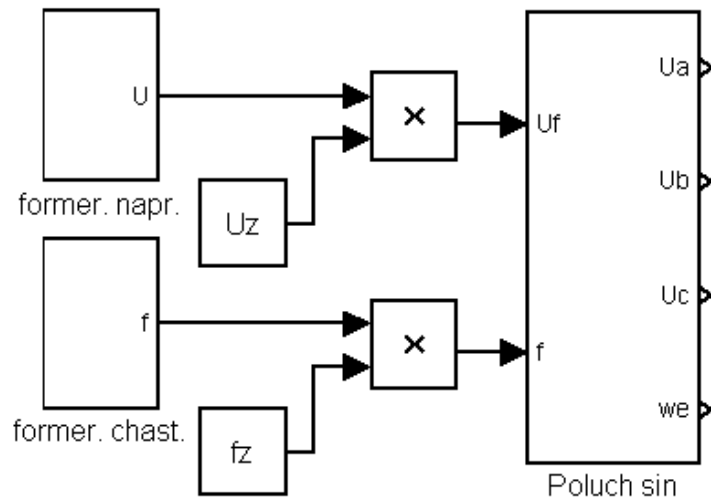


Рисунок 5.6 – Модель частотного перетворювача

На рисунку 5.7 показана математична модель асинхронного двигуна (отримана в попередньому пункті) разом з частотним перетворювачем, а на рисунках 5.8 та 5.9 – осцилограми швидкості та моменту двигуна при максимальній частоті живлення 50Гц.

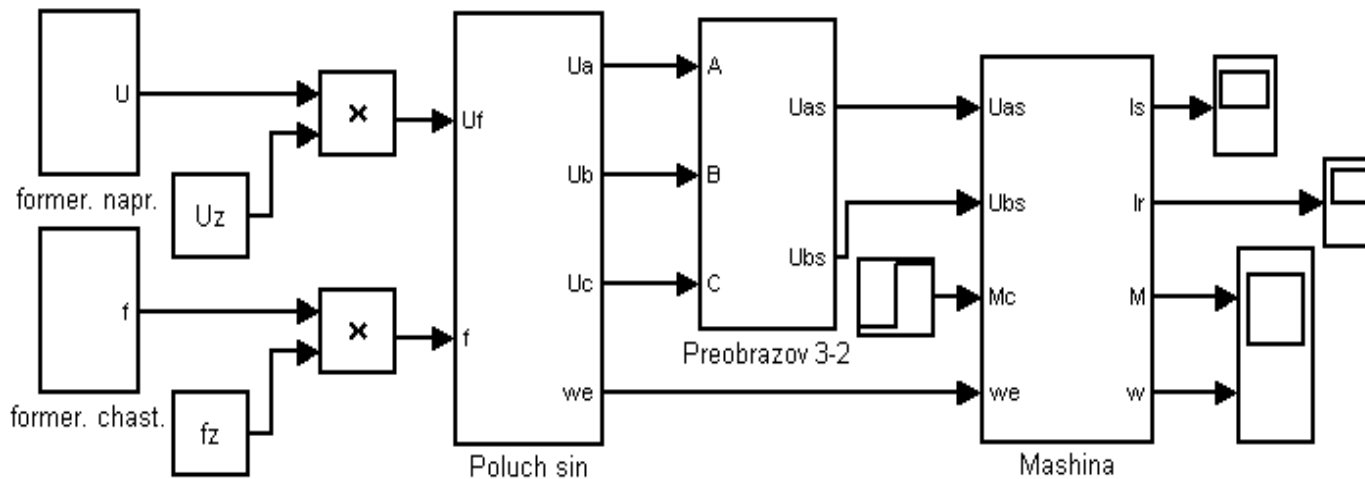


Рисунок 5.7 – Модель асинхронного двигуна разом з частотним перетворювачем

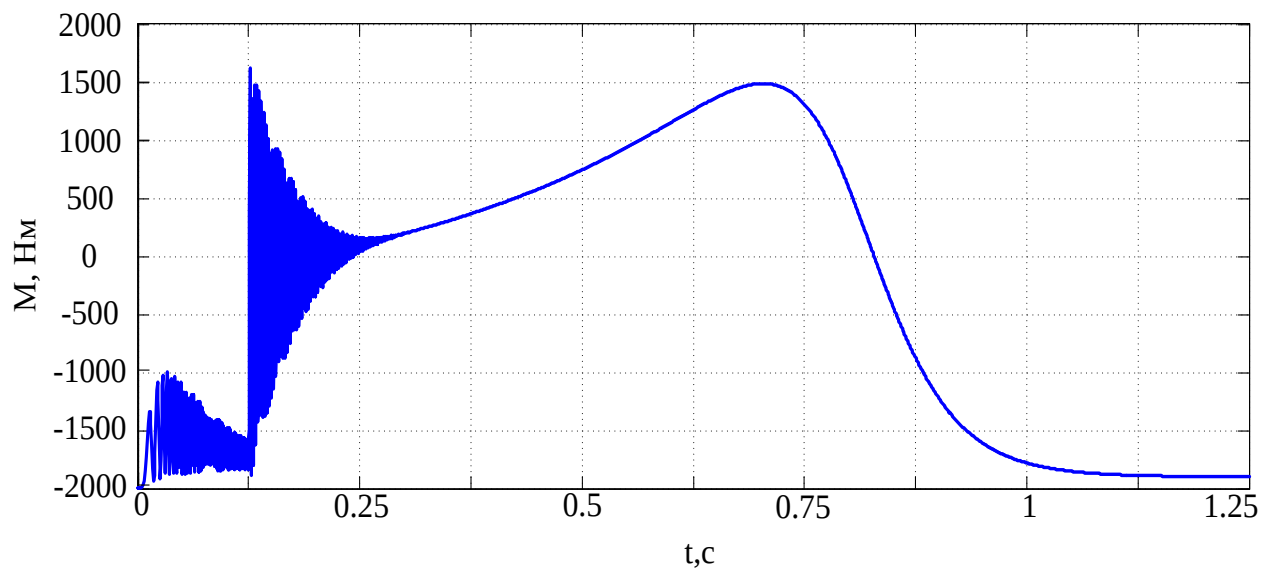


Рисунок 5.8 – Осцилограмма момента асинхронного двигателя при $f=50\text{Гц}$

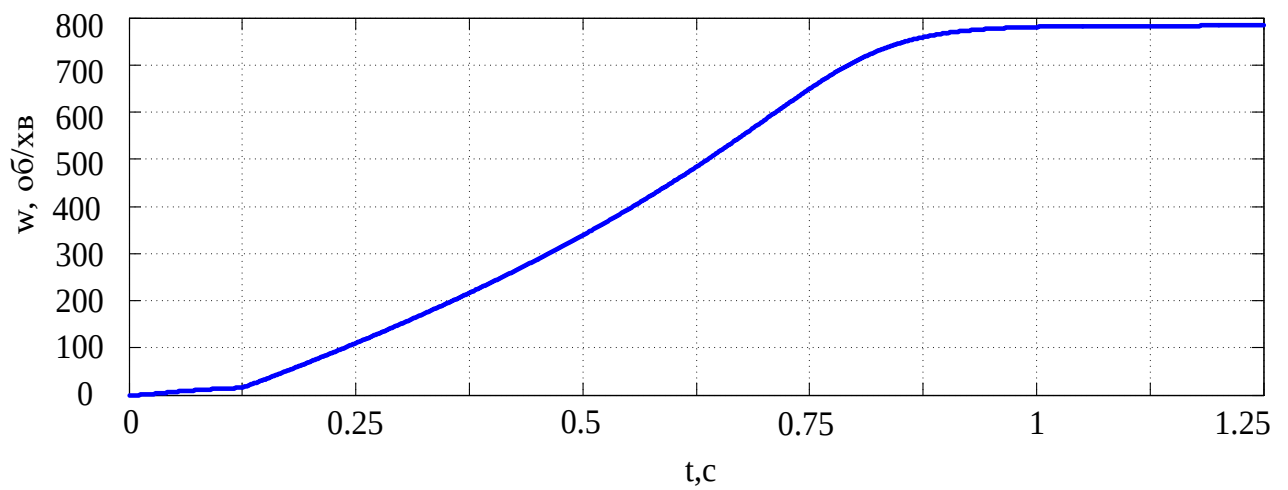


Рисунок 5.9 – Осцилограмма скорости асинхронного двигателя при $f=50\text{Гц}$

6 Математичне моделювання потяга з асинхронним приводом та векторною системою керування

6.1 Основні теоретичні положення роботи векторного керування

Вдалий вибір математичної моделі є важливим не тільки при аналізі, а й при синтезі системи автоматичного управління. Саме розробка моделі в системі координат, орієнтованої по потокозчепленню ротора, стала основою створення високоякісних систем векторного керування.

Для переходу від математичного опису гармонійних сигналів в багатофазових координатах до математичного опису в ортогональних двофазних координатах використовується поняття узагальненого вектора.

Узагальненим називають такий вектор, проекції якого на осі фаз рівні миттєвим значенням відповідних фазних величин в заданий момент часу.

Для виконання цього формулювання узагальнений вектор при вугіллі по-ворота фк повинен обертатися проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю

$$\omega_v = \frac{d\varphi_v}{dt}, \quad (6.1)$$

яка збігається з кутовою швидкістю відповідного періодичного сигналу і мати модуль, який дорівнює максимальному значенню фазної величини

$$|\tilde{v}| = v_{\max}. \quad (6.2)$$

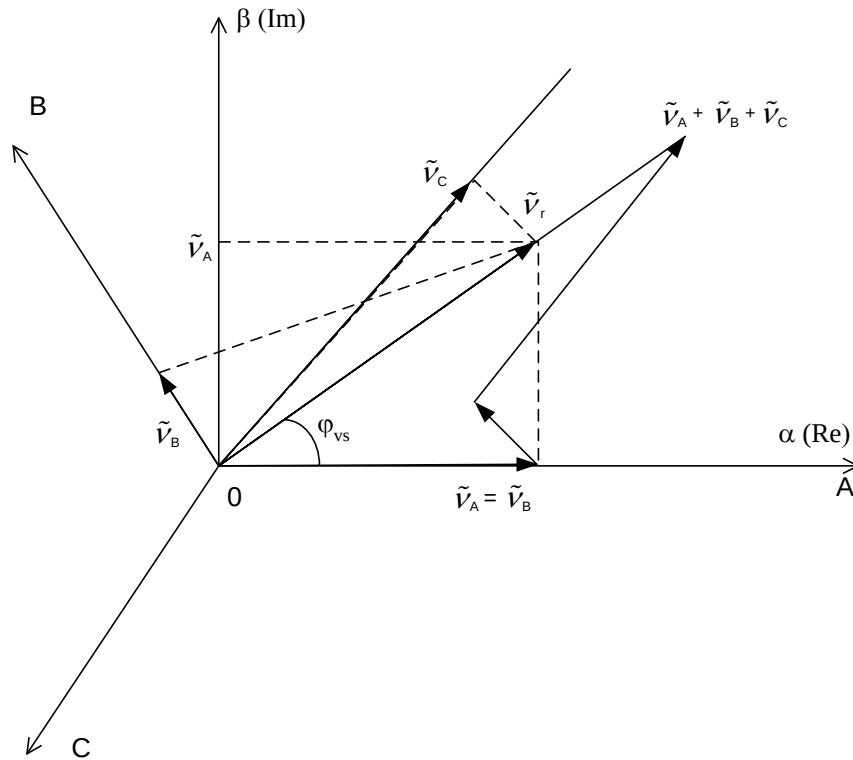


Рисунок 6.1 – Узагальнений вектор і його складові

На рисунку 3.13 зображено узагальнений вектор будь-якої фізичної величини ротора, його проекції на фізичні осі векторна сума цих проекцій і проекції узагальненого вектора на дійсну d (Re) і уявну q (Im) осі, перша з яких (v_d) збігається з віссю a , а друга (v_q) - розташована перпендикулярно до першої і повернута на кут 90° проти годинникової стрілки.

Сума векторів представляє собою вектор, який збігається з узагальненим вектором по напрямку і перевищує його амплітуду в 1,5 рази. З урахуванням цього можна записати:

$$\tilde{v}_{r_{abc}} = 1,5(\tilde{v}_A + \tilde{v}_B + \tilde{v}_C) = 1,5(\tilde{v}_a + \tilde{v}_b e^{j2\pi/3} + \tilde{v}_c e^{j4\pi/3}) = \frac{2}{3} a v_r, \quad (6.3)$$

$$\tilde{v}_{r_{abc}} = \tilde{v}_{r_{dq}} = v_{r_{max}} r^{j\varphi_{vr}} = v_{r_{max}} (\cos \varphi_{vr} + j \sin \varphi_{vr}) = v_d + j v_q, \quad (6.4)$$

$$\text{де } a = [1 \bar{a} a^2]; \bar{a} = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}; \bar{a}^2 = e^{j4\pi/3} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$\mathbf{v}_r = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\tilde{v}_a| \\ |\tilde{v}_b| \\ |\tilde{v}_c| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{r\max} \cos(\varphi_{vr}(t)) \\ v_{r\max} \cos(\varphi_{vr}(t) - 2\pi/3) \\ v_{r\max} \cos(\varphi_{vr}(t) - 4\pi/3) \end{bmatrix},$$

φ_{vr} – кут між напрямком узагальненого вектору ротора та віссю d:

$$\frac{d\varphi_{vr}}{dt} = \omega_{vr} - Z_p \omega.$$

Таким чином, формули (3.3) і (3.4) описують узагальнений вектор ротора в трифазній (abc) та ортогональній (dq) системах координат, які обертаються зі швидкістю

$$\omega_r = Z_p \omega, \quad \frac{d\varphi_{vr}}{dt} = \omega_r.$$

Для того, щоб напрямок дійсної осі ортогональної системи координат збігалось з напрямком узагальненого вектору потокозчеплення ротора ψ_r , взятого за основу, система координат повинна обертатися синхронно з цим вектором. При цьому вектор потокозчеплення ротора в ній буде мати тільки дійсну складову, так як проекція цього вектору на уявну вісь q дорівнюватиме нулю. Тоді умови математичного опису АД в цих координатах матимуть вигляд

$$\omega_k = \omega_{\psi_r}, \quad (6.6)$$

$$\Psi_{rq} = 0; \Psi_{rd} = |\tilde{\Psi}_r| = \Psi_r = \Psi_{rm}. \quad (6.5)$$

Модель в системі координат dq стала основою розробки системи векторного керування короткозамкненим АД. Тому на додаток до умов (3.5), (2.5) додамо умову рівності нулю напруги ротора

$$U_{rd} = U_{rq} = 0. \quad (6.7)$$

При живленні обмоток статора двигуна від джерела напруги система векторного управління має зворотні зв'язки за складовими струму статора і по потокозчеплення ротора. Тому ще однією умовою для розробки моделі АД буде наявність в ній перерахованих сигналів: i_{sd} , i_{sq} , ψ_r .

Запишемо рівняння, що описують процеси в АД, в узагальнених століття-торах з урахуванням умови (3.7):

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{i}_s + \frac{d\tilde{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \tilde{\Psi}_s, \\ 0 = R'_r \tilde{i}_r + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \tilde{\Psi}_r, \end{cases} \quad (6.8)$$

де ω_k - частота обертання системи координат;

ω_r - електрична частота обертання ротора;

U_s , i_s - напруга і струм статора;

R_s - опір обмотки статора;

i_r - струм обмотки ротора;

R'_r - приведений опір обмотки ротора;

Ψ_r - потокозчеплення ротора.

Для короткозамкнутого двигуна вектори відрізняються один від одного через наявність розсіювання обмоток статора і ротора. У зв'язку з цим для них можна записати:

$$\begin{aligned}\tilde{\Psi}_s &= (L_m + L_{sl})\tilde{i}_s + L_m\tilde{i}_r; \\ \tilde{\Psi}_r &= (L_m + L_{rl})\tilde{i}_r + L_m\tilde{i}_s,\end{aligned}\tag{6.9}$$

де L_m - головна індуктивність розсіювання;

L_{sl}, L_{rl} - індуктивність розсіювання обмоток.

При цьому для індуктивностей обмоток статора L_s і ротора L_r матимемо:

$$\begin{aligned}L_s &= L_m + L_{sl}; \\ L_r &= L_m + L_{rl}.\end{aligned}\tag{6.10}$$

Для того, щоб забезпечити обумовлений раніше склад сигналів моді-ли, знайдемо узагальнені вектора струму ротора і потокозчеплення статора:

$$\tilde{i}_r = \frac{1}{L_r}\tilde{\Psi}_r - \frac{L_m}{L_r}\tilde{i}_s = \frac{1}{L_r}\tilde{\Psi}_r - k_r\tilde{i}_s;\tag{6.11}$$

$$\tilde{\Psi}_s = L_s\tilde{i}_s - \frac{L_m^2}{L_r}\tilde{i}_s + \frac{L_m}{L_r}\tilde{\Psi}_r = \sigma L_s\tilde{i}_s + k_r\tilde{\Psi}_r,\tag{6.12}$$

$$\text{де } k_r = \frac{L_m}{L_r}; \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}.$$

Після підстановки рівнянь (3.11), (3.12) в систему рівнянь (3.8) отримуємо:

$$\begin{cases} \tilde{U}_s = R_s \tilde{i}_s + \sigma L_s \frac{d\tilde{i}_s}{dt} + k_r \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j\omega_k (\sigma L_s \tilde{i}_s + k_r \tilde{\Psi}_r); \\ 0 = \frac{1}{T_r} \tilde{\Psi}_r - \frac{L_m}{T_r} \tilde{i}_s + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - Z_p \omega_r) \tilde{\Psi}_r, \end{cases} \quad (6.13)$$

де електромагнітна постійна часу

$$T_r = \frac{L_r}{R'_r}.$$

Для того, щоб перше рівняння системи (3.13) мало похідну тільки від одного сигналу, виразимо похідну від потокозчеплення ротора в другому рівнянні тієї ж системи і підставимо отриманий вираз в перше:

$$\frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \tilde{i}_s - \frac{1}{T_r} \tilde{\Psi}_r - j(\omega_k - Z_p \omega_r) \tilde{\Psi}_r = k_r R'_r \tilde{i}_s - \frac{1}{T_r} \tilde{\Psi}_r - j(\omega_k - Z_p \omega_r) \tilde{\Psi}_r; \quad (6.14)$$

$$\tilde{U}_s = (R_s + k_r^2 R'_r) \tilde{i}_s + \sigma L_s \frac{d\tilde{i}_s}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \tilde{\Psi}_r + j\omega_k \sigma L_s \tilde{i}_s - jZ_p \omega_k \tilde{\Psi}_r. \quad (6.15)$$

Перепишемо (3.14) і (3.15) з урахуванням їх проекцій на осі d і q. Отримаємо наступну систему

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sd} = (R_s + k_r^2 R'_r) i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_r - \omega_k \sigma L_s i_{sq}; \\ U_{sq} = (R_s + k_r^2 R'_r) i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_k \sigma L_s i_{sd} + Z_p \omega k_r \Psi_r; \\ \frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \Psi_r; \\ 0 = k_r R'_r i_{sq} - (\omega_k - Z_p \omega) \Psi_r. \end{array} \right. \quad (5.16)$$

Позначимо

$$R_{sr} = R_s + k_r^2 R'_r, \quad T_{sr} = \frac{\sigma L_s}{R_{sr}}$$

і перепишемо диференційне рівняння (3.16) в операторній формі:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sd} + \frac{k_r}{T_r} \Psi_r + \omega_k \sigma L_s i_{sq} = i_{sd} R_{sr} (T_{sr} p + 1); \\ U_{sq} - \omega_k \sigma L_s i_{sd} - Z_p \omega k_r \Psi_r = i_{sq} R_{sr} (T_{sr} p + 1); \\ L_m i_{sd} = \Psi_r (T_r p + 1); \\ \omega_k = k_r R'_r \frac{i_{sq}}{\Psi_r} + Z_p \omega. \end{array} \right. \quad (6.17)$$

В останньому рівнянні системи (3.17) позначимо:

$$\omega_r = Z_p \omega, \quad \Delta \omega_r = k_r R'_r i_{sq} / \Psi_r = \omega_k - Z_p \omega \quad (6.18)$$

- швидкість ротора і абсолютне ковзання, наведені до швидкості електромагнітного поля.

Рівняння для електромагнітного моменту двигуна представляється як:

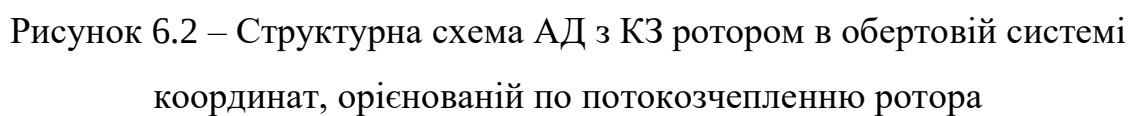
$$M = \frac{3}{2} Z_p k_r \Psi_r i_{sq}. \quad (6.19)$$

При цьому рівняння механічної рівноваги запишеться в звичайному вигляді:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (6.20)$$

де J - приведений момент інерції електроприводу.

За отриманими вище рівнянням в пакеті Matlab складемо модель короткозамкнутого АД. Вона наведена на рисунку 3.14. Наведена структурна схема може бути використана при дослід-вання асинхронного електроприводу з системою векторного управління при управлінні по потокозчеплення ротора. Модель має два лінійних канали управління, що значно спрощує синтез передавальних функцій регуляторних-торів. При цьому в системі управління в залежності від параметрів двигуна повинні бути компенсовані внутрішні перехресні зворотні зв'язки з впливами U_{kd} і U_{kq} .



Розрахуємо динамічні параметри АД. Індуктивності від потоків розсіювання L_{sl} та L_{rl} розраховуються за формулами:

$$L_{rl} = \frac{X_{rl}}{\omega_s}; \quad (6.22)$$

83

$$\omega_s = 2\pi f ; \quad (6.23)$$

$$\omega_s = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314;$$

$$L_{s1} = \frac{0,58}{314} = 0,0018$$

$$L_{r1} = \frac{0,8}{314} = 0,0025$$

Повні індуктивності обмоток статора і ротора розраховуються за формулами, Гн:

$$L_s = L_m + L_{s1}; \quad (6.24)$$

$$L_r = L_m + L_{r1}; \quad (6.25)$$

$$L_s = 0,0018 + 0,035 = 0,0368 \text{ Гн}$$

$$L_r = 0,0025 + 0,035 = 0,037 \text{ Гн}$$

Коефіцієнти зв'язку ротора і статора визначаються як:

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}; \quad (6.26)$$

$$k_s = \frac{L_m}{L_s}. \quad (6.27)$$

Тоді отримуємо :

$$k_r = \frac{0,035}{0,037} = 0,93$$

$$k_s = \frac{0,035}{0,036} = 0,94$$

Результуючий коефіцієнт розсіювання σ і постійні часу, T_r та T_{sr} , розраховуються за формулами:

$$\sigma = 1 - k_r \cdot k_s; \quad (6.28)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}; \quad (6.29)$$

$$T_r = \frac{\sigma \cdot L_s}{R_{sr}}; \quad (6.30)$$

$$R_{sr} = R_s + k_r^2 \cdot R_r \quad (6.31)$$

$$R_{sr} = 0,5 + 0,93^2 \cdot 0,33 = 0,78 \text{ Ом}$$

$$\sigma = 1 - 0,93 \cdot 0,94 = 0,114$$

$$T_r = \frac{0,037}{0,33} = 0,113 \text{ с}$$

$$T_{sr} = \frac{0,114 \cdot 0,036}{0,78} = 0,005 \text{ с}$$

Номінальне ковзання, s_H , визначається як:

$$s_H = \frac{n_s - n_H}{n_s} \quad (6.32)$$

де n_s - синхронна швидкість (швидкість обертання магнітного поля.

$$s = \frac{1500 - 1487}{1500} = 0,87 \%$$

Потокозчеплення статора ψ_{s0} і ротора ψ_{r0} розраховуються по формулам:

$$\psi_{s0} = \frac{U_{\Phi H}}{\omega_s} \quad (6.33)$$

$$\psi_{r0} = k_s \cdot \psi_{s0} \quad (6.34)$$

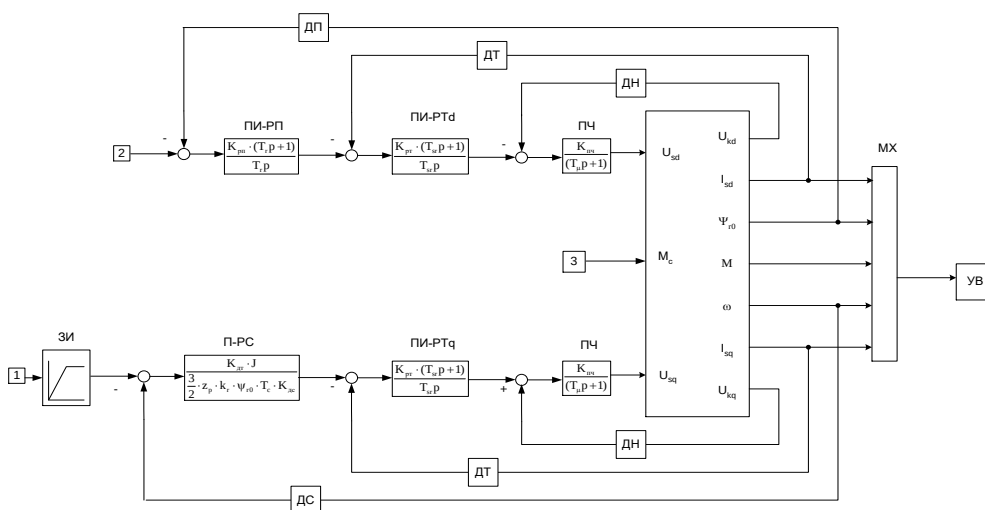
Підставляючи у формули (3.32, 3.33) числові значення отримуємо:

$$\psi_{s0} = \frac{1376}{314} = 4,38 \text{ Вб}$$

$$\psi_{r0} = 0,94 \cdot 4,38 = 4,16 \text{ Вб}$$

Система векторного керування має два канали:

- Сучасні системи векторного керування АД, що випускаються веду-ськi електротехнiчними фiрмами, будуються на базi програмованого мiкропроцесорного управлiння i є цифровими. Однак вони можуть бути представлєнi своiм аналоговим варiантом. Структурна схема такого ЕП показана на рисунку 3.15.



87

На схемі рисунку 3.15 позначено:

1 - сигнал завдання швидкості, $U_{zc} = 10V$;

2 - момент опору, який дорівнює номінальному моменту двигуна,
 $M_c = M_n$;

3 - сигнал завдання потокозчеплення ротора $U_{\psi r0} = 10V$.

6.3 Розрахунок регуляторів

Перетворювач частоти у вигляді АІН будемо представляти, як реальна аперіодична ланка.

Малу некомпенсированое постійну часу перетворювача ча-простоти (ПЧ) приймаємо рівною $T_\mu = 0,002$ с. Таким чином, передавальна функція ПЧ матиме вигляд:

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{T_\mu p + 1} \quad (6.35)$$

де $K_{пч} = 234$ - коефіцієнт посилення перетворювача по напрузі.

Визначимо передавальні функції регуляторів.

Принцип підлеглого регулювання заснований на тому, що всі регулятори повинні компенсувати постійні часу, наявні в об'єкті регулювання. Крім того, в коефіцієнтах посилення регуляторів необхідно врахувати всі коефіцієнти посилення об'єкта.

У каналі регулювання швидкості вибираємо пропорційний регулятор швидкості (РС), а в каналі регулювання потоку - пропорційно-інтегральний регулятор потоку ψ_r (РП).

Налаштування на модульний оптимум (МО) внутрішніх струмових контурів забезпечується пропорційно-інтегральними (ПІ) - регуляторами складових струму i_{sd} і i_{sq} ПІ-РТd, ПІ-РТq з передавальною функцією:

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}(T_{sr}p + 1)}{T_{sr}p} \quad (6.36)$$

де - коефіцієнт підсилення регулятора струму, який визначається за формулою:

$$K_{пч} = \frac{T_{sr}}{K_{от} \cdot T_{\tau}} \quad (6.37)$$

де $K_{от}$ - коефіцієнт посилення об'єкту регулювання РТ;

$T_{\tau} = 2 \cdot T_{\mu} = 0,004$ с - постійна часу контуру струму;

$$K_{от} = K_{пч} \cdot K_{дт} \cdot \frac{1}{R_{sr}} \quad (6.38)$$

Де $K_{дт}$ - коефіцієнт передачі датчика струму;

$$K_{дт} = \frac{10}{2,5 \cdot 142} = 0,028$$

$$K_{от} = 137 \cdot 0,028 \cdot \frac{1}{0,78} = 8,37$$

Такі регулятори активного і реактивного струму повністю компенсують інерційність об'єкта управління і мають ідентичні передавальні функції.

Для забезпечення стабілізації потоку (тобто підтримки його на постійному рівні) синтезується ПІ-регулятор потоку. Передавальна функція якого буде мати вигляд:

$$W_{\text{рп}}(p) = \frac{K_{\text{рп}}(T_{\text{г}}p + 1)}{T_{\text{г}}p} \quad (6.39)$$

де - коефіцієнт підсилення регулятора потоку, який визначається за формулою:

$$K_{\text{рп}} = \frac{T_{\text{г}}}{K_{\text{оп}} \cdot T_{\text{п}}} \quad (6.40)$$

де $K_{\text{оп}}$ - коефіцієнт підсилення об'єкта керування РП.

$T_{\text{п}} = 2 \cdot T_{\text{г}} = 0,008\text{с}$ – постійна часу контуру потокозчеплення.

Коефіцієнт підсилення $K_{\text{оп}}$ визначається як:

$$K_{\text{оп}} = K_{\text{т}} \cdot K_{\text{дп}} \cdot L_{\text{м}} \quad (6.41)$$

де $K_{\text{т}} = \frac{1}{K_{\text{дт}}}$ - коефіцієнт підсилення оптимізованого токового контуру;

$K_{\text{дп}}$ - коефіцієнт передачі датчика потокозчеплення ротора.

$$K_{\text{т}} = \frac{1}{0,028} = 35,5$$

Коефіцієнт $K_{\text{дп}}$ - визначається як:

$$K_{\text{дп}} = \frac{10}{\Psi_{\text{г0}}} \quad (6.42)$$

$$K_{дп} = \frac{10}{4,16} = 2,4$$

Таким чином отримуємо:

$$K_{оп} = 35,5 \cdot 2,4 \cdot 0,035 = 2,98$$

$$K_{рп} = \frac{0,113}{2,98 \cdot 0,008} = 4,76$$

Канал регулювання потоку являється астатичним першого порядку, таким чином в ньому буде відсутня помилка по задаючому сигналу.

Для налаштування контуру швидкості можуть бути взяті як ПІ-, так і П-регулятори швидкості. Для ПІ-регулятора швидкості передавальна функція буде мати вигляд:

$$W_{pc} = \frac{K_{pc}(T_{\mu}p+1)}{T_{\mu}p} \quad (6.43)$$

$$K_{pc} = \frac{K_{дт} \cdot J}{\frac{3}{2} \cdot z_p \cdot k_r \cdot \psi_{r0} \cdot T_c \cdot K_{дс}} \quad (6.44)$$

де $T_c = 2 \cdot T_r = 0,008$ - постійна часу контуру швидкості, с.

Коефіцієнт підсилення датчика швидкості розраховується з умови задання величини керуючого напруги в каналі регулювання швидкості. Приймається $U_{зс} = 10$ В. Виходячи з цього визначається коефіцієнт посилення зворотного зв'язку за швидкістю:

$$K_{\text{дс}} = \frac{10}{\omega_{\text{н}}} \quad (6.45)$$

$$K_{\text{дс}} = \frac{10}{155} = 0,058$$

Тоді отримуємо коефіцієнт підсилення регулятора швидкості:

$$K_{\text{рс}} = \frac{0,028 \cdot 15}{\frac{3}{2} \cdot 2 \cdot 0,93 \cdot 4,16 \cdot 0,008 \cdot 0,058} = 77$$

Канал регулювання швидкості є однократноінтегруючим. Таким чином, в системі при набиранні навантаження є просадка швидкості (статична помилка).

Завдання на вхід системи подається через задатчик інтенсивності (ЗІ). Постійна часу ЗІ $T_{\text{зи}}$ розраховується за співвідношенням, с:

$$T_{\text{зи}} = \frac{J \cdot \omega_{\text{н}}}{0,8 \cdot M_{\text{н}}} \quad (6.46)$$

де $M_{\text{н}}$ - номінальний момент двигуна, Н·м:

$$T_{\text{зи}} = \frac{15 \cdot 155}{0,8 \cdot 2919} = 0,7$$

Пуск від ЗІ здійснюється для можливості забезпечення постійного прискорення, а також для уникнення інтенсивних коливань моменту і струму, які будуть спостерігатися при прямому пуску.

Завдання на систему подається з затримкою 0,06 с. Це необхідно для того, щоб потік в двигуні вийшов на номінальне значення.

В об'єкті управління (АД) є перехресні зв'язку, які спричиняють істотний вплив на динаміку ЕП. У перехідних режимах спостерігається значна коливальність і просадка швидкості. Отже, ці зв'язки необхідно компенсувати. Для цього сигнали U_{kd} і U_{kq} подаються на вхід ланок, що описують перетворювач частоти в каналі реактивного і в каналі активного струмів відповідно.

За допомогою перетворювачів координат, які складають виконай тільну частина системи, з обертової системи координат dq в нерухому $\alpha\beta$ і з двофазної $\alpha\beta$ в трифазну А, В, С можна отримати реальні струми в фазах двигуна.

Перетворення з обертової системи координат dq в нерухому $\alpha\beta$ можна реалізувати на підставі рівняння:

$$\bar{v}_{dq} = \bar{v} = \bar{v}_{\alpha\beta} e^{-j\gamma_k} \quad (6.47)$$

Перетворення з обертової системи координат dq в нерухому $\alpha\beta$ можна реалізувати на підставі рівняння:

$$\begin{cases} v_A = v_\alpha; \\ v_B = -\frac{1}{2}v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta; \\ v_C = -\frac{1}{2}v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}v_\beta. \end{cases} \quad (6.48)$$

В результаті моделювання АД з векторним керуванням були отримані наступні характеристики (рисунок 6.4):

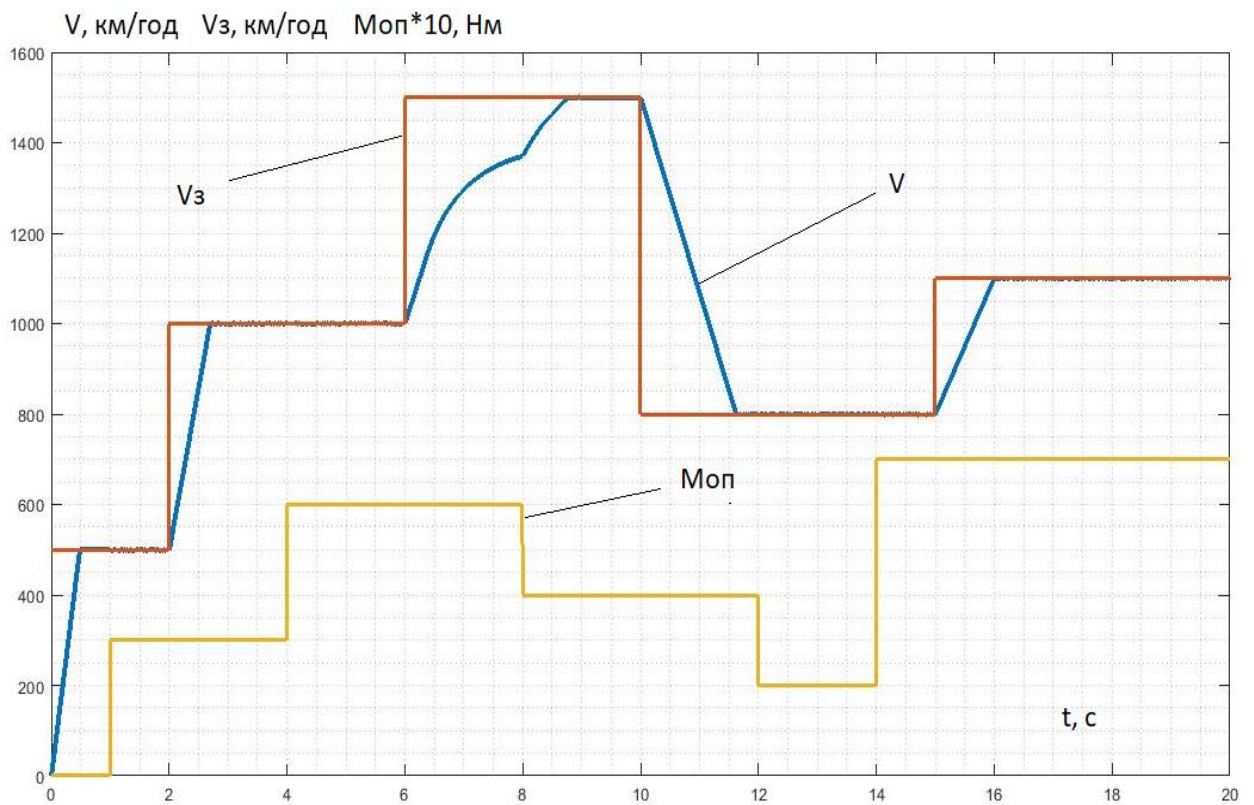


Рисунок 6.4 – Характеристики двигуна при векторному керуванні при різних значеннях моменту опору та різних швидкостях завдання

З даного графіка видно, що двигун починає розганятися без навантаження, а на першій секунді прикладається момент опору. Також на графіку показана крива завдання швидкості, яку відпрацьовує електродвигун при різних моментах опору. При цьому векторній системі керування відповідають досить високі показники якості її роботи.

В подальшому було складено імітаційну модель роботи поїзда з асинхронним електроприводом та векторним керуванням у середовищі Matlab (рисунок 6.5).

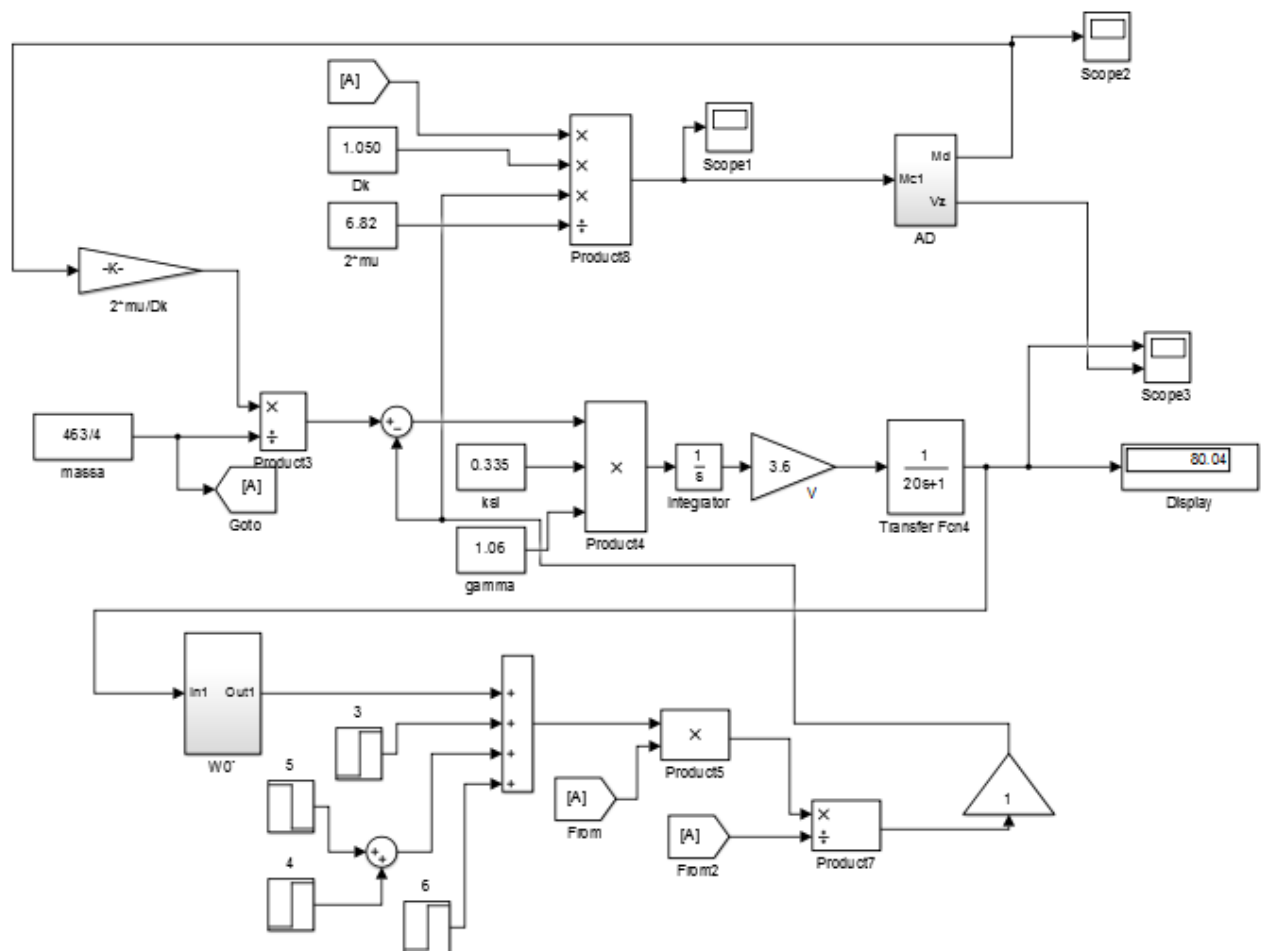


Рисунок 6.5 – Модель поїзда з асинхронним приводом

Принцип моделювання потяга представлено в розділі 3 дипломного проекту. Тому модель потяга беремо ту ж саму, але замість привода постійного струму ставимо асинхронний привід з векторним законом керування двигуна.

У результаті моделювання отримані основні характеристики роботи електровоза з асинхронним електроприводом при векторному керуванні, що наведені на рисунках 6.6 та 6.7.

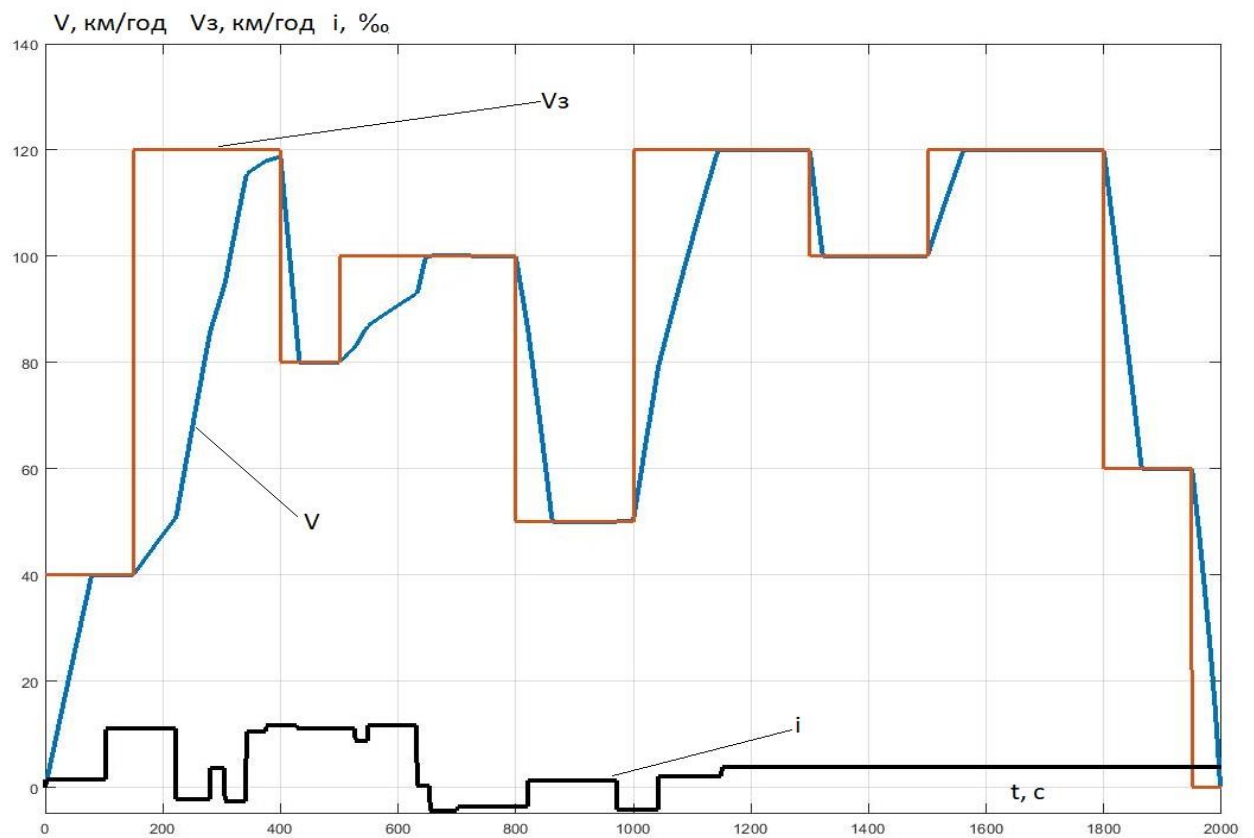


Рисунок 6.8 – Швидкість потяга на ділянці Харків – Мерефа

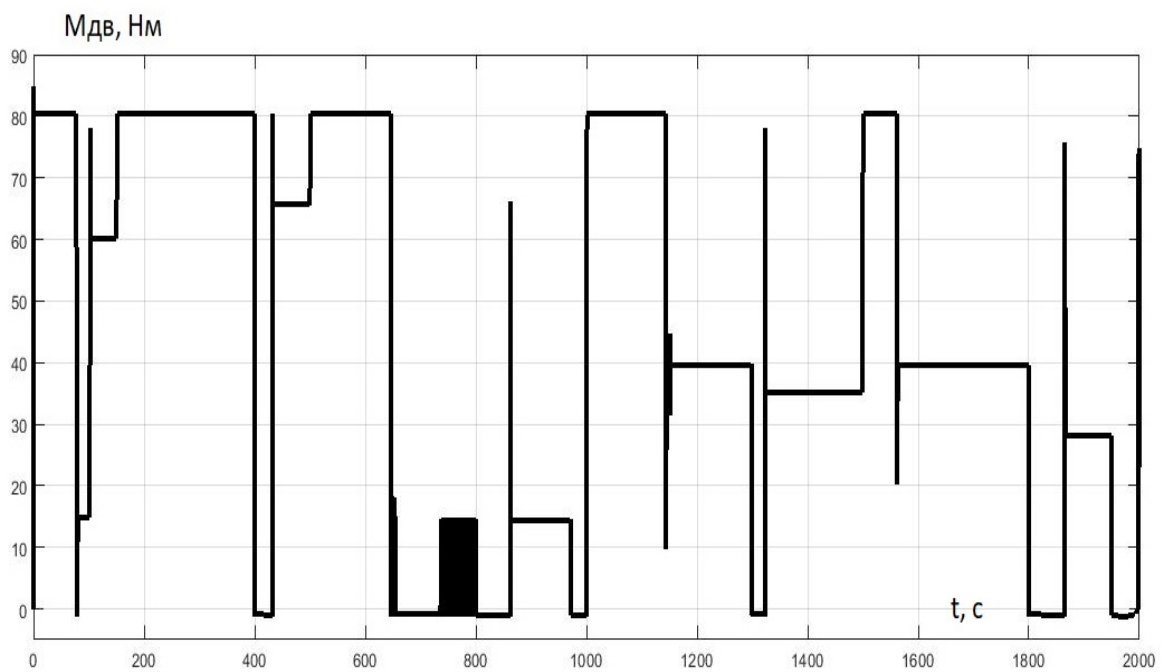


Рисунок 6.9 – Момент двигуна при русі поїзда ділянкою Харків – Мерефа

7 Визначення економічного ефекту від запровадження асинхронних двигунів на електровоз постійного струму

7.1 Коротка характеристика запропонованого рішення

Електровози ЧС-7 призначені для роботи з пасажирськими поїздами на залізницях, електрифікованих на постійному струмі (3000 В). Все устаткування електровоза розраховане на надійну роботу при напрузі в контактній мережі від 2700 до 3300 В, а також при зміні температури навколишнього повітря поза кузовом електровоза від -50 до +40°C.

Модернізація тягового електроприводу електровозу, а саме запровадження тягових асинхронних двигунів з живленням від статичних перетворювачів електроенергії, дає можливість реалізовувати на даному рухомому складі більш надійну систему керування для тягового привода. Це надає нам можливість суттєвого поліпшення умов роботи ТЕД та економити електроенергію.

При модернізації буде демонтовано 8 двигунів постійного струму 1AL-4846dT, та реостатно-контакторну систему керування ними, яка складається з 8 резисторів та 24 контакторів (3 контактори для кожного з двигунів). Замість цього буде встановлено 2 перетворювача частоти, які складаються з випрямляча та інвертора напруги та 8 тягових асинхронних двигунів НБ-607. Порівняльна характеристика базових та нових двигунів наведена у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Порівняльна характеристика базового та нового двигунів

Параметр	Значення	
	1AL-4846dT	НБ-607
Напруга живлення, В	1500	1870
Струм, А	545	450
Потужність, кВт	770	920
ККД, %	93,8	95,5
Маса, кг	2950	2190

7.2 Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект визначається за весь розрахунковий період, включаючи розробку, виробництво і використання нової техніки, тобто є інтегральним ефектом. Він розраховується виходячи з умов використання тієї продукції (кінцевої продукції), яку планується виробляти з застосуванням нових науково-технічних розробок. Під умовами використання мають на увазі обсяг випуску кінцевої продукції на протязі розрахункового періоду з застосуванням нових технічних засобів, матеріалів, технологій і попередньої ціни на неї.

Сумарний по рокам розрахункового періоду економічний ефект (E_T) визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів за розрахунковий період (P_T) над вартісною оцінкою сукупних витрат за розрахунковий період (Z_T).

$$E_T = P_T - Z_T \quad (7.1)$$

При розрахунку економічного ефекту проводиться обов'язкове приведення різночасових витрат і результатів до єдиного для всіх варіантів реалізації заходу НТП моменту часу – розрахунковому року t_p . Приведення різночасових витрат і результатів всіх років періоду реалізації до розрахункового року здійснюється шляхом множення їхньої величини за кожний рік на коефіцієнт приведення α_t , що визначається за формулою

$$\alpha_t = (1 + E_n)^{t_p - t}, \quad (7.2)$$

де E_n – норматив приведення різночасових витрат і результатів, $E_n=0,1$;

t_p – розрахунковий рік;

t – рік, витрати і результати якого приводяться до розрахункового року.

До капітальних вкладень на модернізацію одного електровозу входять витрати, пов'язані з придбанням перетворювача, що складається з випрямляча та інвертора, тягового двигуна, витрати на демонтаж базового обладнання і монтаж нового. Вартість випрямляча Schneider складає 639275 грн., інвертора виробництва компанії АВВ – 1126800 грн. Вартість тягового двигуна виробництва Siemens складає 974320 грн. Загальна вартість обладнання складе 9326710 грн., що наведено у таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Капітальні вкладення на придбання обладнання

Назва обладнання	Кількість, шт.	Вартість одиниці, грн	Усього, грн
Випрямляч	2	639275	1278550
Інвертор напруги	2	1126800	2253600
Тяговий двигун АД-914	8	974320	7794560
Разом			10351660

Розглянемо витрати підприємства на оплату праці працівників та нарахування на заробітну плату, що пов'язані з демонтажем базового обладнання та монтажем нового обладнання. Трудові витрати на демонтаж базового обладнання та монтаж нового представлені в таблиці 7.3, де розрахована основна і додаткова заробітна плата слюсарів п'ятого розряду по видам виконаних робіт, а також загальна сума трудових витрат.

Трудові витрати на виконання монтажу обладнання складуть, грн.

$$B_{\text{МОНТ}} = Z_M \cdot m, \quad (7.3)$$

де m - кількість обладнання, од.;

$З_M$ –трудові витрати на монтаж обладнання, грн

Трудові витрати на демонтаж складають

$$B_{\text{ДЕМОНТ}} = З_D \cdot m, \quad (7.4)$$

де m - кількість обладнання, од.;

$З_D$ –трудові витрати на демонтаж обладнання, грн

Таблиця 7.3 – Трудові витрати на демонтаж та монтаж обладнання

Вид робіт	Розряд	Кількість працівн.	Годин. тариф. ставка	Кількість годин на одиницю	Основна заробітна плата, грн.	Додатк. заробітн плата, грн.	Єдиний соц. внесок, грн..	Усього грн.
Демонтаж реостату	5	2	50,46	1	100,92	10,092	24,42	135,43
Демонтаж контактора	5	2	50,46	0,5	50,46	5,046	12,21	67,72
Демонтаж базового двигуна	5	4	50,46	4	807,36	80,736	195,38	1083,48
Монтаж випрямляча	5	3	50,46	2	302,76	30,276	73,27	406,30
Монтаж інвертора	5	3	50,46	4	605,52	60,552	146,54	812,61
Монтаж асинхрон. двигуна	5	4	50,46	4	807,36	80,736	195,38	1083,48

Підставляємо значення та отримуємо:

$$B_{\text{ДЕМОНТ.Р}} = 135,43 \cdot 8 = 1083,47 \text{ грн}$$

$$B_{\text{ДЕМОНТ.К}} = 67,72 \cdot 24 = 1625,22 \text{ грн}$$

$$B_{\text{ДЕМОНТ.Д}} = 1083,48 \cdot 8 = 8667,82 \text{ грн}$$

$$B_{\text{ДЕМОНТ}} = 1083,47 + 1625,22 + 8667,82 = 11376,51 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ.В}} = 406,3 \cdot 2 = 812,6 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ.ІН}} = 812,61 \cdot 2 = 1625,22 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ.Д}} = 1083,48 \cdot 8 = 8667,82 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ}} = 812,6 + 1625,22 + 8667,82 = 11105,64 \text{ грн}$$

Втрати на матеріали для монтажу випрямляча та інвертора представляють собою витрати на монтажний комплект, який складається з кабельно-провідникової продукції, кабельних муфт, кабельних наконечників та кріпильного матеріалу. Монтажний комплект матеріалів для встановлення тягового асинхронного двигуна включає в себе кабельні муфти, кабельні наконечники, листовий метал, зварювальні електроди тощо. Розрахунок витрат на матеріали для монтажу наведений у таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 – Витрати на матеріали для монтажу одиниці обладнання

Вид робіт	Найменування матеріалу	Ціна за одиницю матеріалу, грн.	Кількість матеріалу, од.	Усього грн.
Монтаж випрямляча	комплект монтажний	54780	2	109560
Монтаж інвертора	комплект монтажний	72687	2	145374
Монтаж асинхрон. двигуна	комплект монтажний	17843	8	142744

Загальні витрати на монтаж обладнання складають 397678 грн.

В загальному вигляді капітальні вкладення на модернізацію одного електровоза складають, грн.:

$$\Delta K = \Sigma B_{\text{ПО}} + B_{\text{МОНТ}} + B_{\text{ДЕМОНТ}} + B_{\text{МАТ}}, \quad (7.5)$$

де $\Sigma B_{\text{ПО}}$ – витрати на придбання обладнання, грн.

$B_{\text{МАТ}}$ – витрати на монтажні матеріали, грн.

$$\Delta K = 10351660 + 11376,51 + 11105,64 + 397678 = 10830720,15 \text{ грн}$$

У даному розділі розрахунок економічного ефекту базується на отриманні прибутку від нововведення за рахунок економії електричної енергії на тягу поїздів.

Витрату електроенергії на тягу поїздів для електровоза з різними типами приводів виконуємо, користуючись правилами тягових розрахунків для електрорухомого складу (при цьому необхідні тягові та струмові характеристики). Вибираємо ділянку обслуговування: Київ – Житомир. Отримавши часові та струмові характеристики для даного профілю шляху, розраховуємо спожиту електроенергію за формулою:

$$A = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{1000 \cdot 60}, \quad (7.6)$$

де U – напруга на струмоприймачу електровоза, В;

I – величина активного струму, А;

Δt – час дії струму, хв.

На рисунку 7.1 показано рівень спожитої електричної енергії електровозом з різними типами приводів.

Виходячи з рисунку 7.1, отримуємо споживання електровозом із базовими двигунами при русі по маршруту Харків – Лиман 1929,2 кВт·год, при русі у зворотному напрямку – 2124,2 кВт·год. Для модернізованого варіанту

виходячи з правил тягових розрахунків споживання склало 1401,5 та 1650,5 кВт·год відповідно. З вище сказаного визначимо різницю споживання електроенергії за оберт за розрахованим графіком:

$$\Delta E = 1929,2 + 2124,2 - 1401,5 - 1650,5 = 1001,4 \text{ кВт·год}$$

Середньодобовий пробіг електровоза визначається за формулою

$$L_c = \frac{24}{T_l} \cdot 2 \cdot L = \frac{48L}{T_l}, \quad (7.7)$$

де L – відстань ділянки обертання локомотива ($L = 181 \text{ км}$);

T_l – повний обіг локомотива, год.

Час оберту електровозу:

$$T_l = 2t_{\text{пр}} + \frac{2L}{V_{\text{дїл}}} + t_{\text{об}} + t_{\text{ос}} \quad (7.8)$$

де $V_{\text{дїл}}$ – дільнична швидкість на дільниці, $V_{\text{дїл}} = 72 \text{ км/год}$;

$t_{\text{пр}}$ – час простою із пасажирським поїздом на станціях відправлення та прибуття, $t_{\text{пр}} = 0,5 \text{ год}$;

$t_{\text{об}}$ – час простою в оборотному депо, $t_{\text{об}} = 7 \text{ год}$;

$t_{\text{ос}}$ – час простою в основному депо, $t_{\text{ос}} = 9,5 \text{ год}$;

L – довжина ділянки, $L = 181 \text{ км}$.

$$T_l = 2 \cdot 0,5 + \frac{2 \cdot 181}{72} + 7 + 9,5 = 22,5 \text{ год}$$

Для електровоза повний обіг включає час на проїзд шляху, час простою у основному та оборотному депо, а також час простою із пасажирським поїздом на станціях відправлення та прибуття. Повний обіг локомотива складає 22,5 год.

Визначимо середньодобовий пробіг локомотива:

$$L_c = \frac{48 \cdot 181}{22,5} = 386 \text{ км}$$

Визначимо пробіг локомотива за рік

$$L_{\text{рік}} = 365 \times L_c \quad (7.9)$$

де L_c - пробіг середньодобовий, км

$$L_{\text{рік}} = 365 \times 386 = 140765 \text{ км}$$

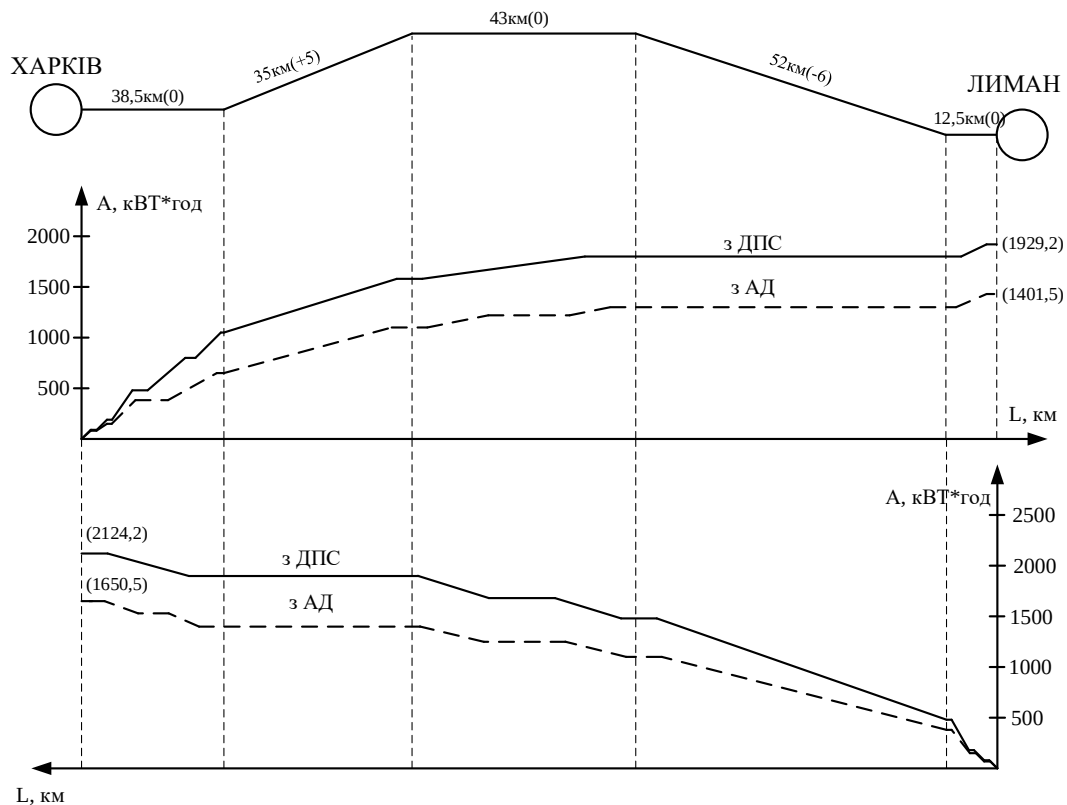


Рисунок 7.1 – Графік залежності використання електроенергії на ділянці 181 км

Визначимо річну економію електроенергії на новій моделі за формулою:

$$\Delta E_{\text{річ}} = \Delta P \times K_{\text{об}} \times e, \quad (7.10)$$

де $K_{\text{об}}$ - кількість обертів локомотива за рік

e - вартість 1-го кВтгод електроенергії, $e=6,9$ грн.

$$K_{\text{об}} = \frac{365 \cdot 24 - \sum T_{\text{KP}2} - \sum T_{\text{KP}1} - \sum T_{\text{TP}1} - \sum T_{\text{TP}2} - \sum T_{\text{TP}3} - \sum T_{\text{mo}3}}{T_{\text{л}}}, \quad (7.11)$$

де $T_{\text{л}}$ - час обертання локомотива, год;

$\sum T_{\text{KP}}$ - простій на ремонті КР, год;

$\sum T_{\text{TP}}$ - простій на ремонті ТР, год;

$\sum T_{\text{mo}}$ - простій на ТО, год.

Простій на ремонті за рік

$$\sum T = \sum M \cdot t_{\text{рем}}. \quad (7.12)$$

Кількість ремонтів і-го виду за рік

$$\sum M_i = \frac{L_{\text{річ}}}{n_{\text{рем}_i}}, \quad (7.13)$$

де $n_{\text{рем}_i}$ – міжремонтний пробіг і-го виду ремонту, км;

Таблиця 7.5 – Міжремонтні пробіги для електровозу ЧС-7

Вид ремонту	ТО-3	ПР-1	ПР-2	ПР-3	КР-1	КР-2
Пробіг, км	15000	30000	200000	400000	800000	2400000

$$\sum M_{KP2} = \frac{140765}{2400000} = 0,06$$

$$\sum M_{KP1} = \frac{140765}{800000} - 0,06 = 0,12$$

$$\sum M_{mp3} = \frac{140765}{400000} - 0,06 - 0,12 = 0,18$$

$$\sum M_{mp2} = \frac{140765}{200000} - 0,06 - 0,12 - 0,18 = 0,35$$

$$\sum M_{mp1} = \frac{140765}{30000} - 0,06 - 0,12 - 0,18 - 0,35 = 3,99$$

$$\sum M_{mo3} = \frac{140765}{15000} - 0,06 - 0,12 - 0,18 - 0,35 - 3,99 = 4,69$$

$$\sum T_{KP2} = 0,06 \cdot 336 = 19,71 \text{ год}$$

$$\sum T_{KP1} = 0,12 \cdot 240 = 28,15 \text{ год}$$

$$\sum T_{mp3} = 0,18 \cdot 91 = 16,01 \text{ год}$$

$$\sum T_{mp2} = 0,35 \cdot 36 = 12,67 \text{ год}$$

$$\sum T_{mp1} = 3,99 \cdot 15 = 59,83 \text{ год}$$

$$\sum T_{mo3} = 4,69 \cdot 6 = 28,15 \text{ год}$$

$$K_{об} = \frac{365 \cdot 24 - 19,71 - 28,15 - 16,01 - 12,67 - 59,83 - 28,15}{24} = 358,1$$

Отже, загальна економія електричної енергії за рік:

$$\Delta E_{ел.річ} = 1001,4 \cdot 358,1 \cdot 6,9 = 2474349,25 \text{ грн}$$

При виконанні електровозу ТО-2 завжди проводять огляд двигуна постійного струму (ДПС). При заміні ДПС на вентильно-індукторний двигун огляд двигуна виконувати не потрібно (через відсутність щіточко-колекторного вузла). Тим самим зменшується час виконання ТО-2.

Розрахуємо кількість ТО-2 за рік:

$$\begin{aligned} \sum M_{ТО-2} &= \frac{365}{2} - \sum M_{КР2} - \sum M_{КР1} - \sum M_{мр3} - \sum M_{мр2} - \sum M_{мр1} - \sum M_{мо3} \\ \sum M_{ТО-2} &= \frac{365}{2} - 0,06 - 0,12 - 0,18 - 0,35 - 3,99 - 4,69 = 173,1 \end{aligned}$$

Час на обслуговування колекторного двигуна постійного струму при виконанні ТО-2 0,5год., а тому, при умові виконання ТО слюсарем третього розряду з годинною тарифною ставкою 50,46 грн, економію коштів на виконання ТО-2 можна розрахувати за наступною формулою:

$$\Delta E_{ТО-2,річ} = 173,1 \cdot 50,46 \cdot 0,5 = 4367,31 \text{ грн}$$

Отже, загальна економія коштів за рік наступна:

$$\Delta E_{річ} = \Delta E_{ел.річ} + \Delta E_{ТО-2,річ}$$

$$\Delta E_{річ} = 2474349,25 + 4367,31 = 2478716,56 \text{ грн.}$$

Розрахунок економічного ефекту здійснюємо за формулами 7.1. і 7.2 та заносимо до таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Розрахунок економічного ефекту за роками експлуатації

Показник	Розрахунковий період (роки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Капітальні вкладення K_t , тис.грн.	9749,6									
Економія поточних витрат ΔC_t , тис. грн	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7
Економічний ефект E_t , тис.грн.	-7270,9	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7	2478,7
Коефіцієнт приведення α_t	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621	0,564	0,513	0,467	0,424	0,386
Економічний ефект з урахуванням приведення $E_t \cdot \alpha_t$	-6609,9	2048,5	1862,3	1693,0	1539,1	1399,2	1272,0	1156,3	1051,2	955,6
Економічний ефект наростаючим підсумком $E_1 + E_2 + \dots + E_k$ тис.грн.	-6609,9	-4561,4	-2699,1	-1006	533,0	1932,1	3204,1	4360,4	5411,6	6367,3

З таблиці 7.6 видно, що за життєвий цикл обладнання у 10 років економічний ефект складе 6367300 грн., що вказує на доцільність запропонованої модернізації тягового електроприводу електровозу ЧС-7. Час повернення коштів, що пішли на капітальні затрати – 5 років.

Висновки

За останні роки на залізничному транспорті відбулися значні зміни в техніці, методах експлуатації і економіці. Багато що зроблене по технічному переоснащенню залізниць. Удосконалення потребує і рухомий склад. Майже всі електровози українських залізничних доріг обладнані електроприводами з двигунами постійного струму (ДПС). Широке використання ДПС в тяговому приводі обумовлене простотою регулювання частоти обертання двигуна. Найбільш економічними та гнучкими в керуванні є автоматичні системи плавного керування режимами роботи привода електровозів на основі тиристорних схем керування. Не дивлячись на покращення, щодо відношення до реостатної системи, експлуатаційних та енергетичних характеристик імпульсним та високочастотним системам привода характерний загальний недолік – наявність ненадійного ДПС.

У зв'язку з цим в роботі ставилася задача розробки альтернативного тягового привода, у якого відсутні недоліки привода постійного струму. В цьому співвідношенні кращі показники притаманні двигунам змінного струму. Використання асинхронного двигуна пов'язано з необхідністю застосування складного перетворювача.

З урахуванням вище сказаного були проведені дослідження з точки зору можливого застосування нових типів електричних двигунів з системою керування для приводу електровозу постійного струму ЧС-7. Для цього в процесі моделювання була розроблена структурна схема потяга, а також на її основі побудована і математична модель з різними типами двигунів (ДПС, АД) та з урахуванням навантаження. Були досліджені різні типи систем керування такі, як СПК. В якості навантаження був змодельований профіль шляху з різними величинами ухилів. На базі отриманої моделі були зняті осцилограми швидкості руху потягу та тягові характеристики електровозу.

Список використаних джерел

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
2. Astrom K.J. Advanced PID Control [Текст] / Astrom K.J., Hagglund T. - Instrumentation, Systems, and Automation Society, USA, 2006. – 250 p.
3. Гоголюк П. Ф., Гречин Т. М. Теорія автоматичного керування: Підручник., – Л.: Львівська політехніка, 2012. – 280 с
4. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування: курс лекцій (частина перша) – К.: НУХТ, 2004 –124 с.
5. Основи електроприводу: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.Ю. Синявський, В.В. Савченко; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К. 2010.
6. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
7. Electrical Drives. Principles-Planning-Applications-Solutions. Jens Weidauer, Richard Messer / Siemens, 2015, англійською мовою.
8. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: Навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Пижов, Н.Д. Красношопка, М.Я. Островерхов. – К.: 2020.
- 9 Сенько, В.І. Електроніка і мікросхемотехніка. Елементна база електронних пристроїв. [Текст]: Підручник у 4-х томах / В.І. Сенько, за ред. В. І. Сенька. Т.1. – К.: Обереги, 2000. – 300 с.
- 10 Банєв, Є.Ф. Енергоресурсозберігаючий електропривод ескалятора метрополітена [Текст]: дис. к.т.н.: 05.09.03 / Є.Ф. Банєв. Харків, 2013. – 140 с.
- 11 Чорний, О.П. Моделювання електромеханічних систем [Текст] / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовой – Кременчук, 2001. – 376 с.
- 12 Приймак, Б.І. Нечітке керування електротехнічними об'єктами [Текст] / Б.І. Приймак, М.М. Бондаренко, О.М. Халімовський // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №10. – С. 308-311.

Додаток А
Ілюстраційний матер

Дослідження роботи модернізованого електровозу ЧС7

Розробив:

студент групи 214-ЕЕ-Д22

Андрій КОРНІЮК

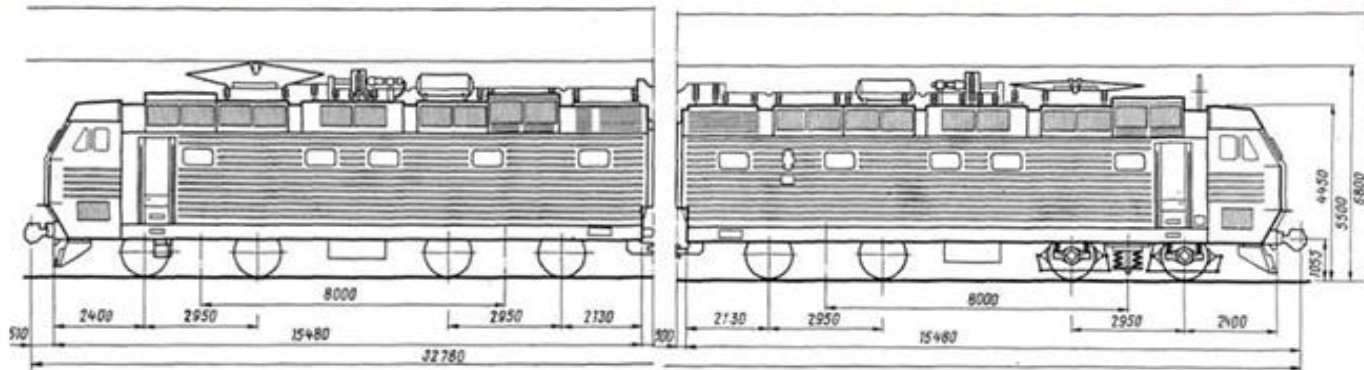
Керівник:

к.т.н., доц. Андрій МАСЛІЙ

- Аналіз роботи електровозу ЧС-7;
- Пошук засобів підвищення енергоефективності локомотива;
- Розробка імітаційної моделі руху поїзда з електровозом ЧС-7 та приводом постійного струму;
- Розробка системи підлеглого керування приводом постійного струму;
- Розробка імітаційної моделі асинхронного двигуна та частотного перетворювача;
- Розробка імітаційної моделі систем векторного керування асинхронними двигунами;
- Розробка імітаційної моделі руху поїзда з електровозом ЧС-7 з системою підлеглого керування та асинхронним приводом;
- Економічне обґрунтування доцільності модернізації електровозу.

Загальний вигляд електровозу ЧС7

3



Математичне моделювання електродвигуна постійного струму 1AL4846dT

4

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = L_{\Sigma} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + r_{\Sigma} \cdot I_{\text{я}} + E \\ M_{\partial\theta} - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ E = C_M \Phi \omega \\ M_{\partial\theta} = C_M \Phi I_{\text{я}} \end{cases}$$

Рисунок 1 - Система рівнянь

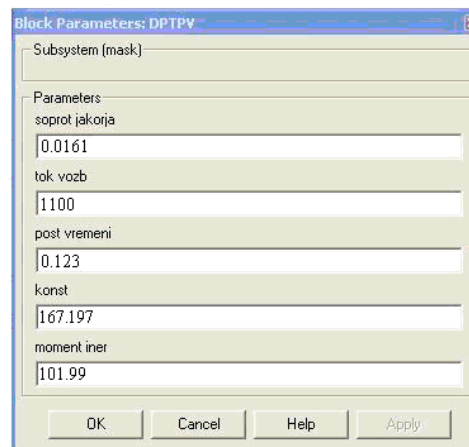


Рисунок 2 – Маска моделі

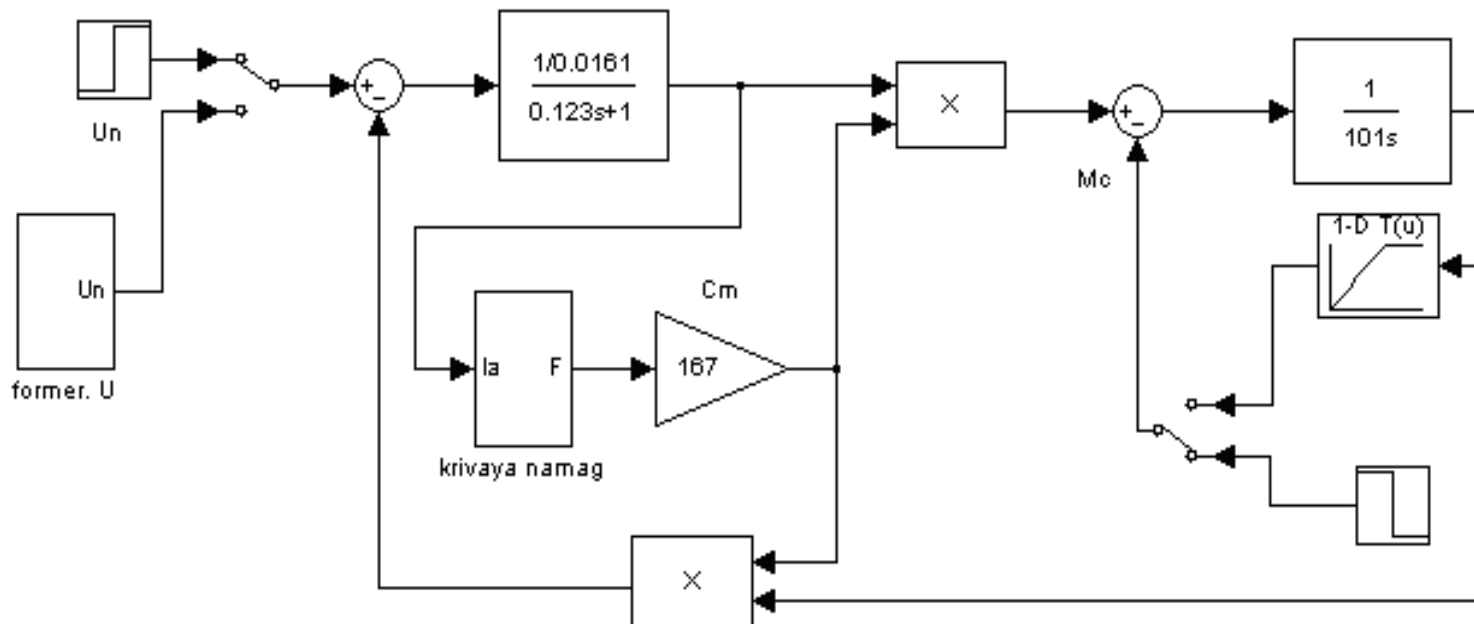


Рисунок 3 – Математичне модель

Результати моделювання тягового електродвигуна 1AL4846dT

5

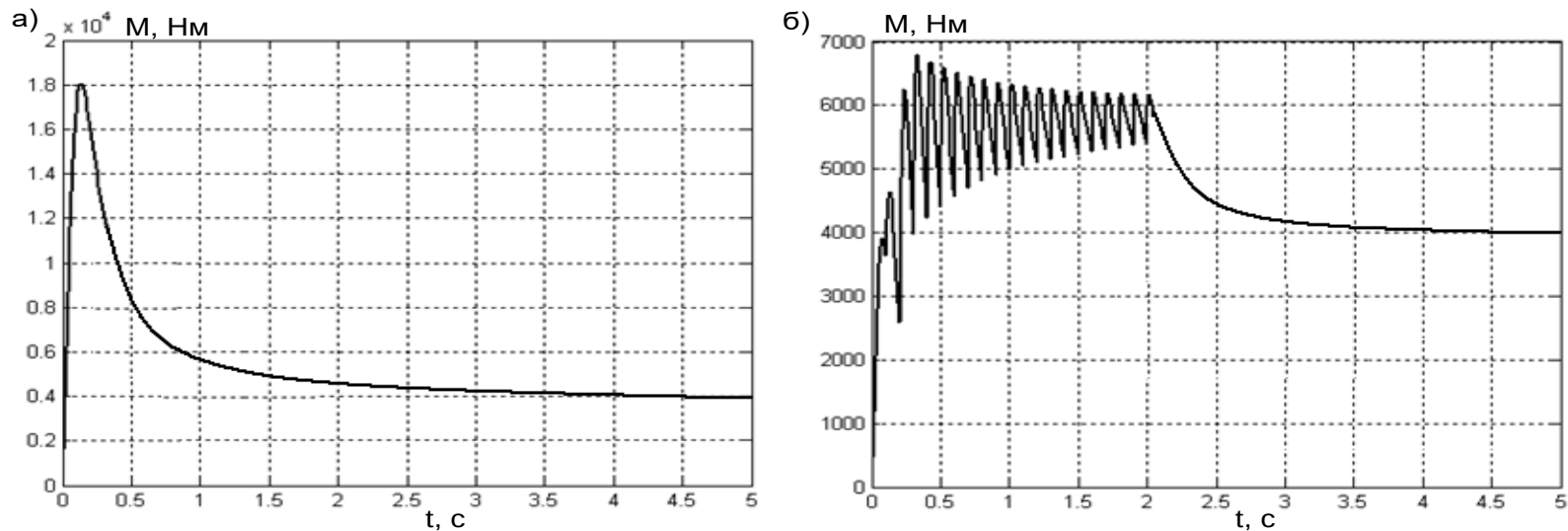


Рисунок 1 – Характеристика моменту електродвигуна: а) – при прямому пуску, б) – при реостатному керування

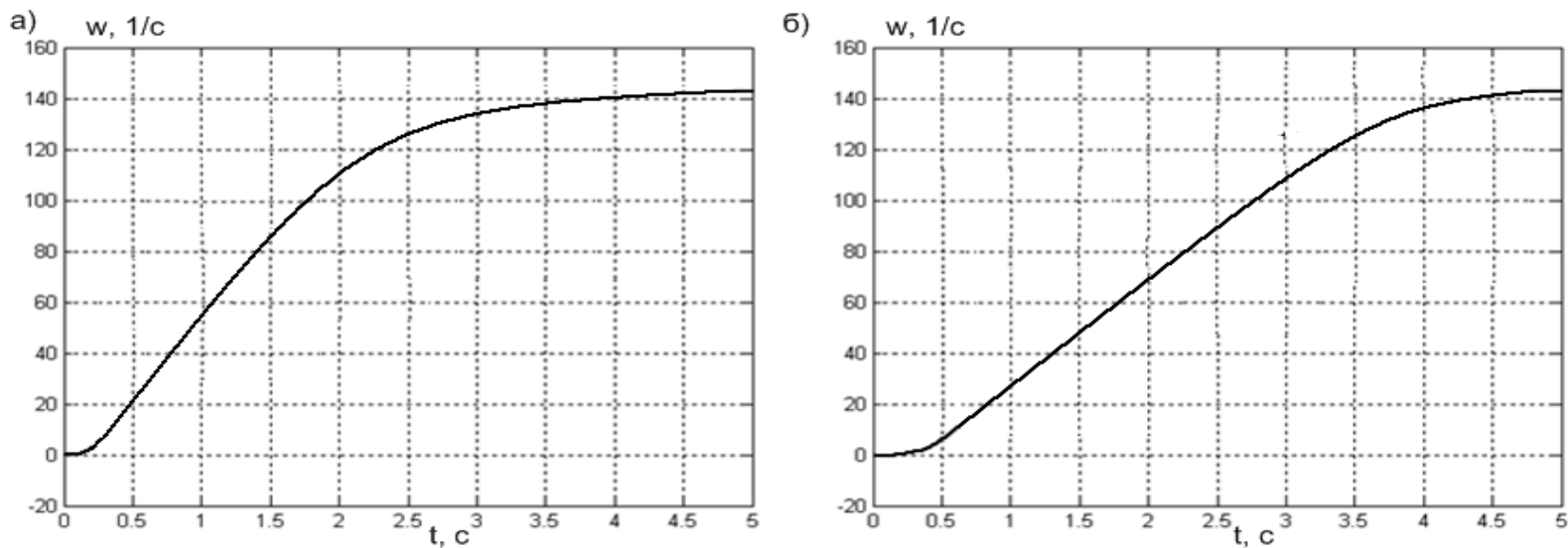
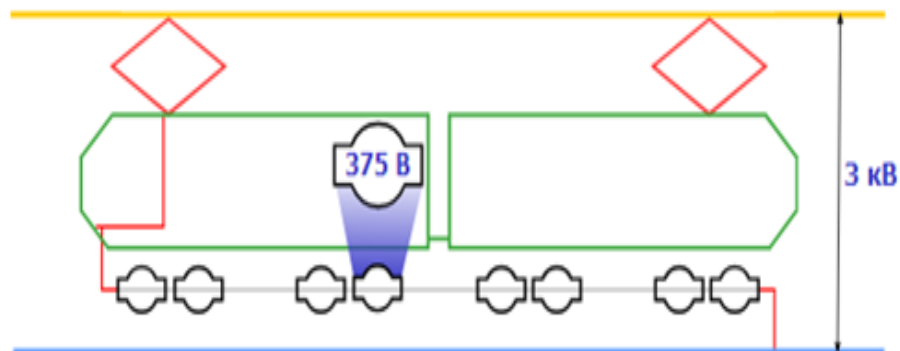


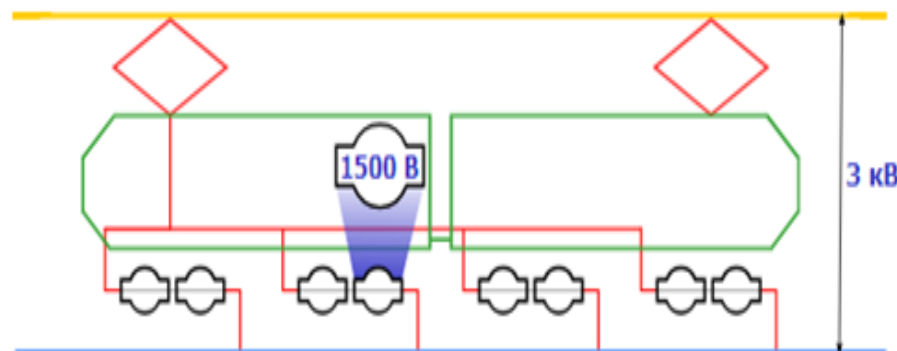
Рисунок 2 – Характеристика швидкості двигуна а) – при прямому пуску, б) – при реостатному керування

Способи регулювання швидкості електровоза ЧС7

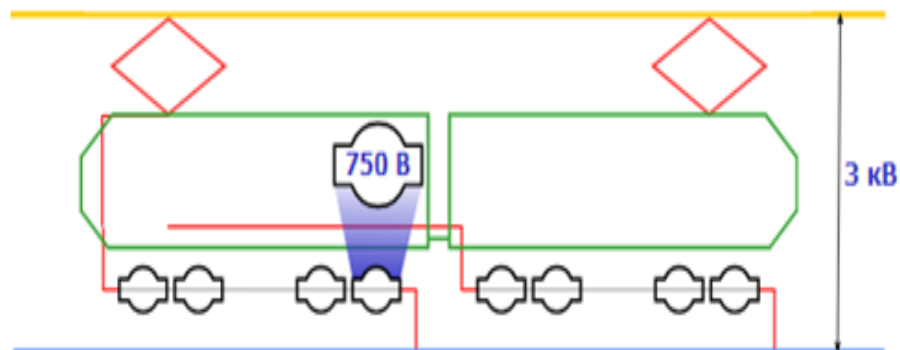
Послідовне з'єднання



Паралельне з'єднання



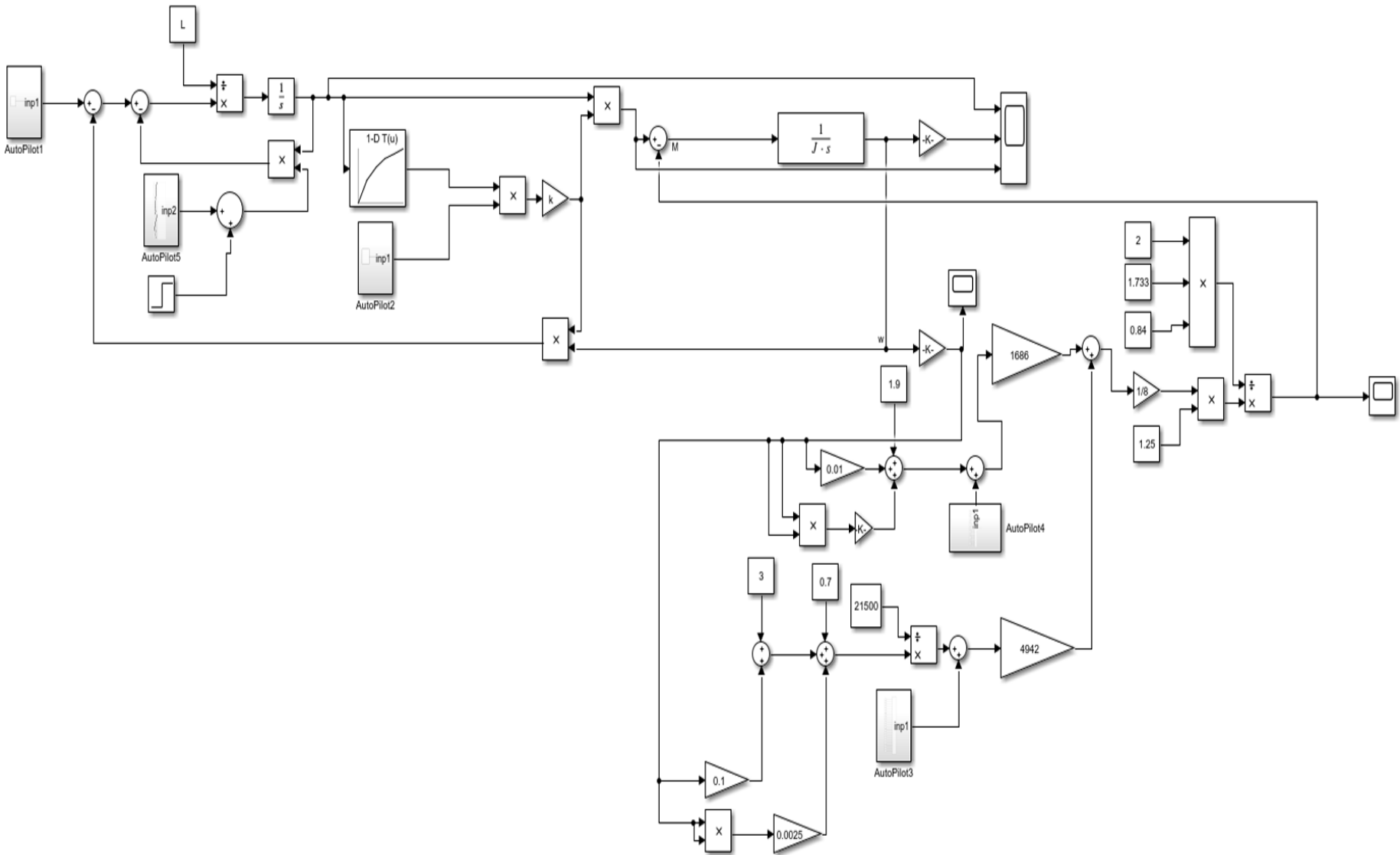
Паралельно-послідовне з'єднання



- 1 – Напруга на якорі двигуна
- 2 – Опір в якірному ланцюзі
- 3 – Магнітний потік

Математична модель поїзда з реостатно контакторною системою керування

7



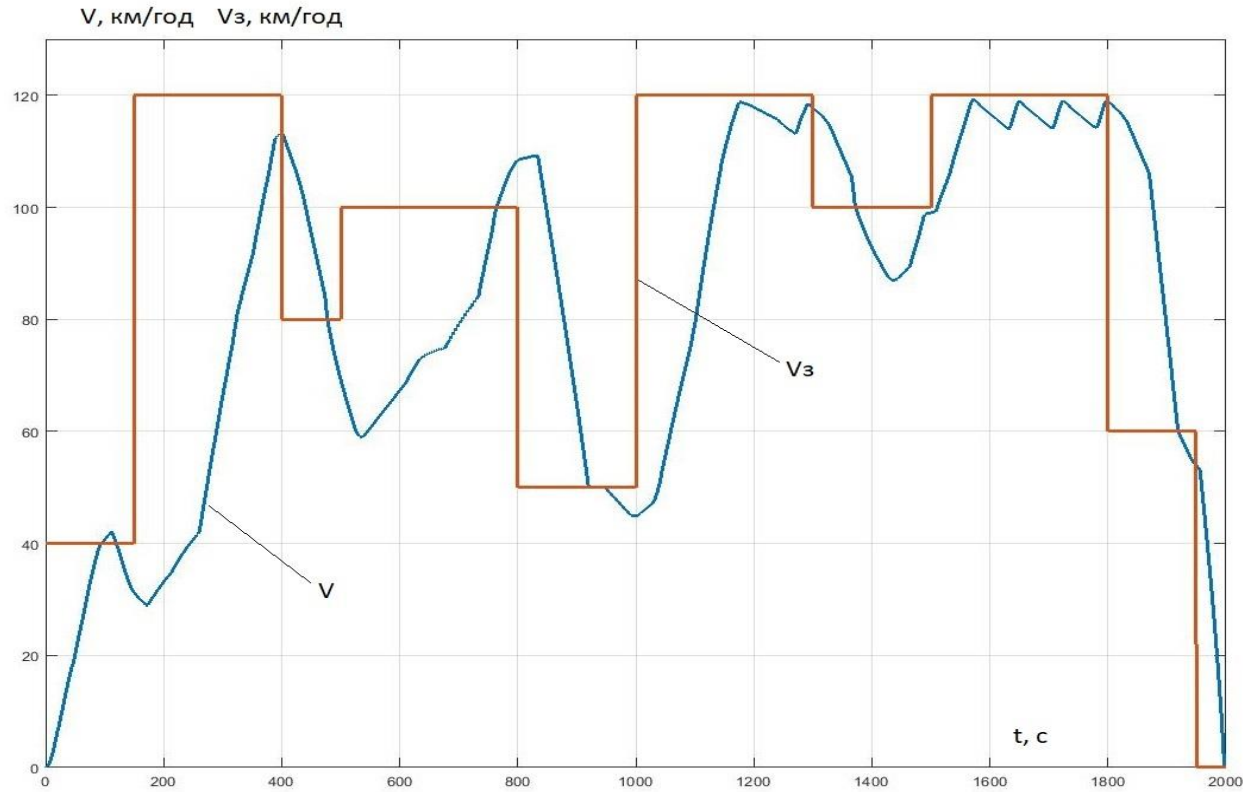


Рисунок 1 - Характеристика швидкості поїзда

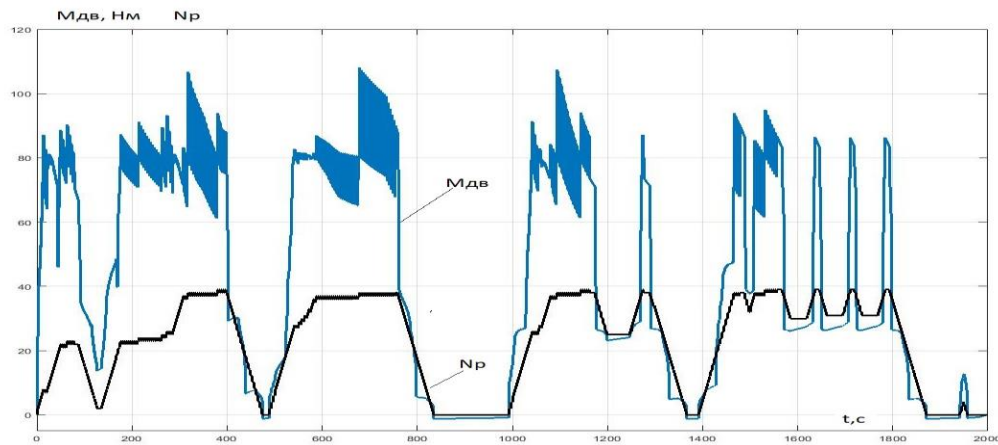


Рисунок 2 - Характеристика тягового моменту

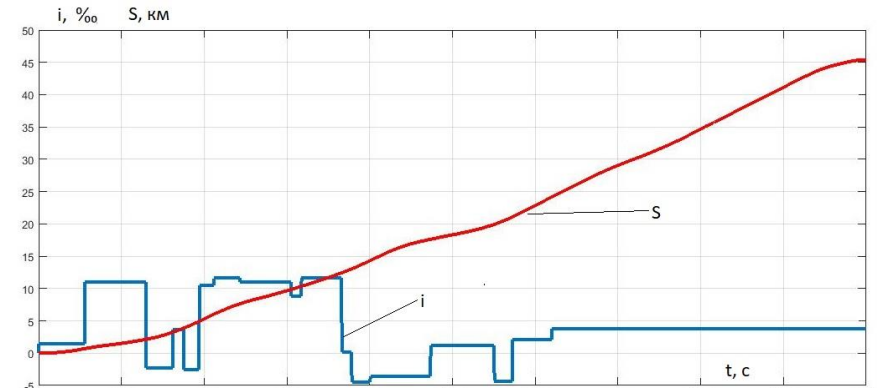
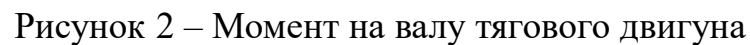
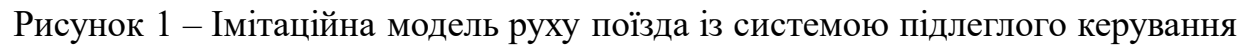
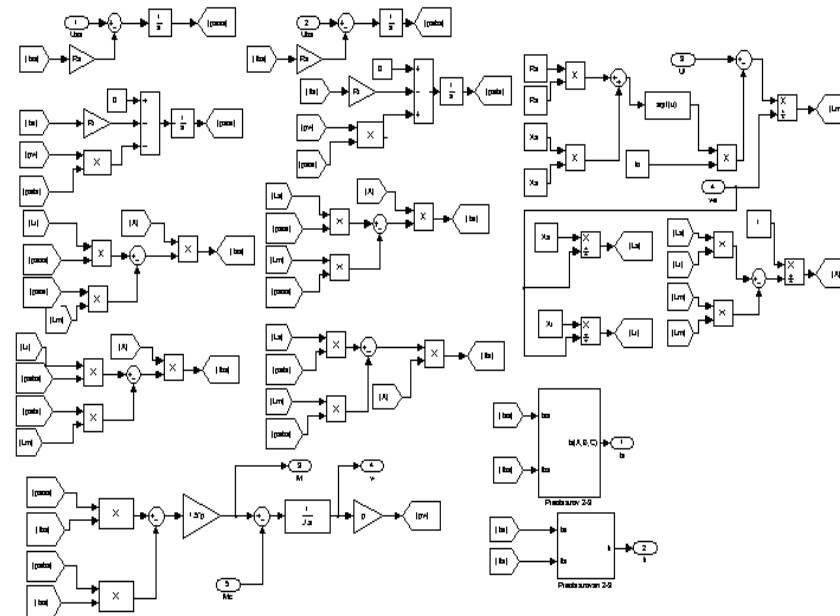


Рисунок 3 - Характеристика переміщення поїзда то профіль шляху



$$\begin{aligned} U_{as} &= \frac{d\psi_{as}}{dt} + r_s \cdot i_{as} + \psi_{\beta s} \cdot \omega_k \\ U_{\beta s} &= \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} + r_s \cdot i_{\beta s} - \psi_{as} \cdot \omega_k \\ U_{ar}' &= \frac{d\psi_{ar}'}{dt} + r_r' \cdot i_{ar}' + \psi_{\beta r}' \cdot (\omega_k - \omega) \\ U_{\beta r}' &= \frac{d\psi_{\beta r}'}{dt} + r_r' \cdot i_{\beta r}' - \psi_{ar}' \cdot (\omega_k - \omega) \\ M &= \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_{as} \cdot i_{\beta s} - \psi_{\beta s} \cdot i_{as}) \\ M - M_c &= \left(\frac{J}{p} \right) \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ i_{as} &= A \cdot (\psi_{as} \cdot L_r' - \psi_{ar}' \cdot L_\mu) \\ i_{\beta s} &= A \cdot (\psi_{\beta s} \cdot L_r' - \psi_{\beta r}' \cdot L_\mu) \\ i_{ar}' &= A \cdot (\psi_{ar}' \cdot L_r' - \psi_{as} \cdot L_\mu) \\ i_{\beta r}' &= A \cdot (\psi_{\beta r}' \cdot L_r' - \psi_{\beta s} \cdot L_\mu) \end{aligned}$$



Block Parameters: Asynchronous machine

Subsystem (mask)

Parameters

Rstat [0,016]

Rrot [0,016]

Xrot [0,188]

Xstat [0,11]

lo [1,7]

mom in [10]

p [3]

OK Cancel Help Apply

Рисунок 2 – Маска двигуна

Рисунок 1 – Математична модель двигуна

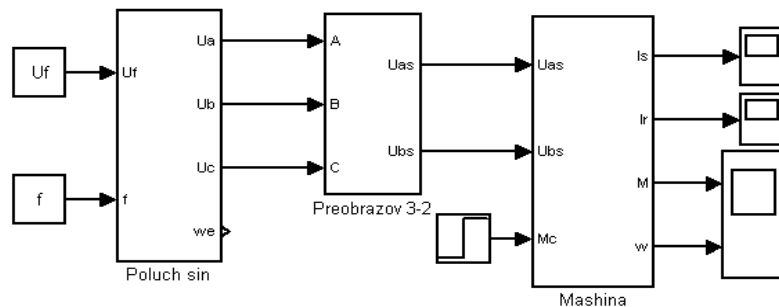


Рисунок 3 – Загальний вид моделі двигуна

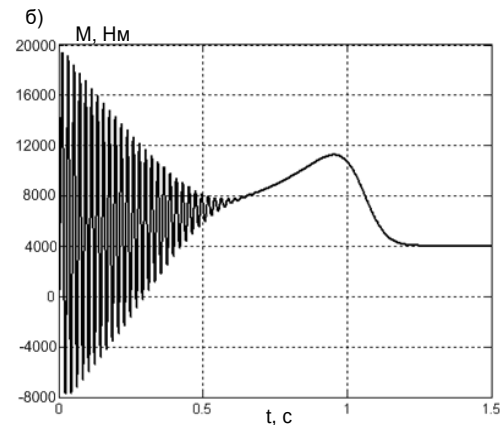
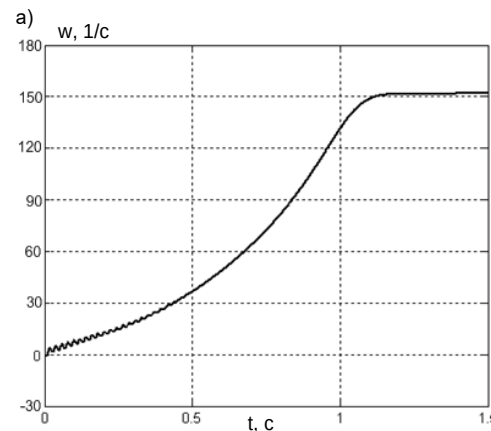
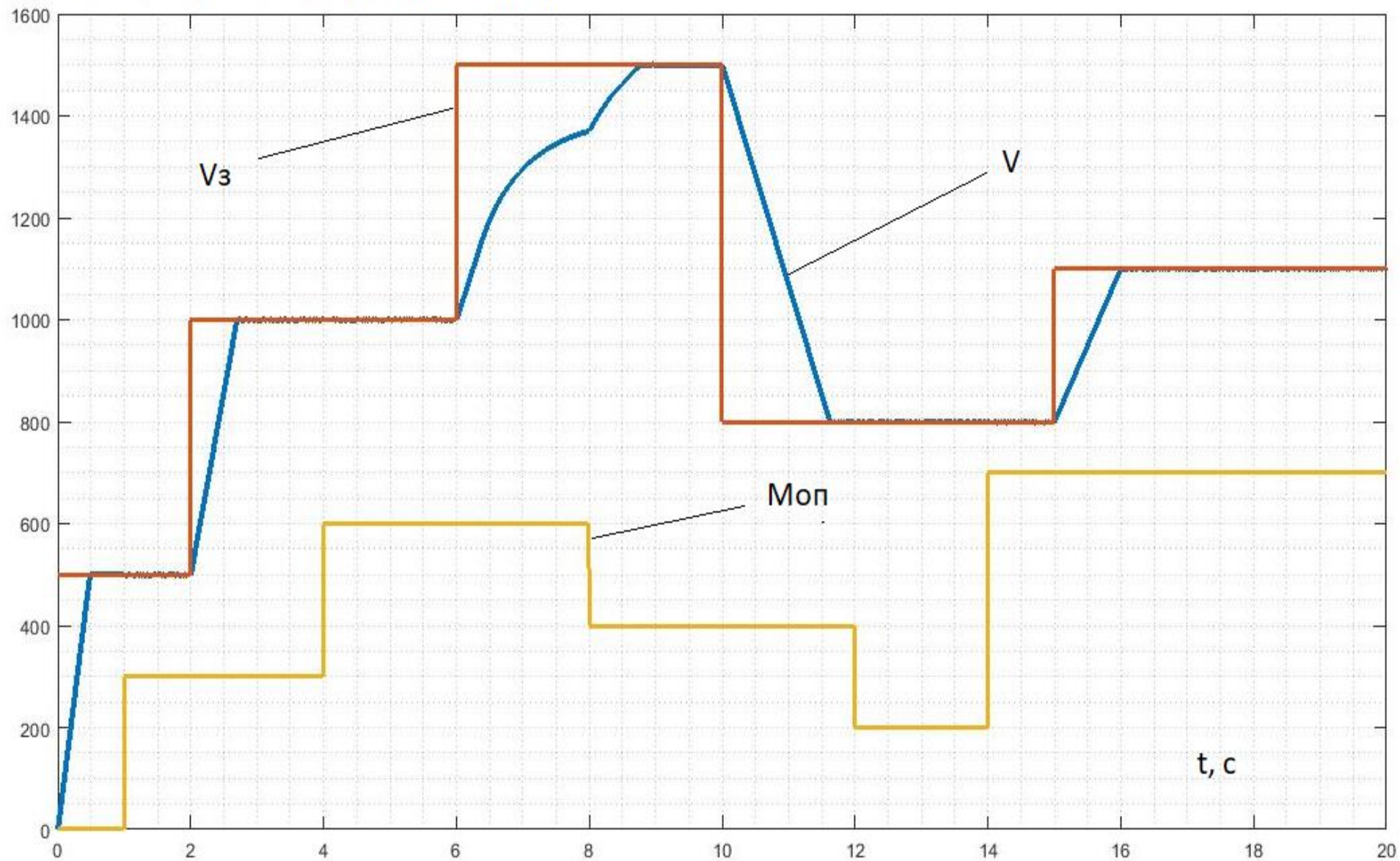


Рисунок 4 – Результати моделювання

Результати моделювання векторної системи керування

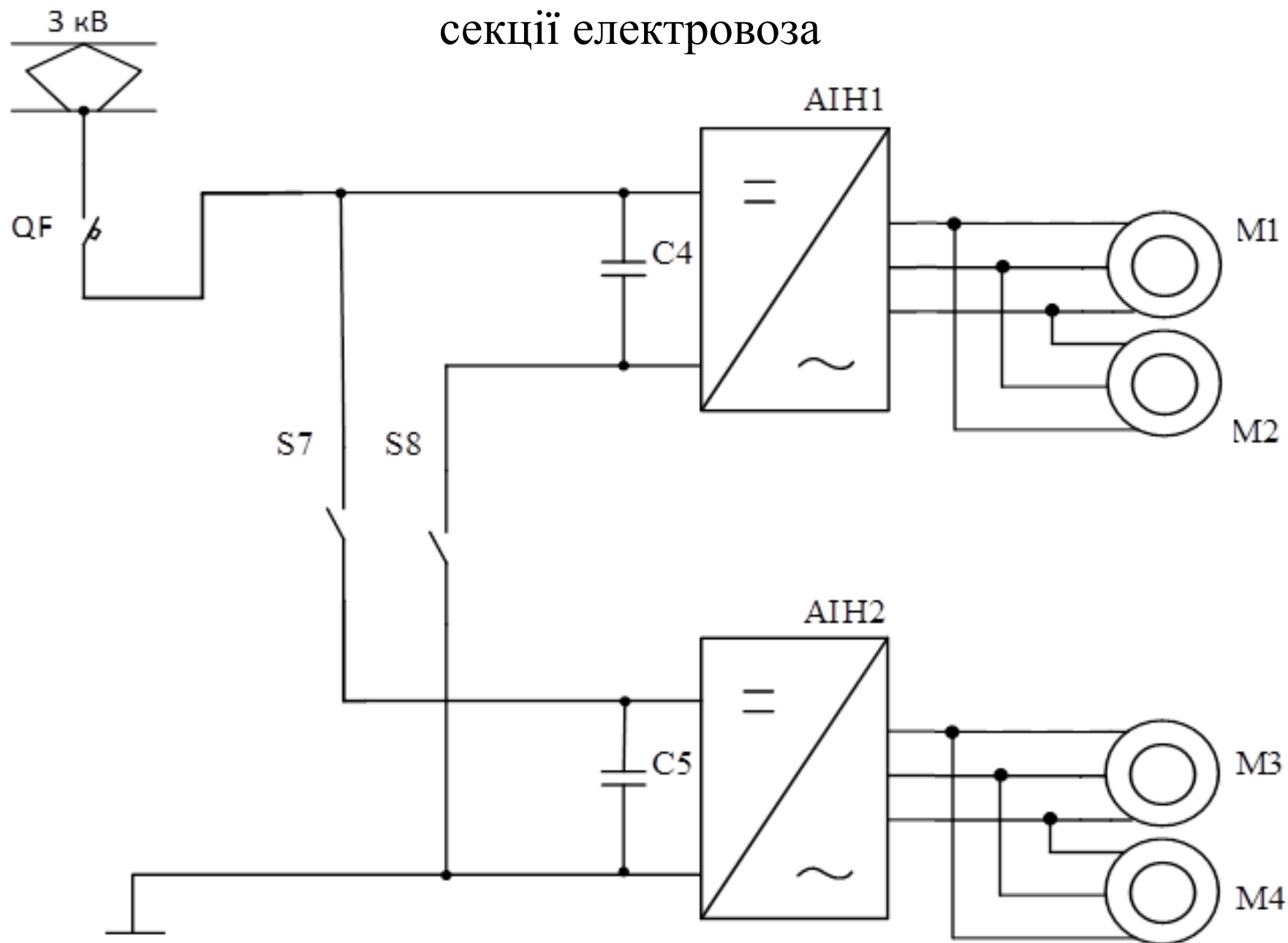
11

V , км/год V_z , км/год $M_{оп} \cdot 10$, Нм



Функціональна схема тягового електропривода однієї секції електровоза

12



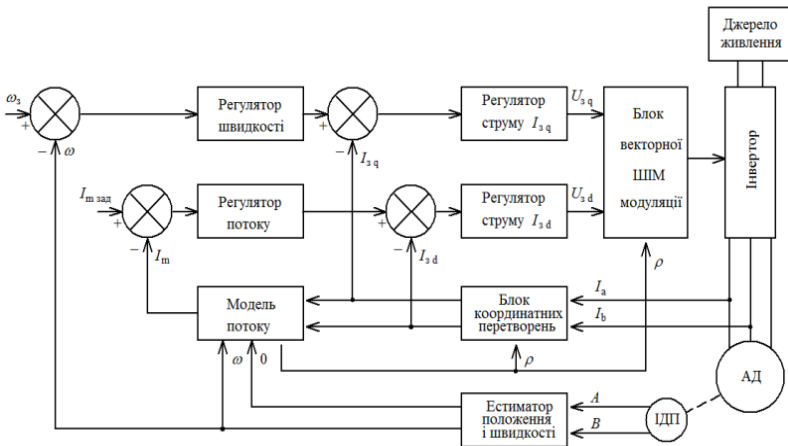


Рисунок 1 – Структурна схема системи векторного керування

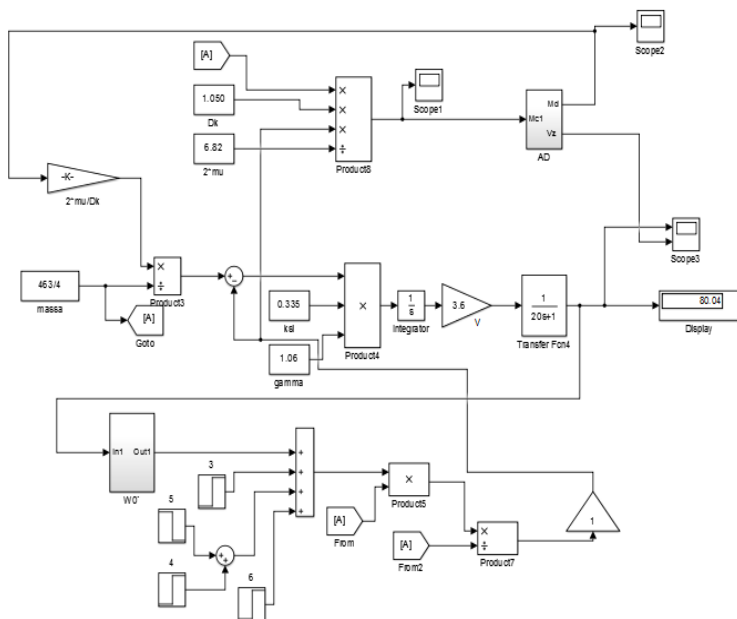


Рисунок 2 – Модель потяга з асинхронним приводом та векторною системою керуванням

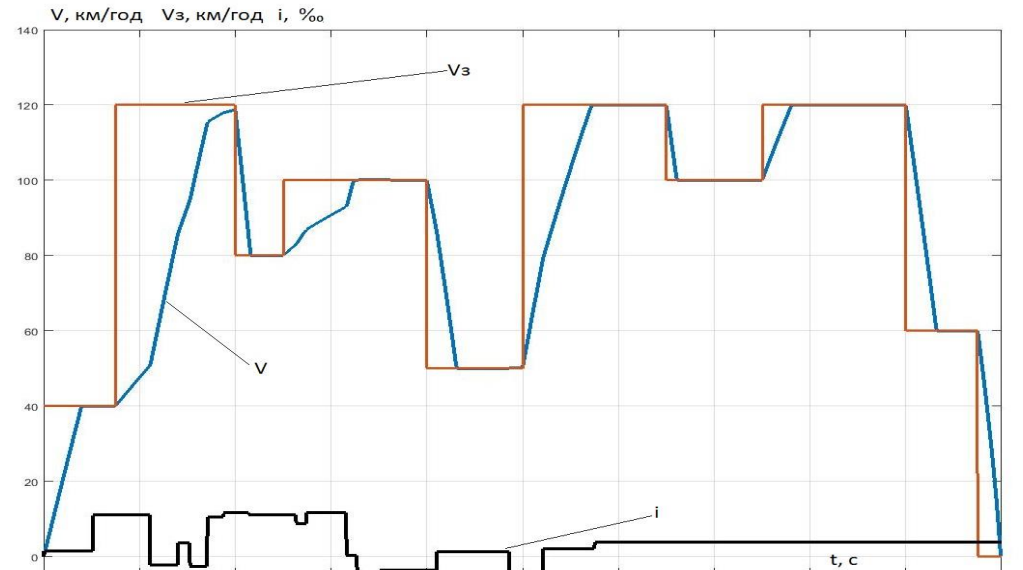


Рисунок 3 – Швидкість потяга з асинхронним приводом при векторному керуванні

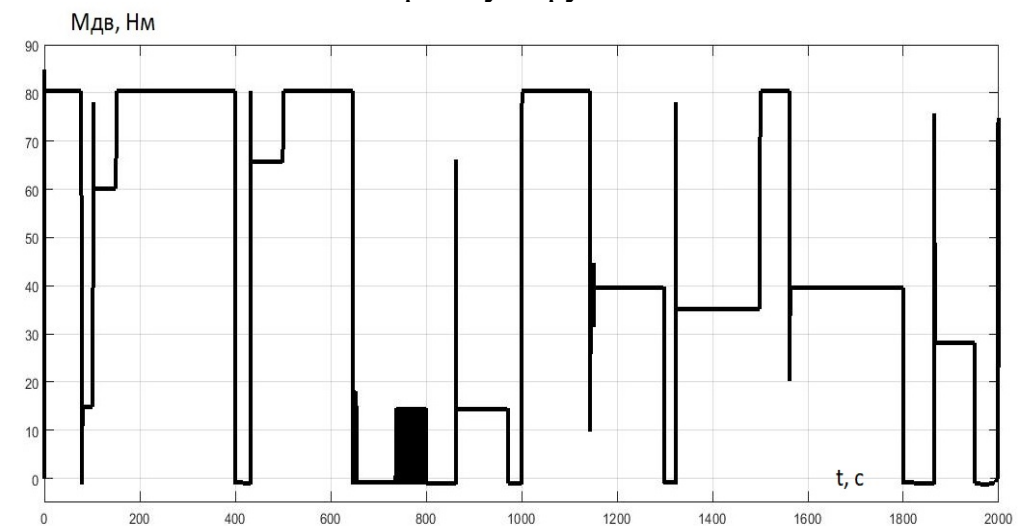


Рисунок 4 – Момент двигуна при русі потяга з векторним керуванням

Висновки

- У роботі було проведено дослідження реостатно-контакторної системи керування, а також системи підлеглого керування тяговим електроприводом електровоза ЧС-7;
- Прийнятий варіант модернізації із встановленням тягової електричної передачі змінного струму;
- Досліджено роботу електровозу ЧС7 з асинхронним приводом та системою векторного керування;
- Економічні розрахунки вказують на доцільність запропонованої модернізації тягового електроприводу електровозу ЧС-7. Час повернення коштів, що пішли на капітальні затрати – 5 років.