

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Розробка та дослідження тягового асинхронного електропривода для електровоза
постійного струму

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

KPM.273.14.10.25.01 ПЗ

Розробив: студент групи 214-ЕЕ-Д24
спеціальності 273 «Залізничний транспорт»
освітньої програми «Електровози та
електропоїзди»

(роботу виконано самостійно, відповідно
до принципів академічної доброчесності)

 Юрій РУДЬ

Керівник: к.т.н., доцент
Артем МАСЛІЙ

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

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет: механіко-енергетичний

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

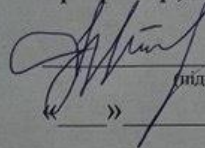
Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

Освітня програма: «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук

 Михайло БАБАШ
(підпис) _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Рудя Юрія Сергійовича

1 Тема «Розробка та дослідження тягового асинхронного електропривода для електровоза постійного струму», керівник Маслій Артем Сергійович, к.т.н., затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету від 24 лютого 2025 року № 14.

2 Строк подання студентом закінченої роботи 05 січня 2026 року.

3 Вихідні дані: пасажирський електровоз ЧС-7, тягова електрична передача, реостатно-контакторна 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 Математичне моделювання асинхронних тягових двигунів
- 5 Моделювання частотного перетворювача для керування асинхронним двигуном
- 6 Моделювання руху потяга з асинхронним приводом та векторною системою керування
- 7 Економічний розрахунок запропонованої модернізації

5 Перелік 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-контактною системою керування та результати моделювання (2 слайди).

6 Математичне моделювання руху поїзда із системою підлеглого керування (1 слайд).

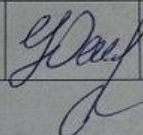
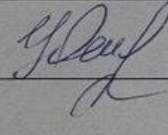
7 Моделювання асинхронного двигуна НБ-607 з векторною системою керування та результати моделювання (2 слайди).

8 Функціональна схема тягового електропривода однієї секції електровоза (1 слайд).

10 Моделювання руху поїзда з асинхронним приводом та векторною системою керування (1 слайд).

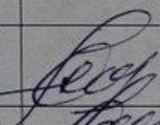
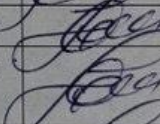
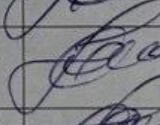
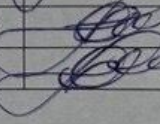
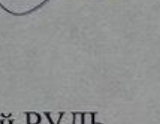
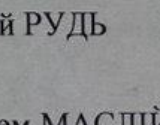
11 Висновки (1 слайд).

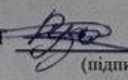
6 Консультанти окремих розділів

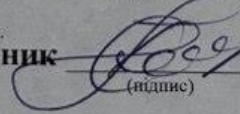
Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М., доцент, канд. екон. наук		

7 Дата видачі завдання: 06 жовтня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1 Отримання завдання на кваліфікаційну роботу. Формування змісту та етапів роботи.	06.10-12.10.25	
2 Збирання та обробка статистичної інформації.	13.10-23.10.25	
3 Виконання роботи по розділам кваліфікаційної роботи.	24.10-23.12.25	
4 Перевірка виконаних завдань у керівника кваліфікаційної роботи, виправлення помилок.	24.12-26.12.25	
5 Робота над оформленням графічної частини.	27.12-31.12.25	
6 Нормоконтроль. Підготовка до захисту.	01.01-05.01.26	

Студент  (підпис) Юрій РУДЬ

Керівник  (підпис) Артем МАСЛІЙ

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 106 аркушів пояснювальної записки формату А4, у тому числі 77 рисунків, 15 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 енергоефективності електровозу за рахунок застосування систем керування.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено дослідження можливостей модернізації електровоза постійного струму серії ЧС-7 шляхом удосконалення його тягового електроприводу. З метою підвищення надійності, енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат запропоновано заміну існуючих тягових електродвигунів постійного струму на частотно-регульовані асинхронні двигуни. У роботі розглянуто варіанти структури системи живлення та обґрунтовано вибір оптимальної схеми перетворення електроенергії. Проведено розрахунок параметрів силового інвертора, що забезпечує формування керованої напруги та частоти для живлення асинхронних тягових приводів. Особливу увагу приділено розробці системи керування електроприводом, у якій застосовано ПІ-регулятори для забезпечення стабільності, швидкодії та точності керування в умовах змінних експлуатаційних режимів. У завершальній частині роботи виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження модернізованої системи, що підтверджує доцільність запропонованих технічних рішень та їх позитивний вплив на ефективність роботи електровозів.

ABSTRACT

This qualification paper includes 106 sheets of A4 explanatory note, including 77 pictures, 15 tables, 12 literary sources.

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

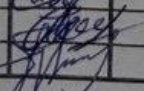
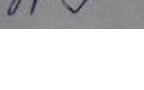
The object of research are modernized control system of electric traction electric locomotive ChS7.

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

In this Master's thesis, the possibilities for modernizing the DC electric locomotive of the CHS-7 series have been investigated through the improvement of its traction electric drive system. To enhance the overall reliability, energy efficiency, and reduce operational costs, a replacement of the existing DC traction motors with variable-frequency controlled induction motors has been proposed. The study examines various configurations of the motor power supply system and justifies the selection of the optimal power conversion architecture. The key parameters of the power inverter, responsible for supplying adjustable voltage and frequency to the induction traction motors, have been calculated. Special attention is given to the development of a control system for the traction drive, where PI-controllers are implemented to ensure high stability, dynamic performance, and control accuracy under varying operational conditions. In the final section, a techno-economic assessment of the proposed modernization is carried out, demonstrating the feasibility of the suggested solutions and confirming their positive influence on the operational efficiency of the locomotive.

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	33
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	60
5.1 Вибір та обґрунтування силової схеми тягового електропривода	60
5.2 Вибір та обґрунтування схеми автономного інвертора напруги	62
5.3 Розрахунок та вибір елементної бази чотирьохквADRантного перетворювача та трифазного мостового інвертора	65

					КРМ.273.14.10.25.01 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка та дослідження тягового асинхронного електропривода для електровоза постійного струму	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Рудь					6	107
Перевір.		Маслій						
Рецензент		Обозний						
Н. Контр.		Маслій						
Затверд.		Бабасв				УкрДУЗТ кафедра ЕТЕМ		

5.4 Математичне моделювання перетворювача частоти	69
6 Математичне моделювання потяга з асинхронним приводом та векторною системою керування	73
6.1 Основні теоретичні положення роботи векторного керування	73
6.2 Розрахунок параметрів двигуна	80
6.3 Розрахунок регуляторів	84
7 Визначення економічного ефекту від запровадження асинхронних двигунів на електровоз постійного струму	92
7.1 Коротка характеристика запропонованого рішення	92
7.2 Розрахунок економічного ефекту	93
Висновки	104
Список використаних джерел	105
Додаток А	106

					КРМ.273.14.10.25.01 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Поява перших залізниць у світі припала на початок XIX століття й була тісно пов'язана з розвитком промисловості. 27 вересня 1825 року в Англії відкрили першу громадську залізницю на маршруті Стоктон—Дарлінгтон завдовжки 56 км. У 1832 році Франція запустила свою першу лінію між Ліоном та Сент-Етьєном довжиною 58 км.

Потреба у створенні залізниць на українських землях визріла давно. Сприятливе географічне розташування та природні ресурси робили залізничне сполучення життєво необхідним. Україні потрібна була ефективна транспортна система для вивезення сільськогосподарської продукції з родючих регіонів Півдня й Центру, а також промислової продукції з Донбасу та Криворіжжя.

Поступово в Україні сформувалися три головні райони активного залізничного будівництва: Південно-Західний, Донбасько-Криворізький та Південний, що забезпечував сполучення з морськими портами. Після прокладання важливих магістралей почали зводити спеціалізовані лінії для транспортування вугілля з Донбасу. Першою такою дорогою стала лінія Костянтинівка—Єленівка, введена в експлуатацію 1872 року, що фактично започаткувала мережу майбутніх Донецьких залізниць. У 1884 році запрацювала Катерининська залізниця, створена для перевезення промислової продукції Кривбасу. Згодом до неї приєднали додаткові напрямки, зокрема Долгінцеве — Волноваха (1904—1906 рр.).

Оскільки залізниці прокладали в густонаселених промислових і сільськогосподарських регіонах, вони швидко стали одними з найбільших і найзавантаженіших у країні. Після періоду воєнних руйнувань українська залізнична мережа зазнала значних втрат — були знищені мости, колії, станції, об'єкти зв'язку.

У 1921 році розпочалося масштабне відновлення залізничної інфраструктури, хоча темпи вантажоперевезень тривалий час залишалися нижчими від довоєнних. До кінця 1921 року вантажообіг становив лише близько сьомої частини показників 1913 року. Після відбудови основних споруд відкрили рух на більшості ліній. У 1922 році почалося упорядкування пошкоджених ділянок та активне спорудження нових

маршрутів, зокрема Херсон — Апостолове, Дніпропетровськ — Апостолове, Прилуки — Новобілиця, Новобілиця — Цвіткове, Чернігів — Овруч — загалом приблизно 700 км.

У 1935 році залізничники досягли рекордних результатів: добове навантаження становило 76 тисяч вагонів. Того ж року план перевезень був перевиконаний більш ніж на 7%. У другій і третій п'ятирічках залізниці продовжували оновлюватися: з'являлися нові паровози, вагони, а також тепловози й електровози. Активно впроваджувалися сучасні на той час технології — автоблокування, автоматичні гальма, автоматичне зчеплення.

До початку Другої світової війни протяжність залізничної мережі України зросла до 14,8 тис. км, а після возз'єднання із Західною Україною — до 19,7 тис. км. Під час війни транспортна система зазнала катастрофічних руйнувань: були підірвані мости, знищені вокзали, депо та заводи, виведено з ладу значну частину рухомого складу.

Відбудова почалася ще до завершення бойових дій. Уже в 1948 році рівень вантажообігу перевищив довоєнні показники. Було відновлено головні магістралі та зведено понад 200 нових вокзалів, серед яких — у Харкові, Дніпрі, Луганську, Сімферополі, Полтаві, Чернігові, Севастополі та інших містах. За роки післявоєнної п'ятирічки вантажні перевезення збільшилися більш ніж на 43%, а продуктивність праці — майже на 40%. Збудовано нову важливу лінію Федорівка — Каховка, що забезпечила вихід із Донбасу до Дніпра та підтримала будівництво Каховської ГЕС.

У шостій п'ятирічці завдання розвитку залізниць передбачали подальше збільшення перевезень. Уже в 1958 році план був виконаний на 102%, а обсяги вантажоперевезень зросли на 8% порівняно з попереднім роком.

У 1960 році в Україні з'явився новий тип міського транспорту — метро. Наприкінці року в Києві відкрили першу чергу метрополітену, а 23 серпня 1975 року почав працювати Харківський метрополітен.

У 1970–1980-х роках продовжилося масштабне будівництво залізниць: створено нові напрямки, розвивалися маршрути в Донбасі, на Наддніпрянщині та в Криворіжжі, що сприяло індустріальному піднесенню цих регіонів. Станом на 1987

рік експлуатаційна довжина залізничної мережі України становила 22,7 тис. км (для порівняння: у 1913 році — 15,6 тис. км). Україна посідала одне з провідних місць за щільністю залізничної мережі — 37,7 км на 1000 км².

У 1988 році частка України у вантажоперевезеннях залізничним транспортом становила понад 25%, а у вантажообігу — майже 13%. На кожен кілометр колії припадало понад 22 млн т·км вантажообігу та 3,2 млн пасажиро-кілометрів. На сучасному етапі близько 40% українських залізниць електрифіковані, а багатоколійні ділянки охоплюють близько третини всієї протяжності мережі.

1 Загальні відомості про електровоз

1.1 Призначення та технічна характеристика електровозу

ЧС7 — це пасажирський електровоз постійного струму напругою 3 кВ, виконаний у двосекційній компоновці з вісьмома осями. Його серійне виробництво тривало з 1983 до 1999 року на підприємстві Škoda в Пльзені (колишня Чехословаччина, нині Чехія). Загалом було побудовано 321 одиницю цього типу, і значна частина машин станом на 2025 рік продовжувала працювати на залізницях України. 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

Зовнішній вигляд електровоза та схема розташування його електричного й механічного обладнання наведені на рисунку 1.1.

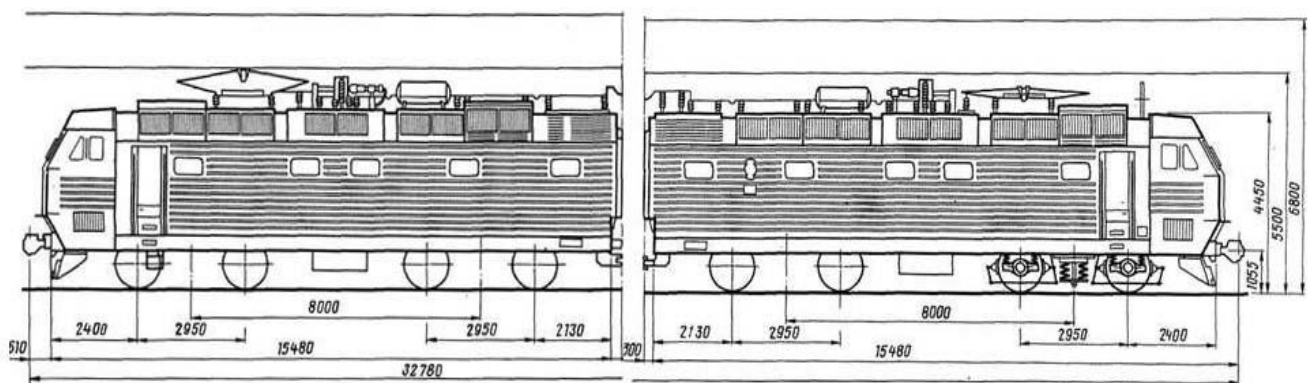


Рисунок 1.1 – Загальний вид електровозу ЧС-7

1.2 Розташування обладнання на електровозі

За тамбуром розташоване машинне приміщення, усередині якого облаштовано два вузькі проходи вздовж бічних стінок. Між ними змонтовано основні елементи електричного обладнання локомотива.

Розміщення апаратури організоване таким чином: у передній частині машинного відділення встановлено мотор-вентилятор, що забезпечує охолодження

тягових двигунів переднього візка. Безпосередньо за ним знаходиться проміжний барабанний контролер (ПБК) моделі 330. У центральній зоні відсіку розміщено високовольтну камеру, яку відокремлено від проходів металевими ґратами для безпеки. У задньому секторі, одразу за високовольтною камерою, встановлена шафа №100 (збудник), а далі — мотор-вентилятор заднього візка. Слідом за ним розміщено пневматичну панель зі складом кранів та мотор-компресором.

У задній торцевій частині машинного приміщення створено поперечний коридор, який з'єднує обидва бокові проходи. Через нього забезпечується перехід до другої секції електровоза через відповідні двері.

Від головного вводу електричний струм розподіляється на два паралельні кола: одне з них, через додатковий резистор, подає живлення на вольтметр мережі на пульті машиніста, а друге надходить до швидкодіючого вимикача — основного апарата захисту. Після цього струм розгалужується вже на три окремі кола.

Перше коло — це тяговий контур, який живить усі тягові двигуни.

Друге — коло допоміжних агрегатів і систем опалення кабін. Обидва ці контури обладнані спільним електролічильником.

Третє коло подає живлення на поїзне опалення; воно є відносно простим і містить реле перевантаження, контактор обігріву, окремий електролічильник та високовольтний штекер, розміщений на буферному брусі.

Для забезпечення безпечної роботи у високовольтній камері в її колах передбачено заземлювальні пристрої, конструктивно подібні до роз'єднувачів. Після відключення роз'єднувача вони автоматично з'єднують корпус електровоза з ділянкою кола між роз'єднувачем і прохідним ізолятором. Керування роз'єднувачем, заземлювачем та струмоприймачем здійснюється одним перемикачем на пульті, окремим для кожної секції.

Схеми живлення тягових двигунів і допоміжних електромеханізмів досить складні, оскільки всі двигуни є колекторними машинами постійного струму.

Кожен мотор-вентилятор розташований вертикально та складається з високовольтного електродвигуна, двох робочих коліс (верхнє змонтоване на торці

вала, нижнє — на його протилежному кінці), а також бокового колекторного генератора керування.

Цей генератор з'єднаний з двигуном вентилятора ремінною передачею і виробляє постійний струм напругою близько 50 В, який використовується в колах керування та освітлення електровоза.

Двигуни вентиляторів розраховані на напругу 1500 В, тому в межах кожної секції вони з'єднані послідовно. Між секціями можливе як послідовне, так і паралельне включення вентиляторів, що забезпечує відповідно низьку та високу швидкість їх роботи. Переключення здійснюють вентиляторні перемикачі з пневматичним приводом. У вентиляторному колі встановлено додаткові резистори.

Під час пуску в коло вводиться резистор опором 160 Ом, що дає можливість двигунам плавно набрати оберти. Через три секунди реле часу вимикає більшу частину опору, залишаючи лише 25 Ом. Режим швидкості задається перемикачем на пульті машиніста.

Мотор-компресор використовується для наповнення головних резервуарів повітрям, яке забезпечує роботу гальмівної системи, пісочниць, звукових сигналів, склоочисників та інших пневматичних приладів. Агрегат розміщено горизонтально; він складається з двигуна високої напруги та трициліндрового компресора. Забір повітря здійснюється через бокові решітки кузова.

Компресор може запускатися автоматично за командою реле тиску, яке увімкнеться при зниженні тиску в резервуарах нижче 7,5 атм, або вручну — перемикачем на пульті керування.

У картері компресора розміщено електронагрівач, призначений для підігріву мастила взимку після тривалого простою, який активується тим самим контролером.

Пуск компресора, як і вентиляторів, є реостатним. Спочатку в коло вводиться резистор опором 69 Ом, а через дві секунди, якщо тиск перевищує 3 атм, опір майже повністю вимикається, запобігаючи надмірному підвищенню обертів компресора при низьких навантаженнях.

1.3 Механічна частина

Механічна частина електровоза слугує основою для розміщення електричної апаратури, передачі тягових і гальмівних зусиль, а також установа пнеvmатичного обладнання. Вона забезпечує необхідний рівень комфорту та створює безпечні умови для управління локомотивом.

Конструктивно електровоз складається з однієї секції, що спирається на два тривісні візки. Візки з'єднані між собою гнучким горизонтальним шарніром, який забезпечує плавність руху та компенсацію взаємних переміщень.

1.3.1 Візок

Кожний візок включає раму, колісні пари, зубчасті передачі, букси, ресорне підвішування, гальмівні механізми та підвіски тягових двигунів.

Рама візка приймає вертикальне навантаження від кузова через ресорну систему, а також сприймає тягові, гальмівні та бокові сили, що виникають під час руху. До її конструкції інтегровано колісні пари з тяговими двигунами та редукторами, буксові вузли з підвішуванням і гальмівне обладнання.

Передача крутного моменту від якоря тягового двигуна на ведучі колеса здійснюється через односторонню прямозубу зубчасту передачу. Зв'язок між валом двигуна та малою шестернею виконано за допомогою спеціального приводу, що компенсує зміну відстані між осями валу двигуна і колісної пари під час роботи візка.

Букси передають вагове навантаження на колісні пари та сприймають зворотні зусилля тяги, гальмування і бокових впливів, передаючи їх на раму. Ресорне підвішування згладжує удари під час проходження нерівностей колії та рівномірно розподіляє масу між колесами і візками.

Гальмування забезпечується важільною гальмівною системою, яка передає силу від гальмівних циліндрів до колодок. Додатково встановлено електропнеvmатичні гальма, що працюють через спеціально змонтоване обладнання та два лінійні дроти, з'єднані зі схемою поїзда через контакти сполучних рукавів.

Підвіска тягового двигуна виконана за опорно-рамною схемою — двигун жорстко закріплений до рами візка через амортизуючі гумові елементи. Така конструкція зменшує удари, що виникають під час рушання та руху по нерівній колії, і компенсує взаємні переміщення двигуна та рами.

1.3.2 Кузов

Кузов електровоза — односекційна конструкція обтічної форми з двома кабінами. Він виконаний у вигляді суцільнозвареного металевих каркаса з листової та профільної сталі. Основу міцності забезпечує головна рама, що складається з боковин, буферних і шкворневих брусів, а також ряду поперечних балок, які надають жорсткості та формують основу для монтажу обладнання.

У буферних брусах розташовано фрикційні апарати автозчепів, навантаження від яких передається на боковини рами. У центральній частині рами встановлено дві поперечні балки, призначені для монтажу тягового трансформатора та закріплені з боковинами зварними швами.

Простір між подовжніми та поперечними балками рами перекритий сталевими листами, що захищають обладнання кузова від зовнішнього впливу. Через спеціальні люки забезпечується доступ до другого й п'ятого тягових двигунів.

Надрамна частина кузова складається з двох вертикальних ферм-розкосів, жорстко приєднаних до верхніх полиць боковин. Вони підсилюють конструкцію в вертикальній площині. Дахова обв'язка є легкою та служить переважно основою для монтажу дахового обладнання.

У машинному відсіку розташовано каркаси для допоміжних машин і апаратури. Внутрішній прохід — односторонній. Доступ до обладнання здійснюється через зсувні щити й дверцята, обладнані механічними, пневматичними та електричними блокуваннями, що унеможливають їх відкривання при піднятому струмоприймачі.

1.4 Тягові електродвигуни

Тяговий електродвигун служить для перетворення електричної енергії, що надходить із контактної мережі, у механічну, яка через вал двигуна передається на відповідну колісну пару. Кожна пара коліс має індивідуальний привід. Мала шестерня закріплена на кінці вала двигуна, тоді як велика — розташована безпосередньо на осі колісної пари.

Тяговий електродвигун моделі 1AL-4846dT складається з остова, якоря, шести головних і шести додаткових магнітних полюсів, траверси, шести щіткотримачів, двох підшипникових щитів із підшипниками та карданного валу. Остов одночасно виконує роль магнітопроводу і механічної основи для закріплення всіх електромагнітних компонентів. Він виготовлений із спеціальної легованої сталі, що має високу міцність і добрі магнітні характеристики. Основна частина остова має циліндричну форму з площею перерізу близько 370 см². У верхній зоні, ближче до колектора, розташовано вентиляційний люк для подачі охолоджувального повітря, а також два оглядові люки для контролю щіткового апарата й колектора. Внутрішня поверхня остова слугує місцем кріплення основних і додаткових полюсів.

Головні полюси формують основний магнітний потік, що проходить через їх осердя, якор та остов, створюючи повний магнітний контур двигуна. Кожен полюс складається з осердя та котушки, яка містить 10 витків. Намотування виконане мідною стрічкою перерізом 5×45 мм. Додаткові полюси забезпечують корекцію магнітного поля в зоні комутації. Їх суцільні осердя виготовляють із електротехнічної сталі і фіксують на остові за допомогою двох шпильок. Котушки додаткових полюсів намотано мідною смугою 7×32 мм, також із десятьма витками.

Щіткотримачі монтуються на кільцеподібній траверсі, яка може повертатися для регулювання положення щіток. Якір складається з порожнистого валу, набраного з листів електротехнічної сталі осердя, обмотки, двох натискних шайб і колектора. Для зменшення втрат на вихрові струми

осердя формують із тонких штампованих листів; у них виконані трикутні отвори із плавним заокругленням кутів, які утворюють вентиляційні канали. Провідники обмотки закладено в пази й зафіксовано текстолітовими клинами, а в лобовій частині — двошаровими бандажами з дроту. Між шарами бандажів розміщено теплостійку ізоляційно-азбестову стрічку. Колектор складається з 261 мідної пластини зі сріблястими домішками. Пластини розділені прокладками з міканіту завтовшки 1 мм і запресовані на фланець, приєднаний до втулки якоря.

1.5 Система керування електроприводом електровоза

Керування роботою колекторних електродвигунів може здійснюватися трьома основними методами:

- зміною напруги, що подається на якор;
- регулюванням додаткового опору в його колі;
- зміною сили магнітного потоку збудження.

На електровозі ЧС7 використано всі три способи.

Оскільки локомотив обладнаний кількома двигунами, керування напругою на них також забезпечується за допомогою зміни схеми їх з'єднання. Наприклад, при напрузі контактної мережі 1 кВ два двигуни, увімкнені послідовно, отримують по 500 В на кожний; при паралельному вмиканні кожен матиме повну напругу 1 кВ, що збільшує швидкість руху. Цей спосіб є енергоекономічним, оскільки не потребує додаткових апаратів, окрім контакторів, що виконують перемикання схеми.

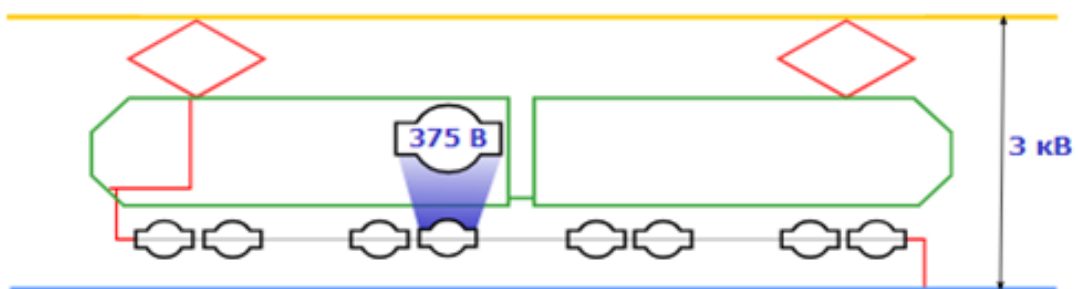
На електровозі ЧС7, який працює від мережі 3 кВ, встановлено 8 двигунів номіналом 1,5 кВ. Можливі три варіанти їхнього з'єднання (див. рис. 1.2):

Послідовна схема — всі вісім двигунів з'єднано в один ланцюг; напруга на одному двигуні дорівнює $3000/8 = 375$ В.

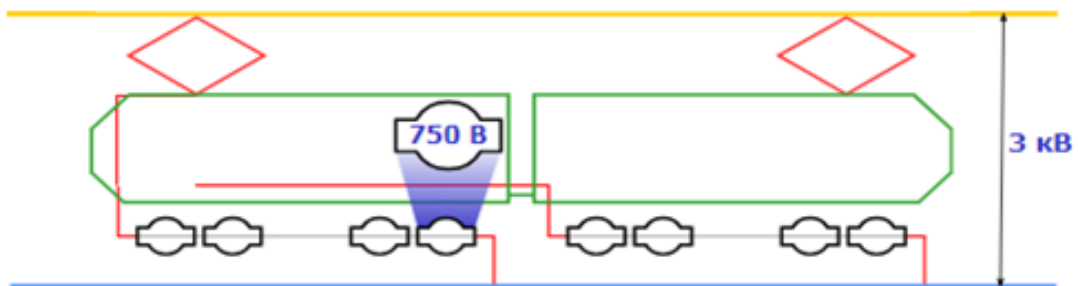
Послідовно-паралельна схема — два паралельні кола по чотири послідовно увімкнених двигуни; на кожен припадає $3000/4 = 750$ В.

Паралельна умовна схема — чотири паралельні ланцюги, у кожному по два послідовно з'єднаних двигуни; на один двигун подається $3000/2 = 1500$ В. Хоча назва «паралельна» умовна, оскільки безпосереднє підключення 1,5-кіловольтних двигунів до 3 кВ неможливе.

Послідовне з'єднання



Паралельно-послідовне з'єднання



Паралельне з'єднання

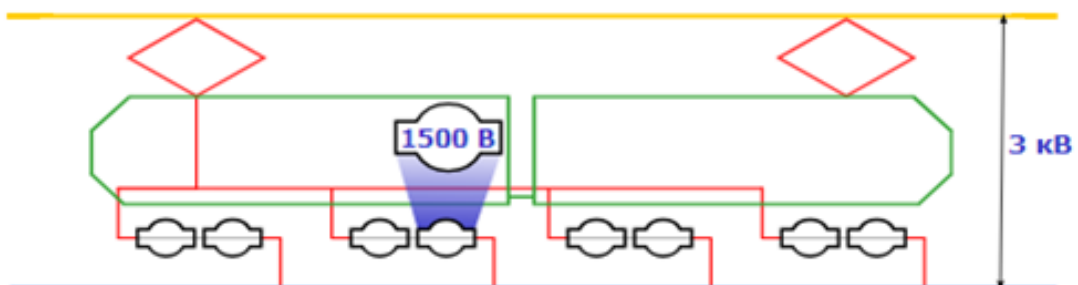


Рисунок 1.2 – Способи з'єднання тягових двигунів на електровозі ЧС7

Другий спосіб регулювання роботи електродвигуна полягає у зміні опору в його якірному колі. Це досягається шляхом уведення в ланцюг додаткових резисторів — баластних опорів, які формують пусковий реостат або, якщо на локомотиві передбачено режим динамічного гальмування, пуско-гальмівний реостат. Такий реостат складається з окремих елементів-резисторів, що під'єднуються та від'єднуються за допомогою контакторів.

Оскільки під час реостатного пуску значна частина електроенергії перетворюється в тепло на резисторах, їхнє надмірне нагрівання може спричинити пошкодження чи навіть вигорання. Через це тривалий рух на реостатних позиціях контролера категорично забороняється. На електровозах серії ЧС7 охолодження пуско-гальмівних реостатів здійснюється повітряним потоком: узимку нагріте повітря направляється в салон і використовується для його обігріву, а в теплу пору року викидається назовні.

Третій спосіб регулювання — зміна сили магнітного потоку збудження, тобто його штучне ослаблення. Якщо значення основного потоку Φ зменшується, частота обертання колекторного двигуна постійного струму відповідно зростає. З огляду на те, що на ЧС7 застосовано послідовну схему збудження, ослаблення потоку реалізують шляхом під'єднання паралельно обмотці збудження шунтувальних резисторів. Частина струму при цьому проходить через шунти, минаючи обмотку збудження, унаслідок чого Φ зменшується, а струм якоря та швидкість обертання підвищуються.

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.

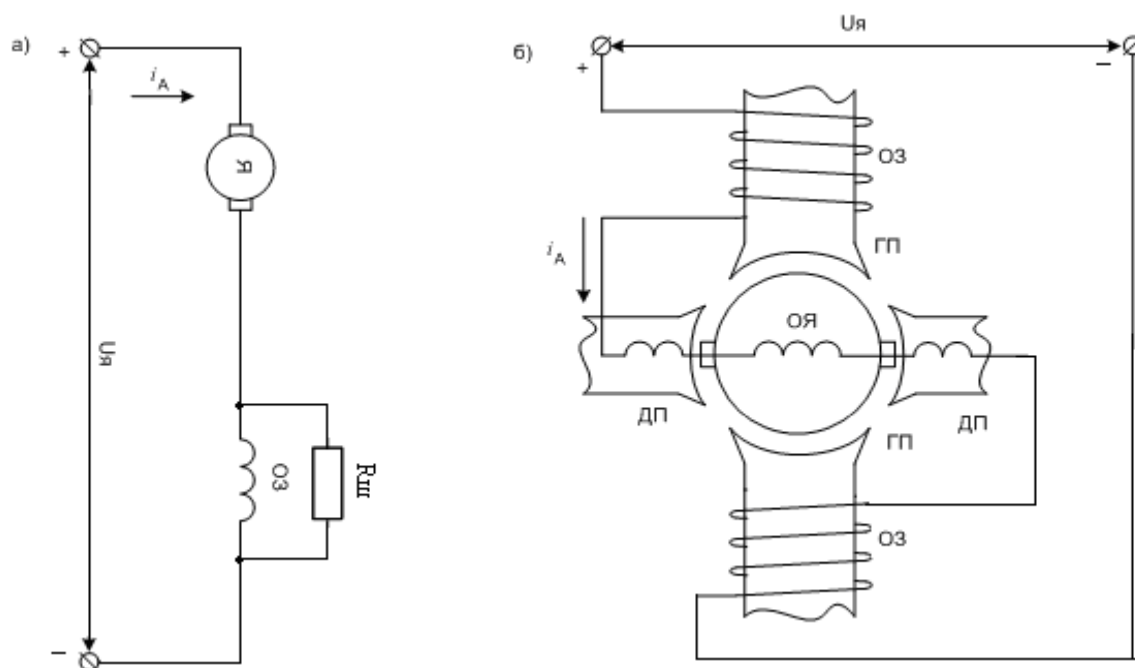


Рисунок 2.1 – Спрощена електрична схема двигуна постійного струму з послідовним збудженням (а) та з'єднання обмоток узагальненої машини (б)

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.

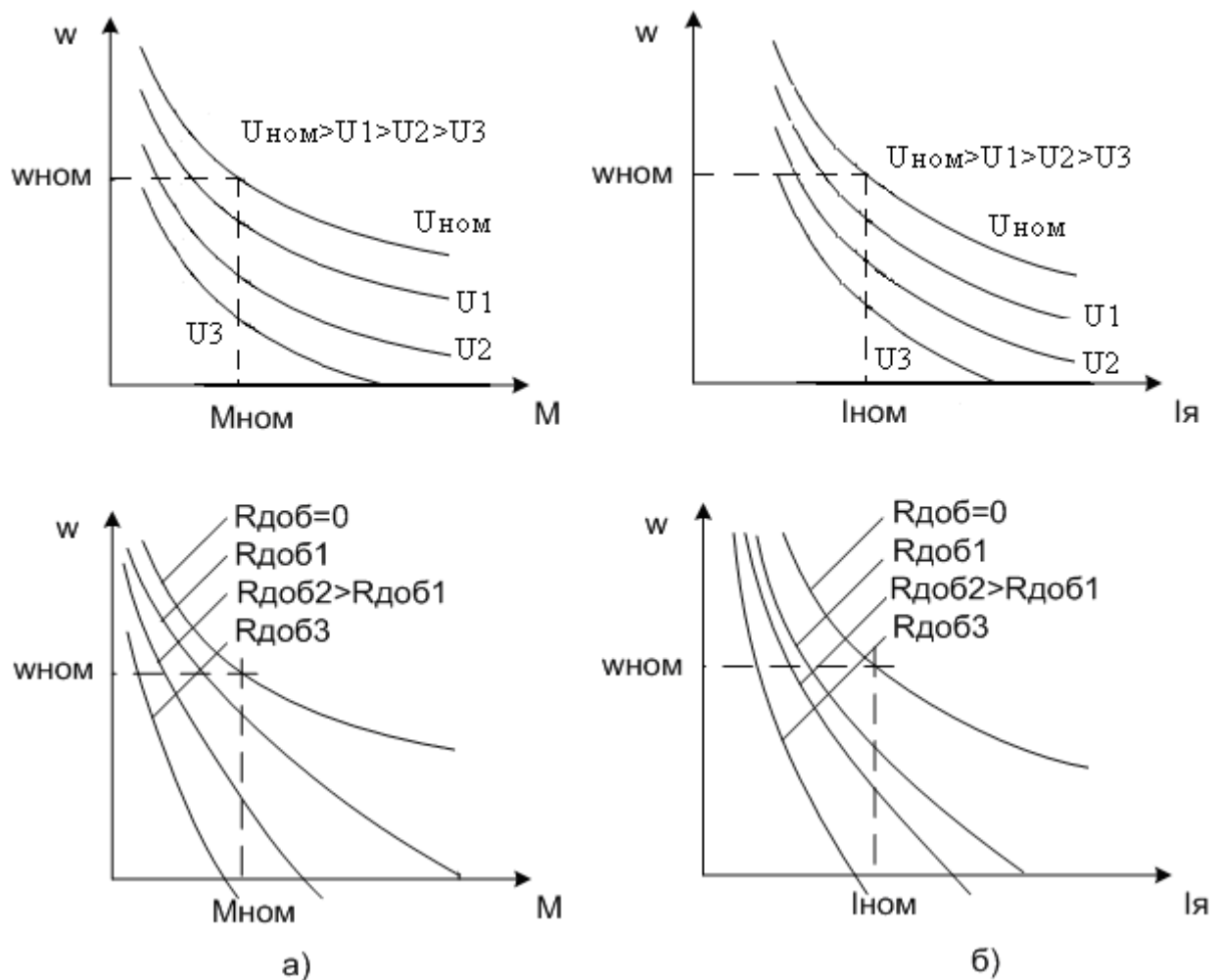


Рисунок 2.2 – Механічні (а) та електромеханічні (б) статичні характеристики двигуна з послідовним збудженням

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:

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

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;

$C_{\text{М}}$ – електромеханічна стала двигуна;

E – електрорушійна сила;

L_{Σ} – загальна індуктивність всіх обмоток двигуна.

На основі цієї системи складаємо структурну схему в вигляді блоків:

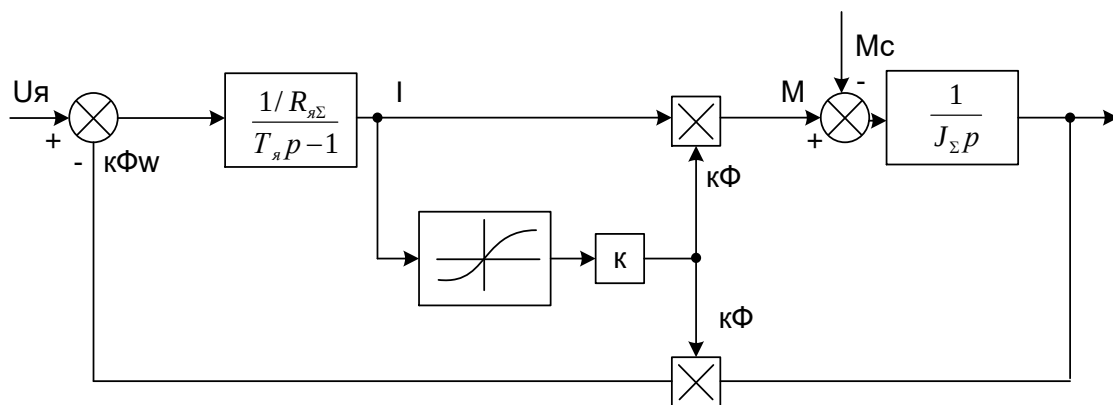


Рисунок 2.3 – Структурна схема двигуна послідовного збудження

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 якорного ланцюга:

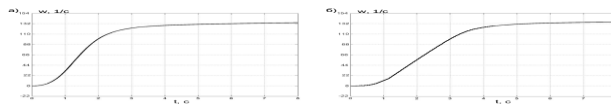
$$L_{\text{я}} = \frac{0,25U_{\text{н}}60}{2pnI_{\text{н}}\pi} \quad (2.3)$$

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

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

p – номінальна частота обертання об/хв;

r – 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.

$$C_{\text{м}} = \frac{1050 \cdot 3}{3,14 \cdot 2 \cdot 3} = 167,197$$

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:

$$L_{03} = \frac{\Psi}{I_3} \quad (2.8)$$

де I_3 - струм збудження двигуна;

Ψ — потокозчеплення обмотки збудження.

Для розрахунку індуктивності обмотки збудження L_{03} 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.

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

$$L_{03} = \frac{0,528}{466} = 0,00113 \quad \text{Гн}$$

Еквівалентна стала часу для математичної моделі розраховується за формулою:

$$T_e = \frac{L_{\text{я}} + L_{03}}{R_{\text{я}} + R_{03}}, \quad (2.9)$$

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

L_{03} – індуктивність обмотки збудження;

$R_{\text{я}}$ - опір якірного ланцюга;

R_{03} - опір обмотки збудження.

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

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 будемо 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.

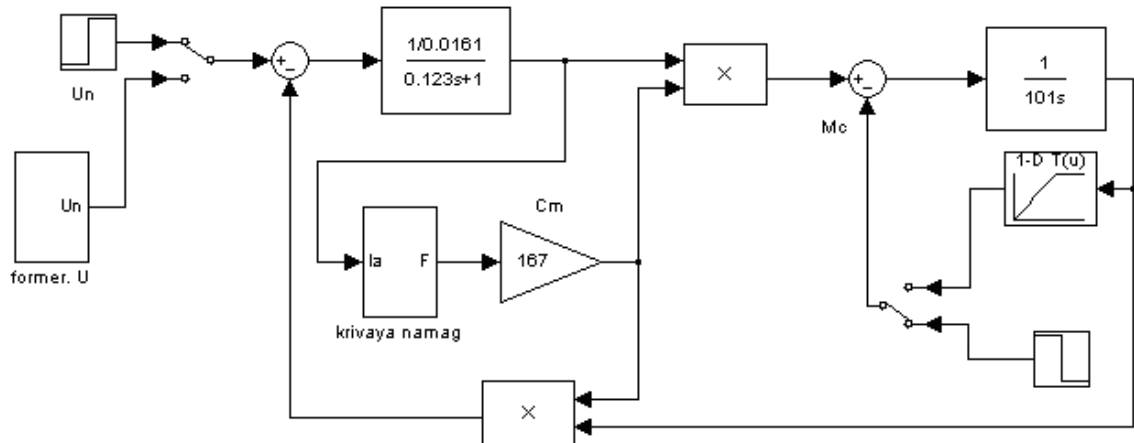


Рисунок 2.4 – Математична модель електропривода постійного струму

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.

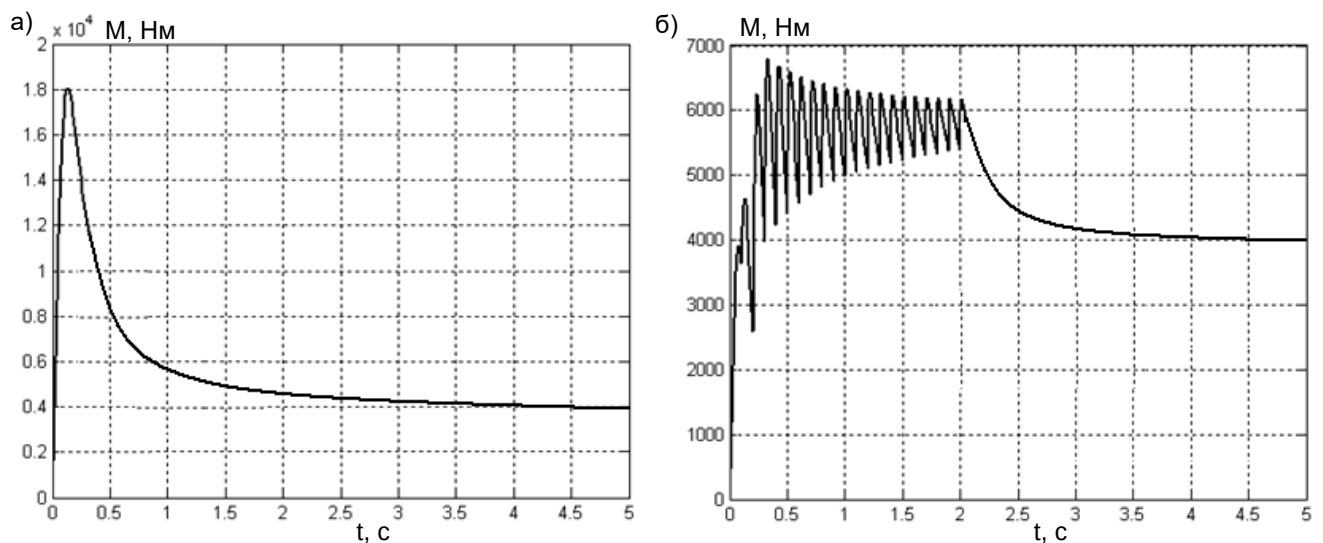


Рисунок 2.5 – Характеристика моменту електродвигуна: а) – при прямому пуску, б) – при ступеневому підвищенні напруги

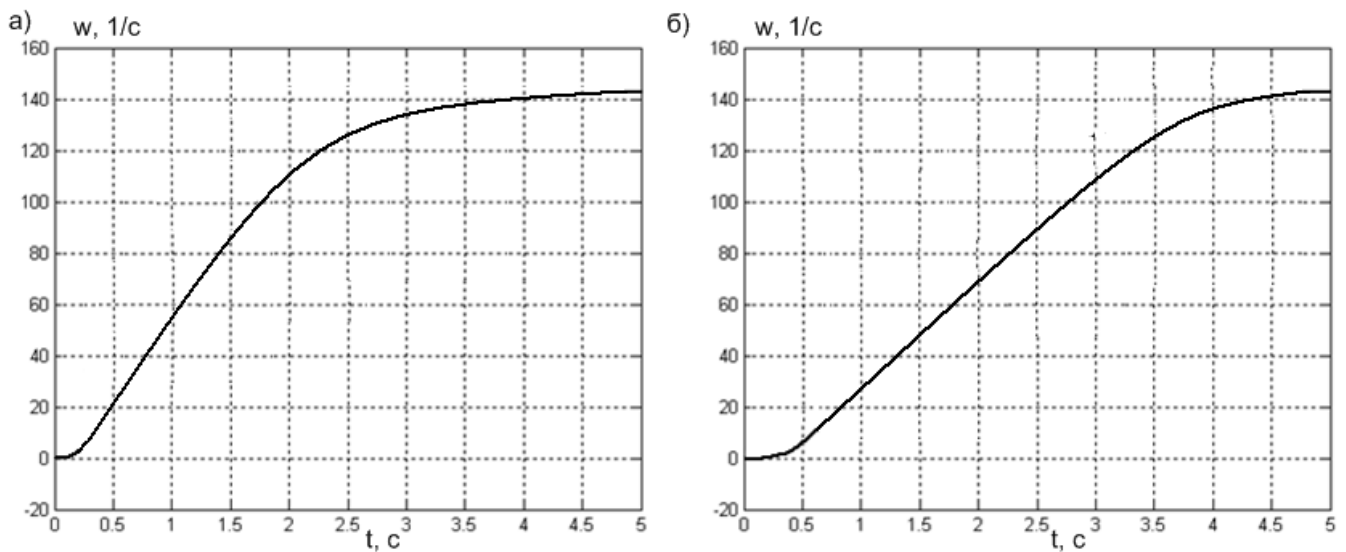


Рисунок 2.6 – Характеристика швидкості двигуна а) – при прямому пуску, б) – при ступеневому підвищенні напруги

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

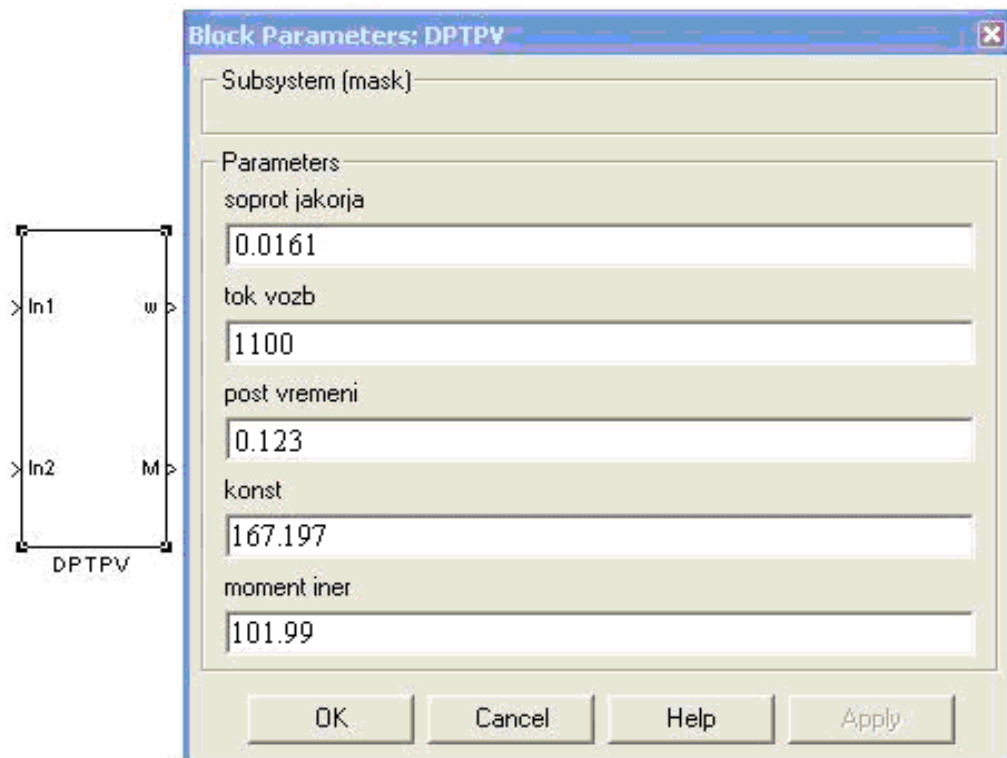


Рисунок 2.7 - Маска моделі двигуна постійного струму

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.

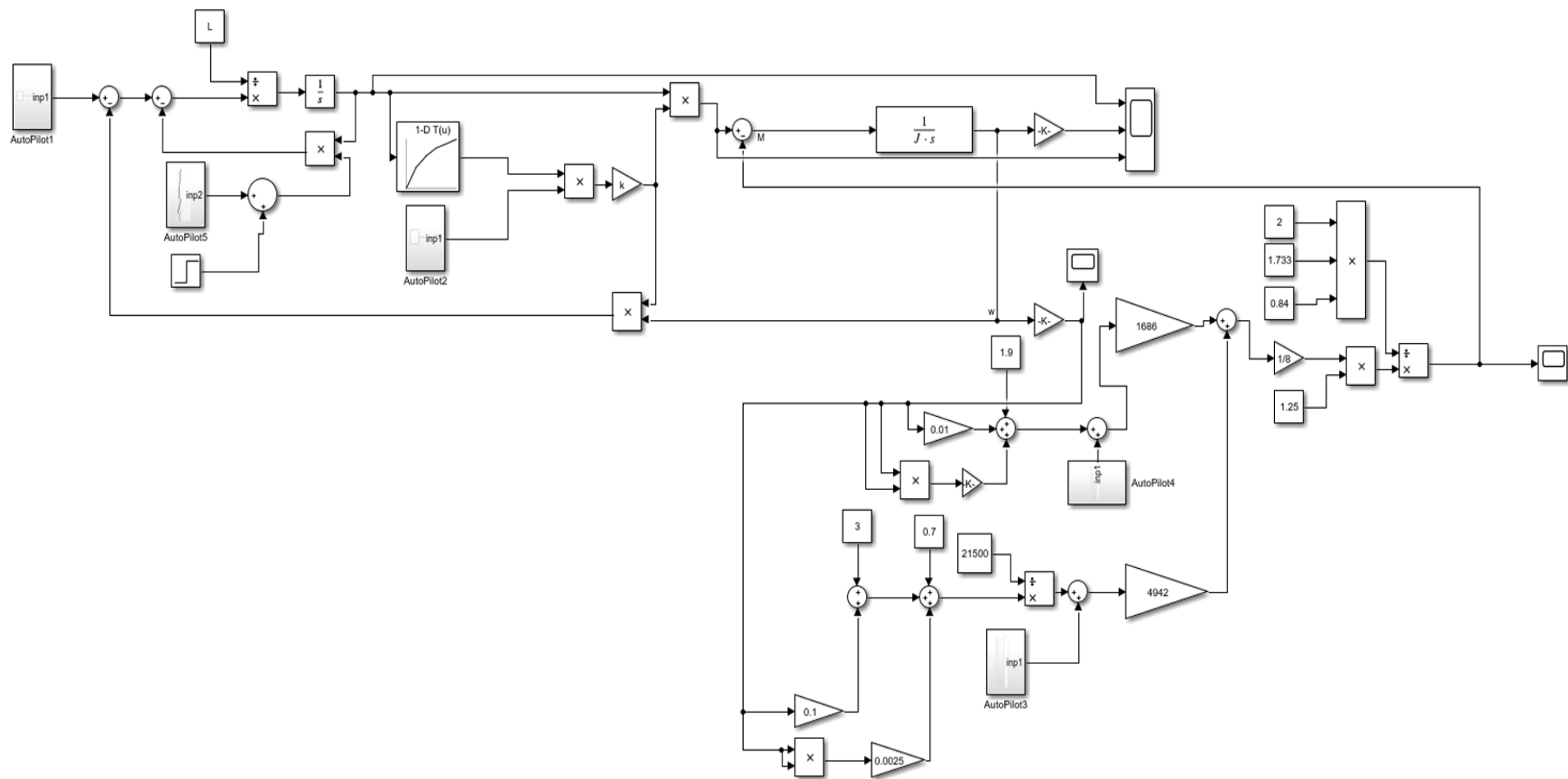


Рисунок 3.1 – Математична модель руху потяга з реостатно-контакторною системою керування

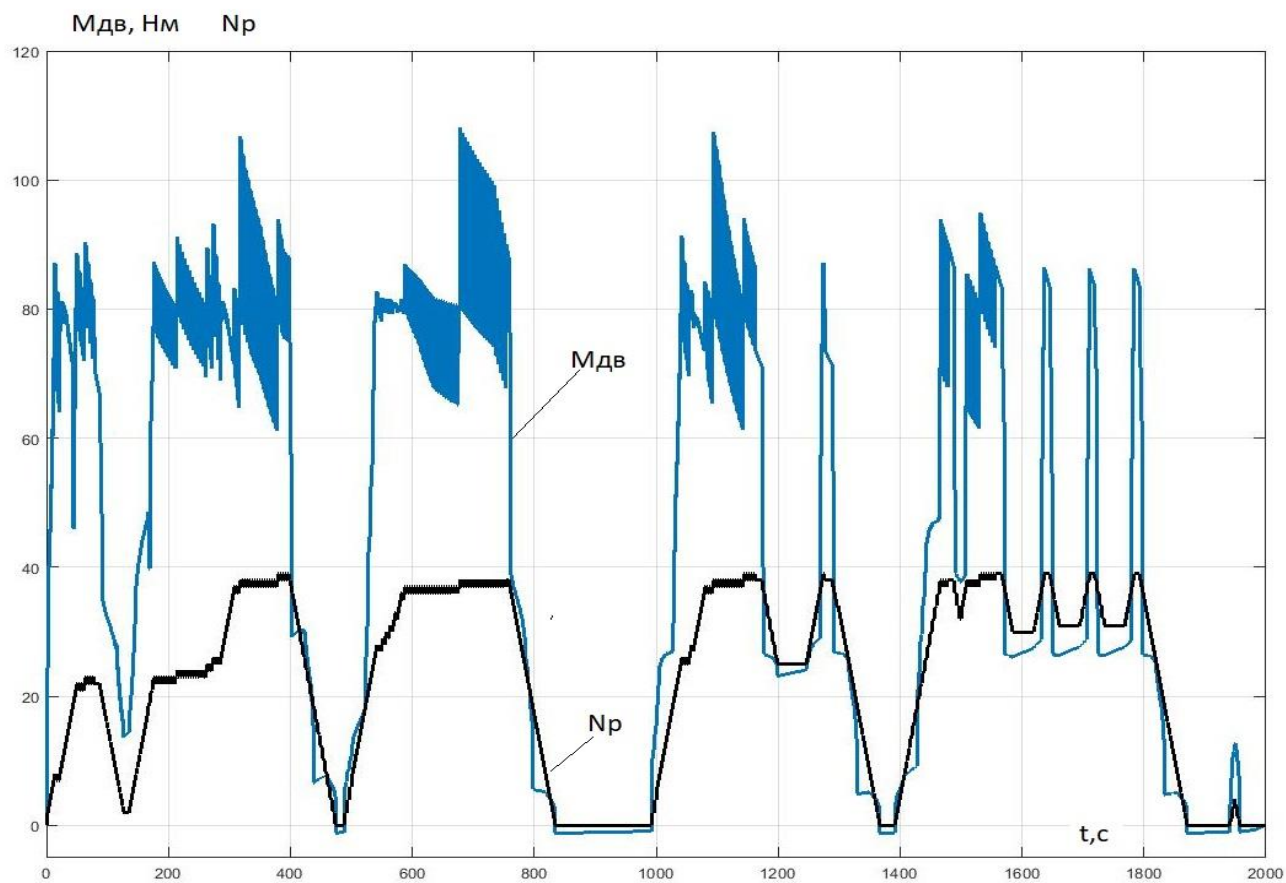


Рисунок 3.2- Характеристика моменту двигуна та номера позиції контролера машиніста

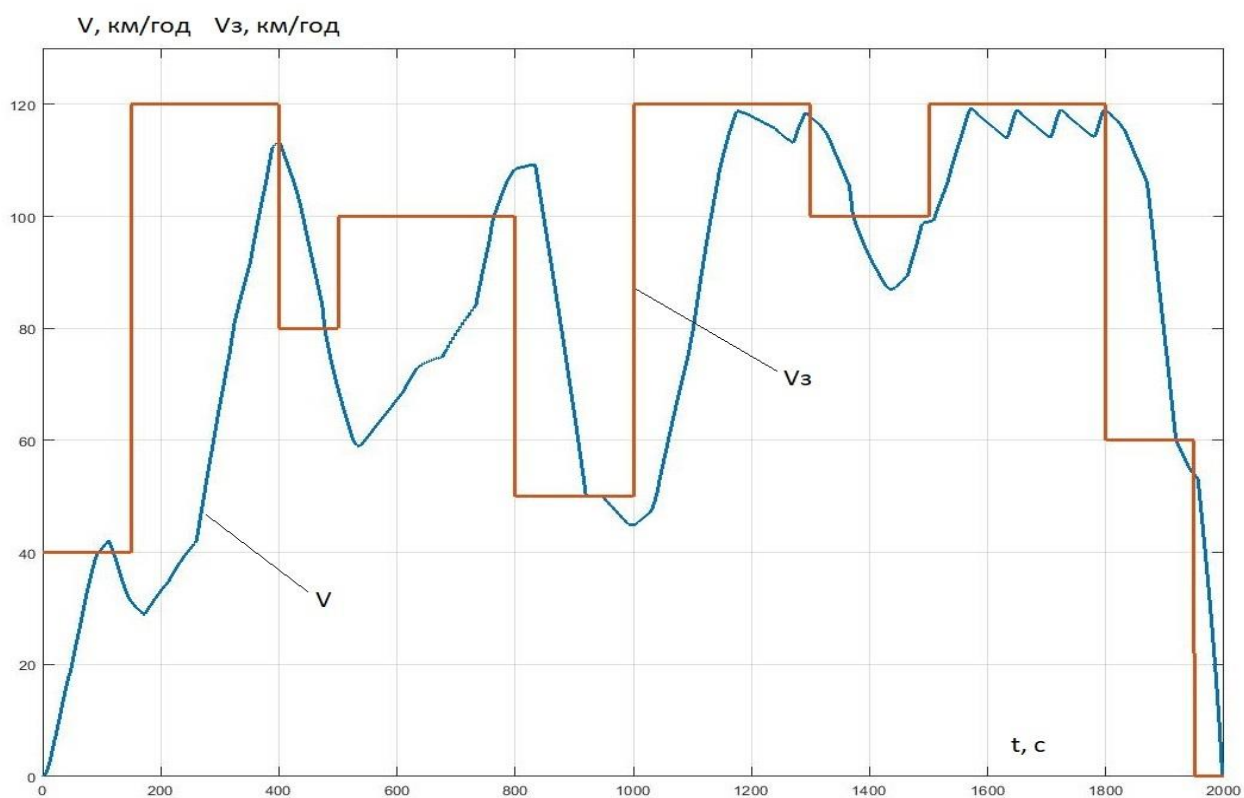


Рисунок 3.3 - Характеристики швидкості руху потяга (фактична та задана)

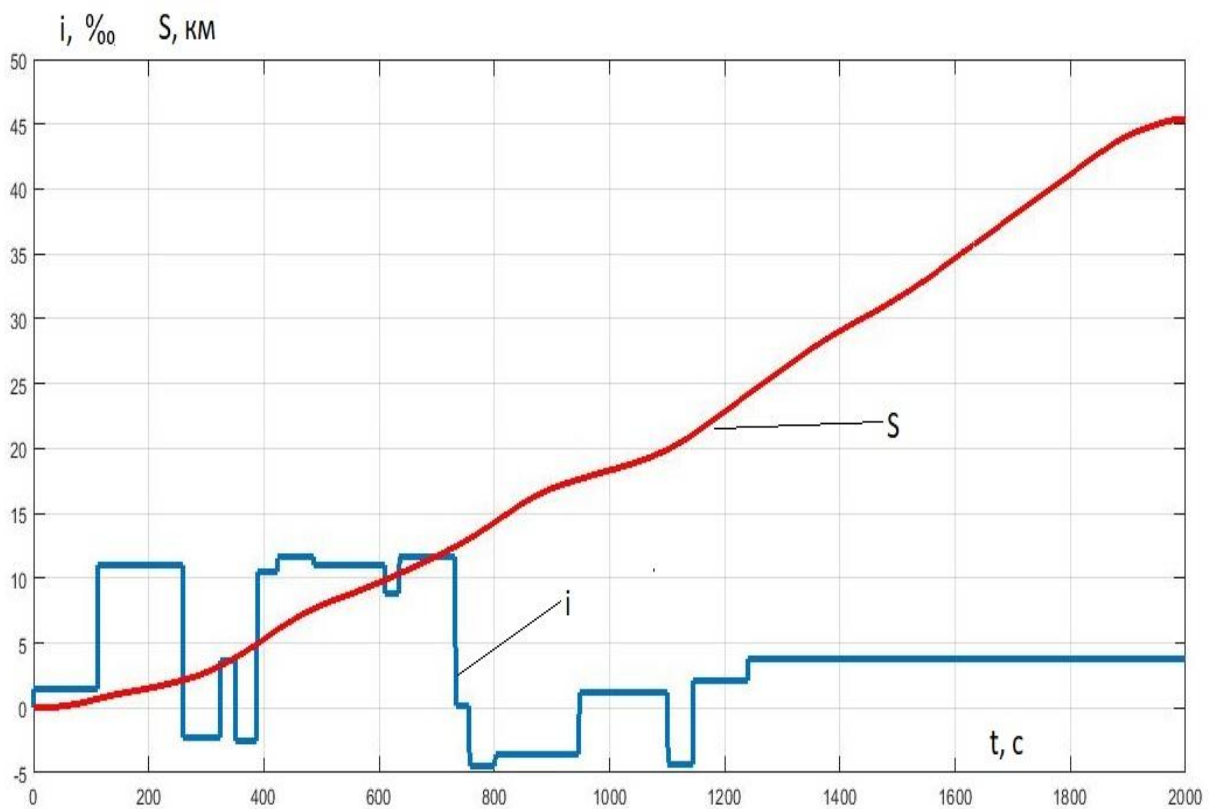


Рисунок 3.4 – Характеристика переміщення поїзда

3.2 Математична модель двуконтурної системи підлеглого керування

Регулювання та підтримка сталої швидкості обертання є однією з найпоширеніших задач в автоматизованих приводах. Характерною особливістю систем регулювання швидкості (СРШ) є їх тривала робота в сталому режимі, хоча можливі також короточасні режими, наприклад, у верстатах з програмним управлінням, томографах та інших виконавчих механізмах. Основними параметрами, що визначають якість СРШ, є: статична та динамічна похибки, діапазон регулювання та динамічні характеристики. Ці показники взаємопов'язані: покращення динамічних властивостей підвищує динамічну точність системи, а зменшення діапазону регулювання спрощує досягнення високих значень інших показників. Найважливішим параметром є точність підтримки заданої швидкості, яку оцінюють за відхиленням швидкості від номінального значення в сталому режимі. Для оцінки статичної точності часто використовують відносну похибку $\delta\omega = \Delta\omega / \omega_0$, де $\Delta\omega = \omega_0$ -

ω — відхилення швидкості від заданої, ω_0 — номінальна швидкість. Похибка може також виражатися у відсотках.

Зміна коефіцієнта передачі впливає на динамічні властивості приводу, що відображається на динамічній точності. У сучасних цифрових або імпульсних системах з інтегральним регулюванням досягається висока статична точність, тому ключовим показником стає динамічна точність, яка оцінює миттєві відхилення швидкості протягом різних часових інтервалів.

Миттєве відхилення швидкості зумовлене кількома факторами: динамічними змінами моменту та напруги, параметричними збуреннями у двигуні, перетворювачі та механічній передачі, похибками вимірювання швидкості та перешкодами в каналі керування. Якщо один з цих факторів є домінуючим, оцінка точності може базуватися на ньому; в інших випадках враховують усі фактори разом. Динамічну точність можна оцінювати подібно до статичної — як відношення миттєвого відхилення швидкості до заданого значення або через середньоквадратичне відхилення.

Системи регулювання швидкості будуються з різними типами електродвигунів та інформаційно-керуючих пристроїв залежно від вимог застосування. За способом подачі сигналів і визначення швидкості виділяють аналогові, імпульсні, цифрові та змішані системи. Різняться також силова частина приводу — тип перетворювача, двигуна, кінематична схема передачі. Загальних рекомендацій не існує, проте для високоточних приводів бажано використовувати добре керовані колекторні або вентильні двигуни постійного струму з імпульсним управлінням і безредукторні кінематичні схеми.

Завдяки своїм перевагам системи підпорядкованого регулювання активно застосовуються в СРШ. Функціональна схема такого приводу включає регулятор струму (РТ), датчик струму (ДТ), блок обмеження (БО) та сигнал зворотного зв'язку по струму ($U_{от}$), як показано на рис. 3.5.

принцип підлеглого регулювання, полягає в тому, що на вхід динамічного ланцюга, який відповідає якірному ланцюгу, впливає зворотний зв'язок по ЕРС обертання e .

При умові $\Delta u=0$ та $mc=0$ можна перенести на структурній схемі (рис. 3.15) вихід контуру швидкості (точка «а») на вихід контуру струму (точка «б»). Передавальну функцію об'єкта в контурі струму з прямим каналом, що має передавальну функцію $1/(R_c(T_{я}p+1))$, та каналом зворотного зв'язку $-(K\Phi)^2/(Jp)$, можна представити у вигляді співмножника, який відображає вплив зворотного зв'язку по ЕРС двигуна.

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

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

Передавальна функція розімкнутого токового контуру отримає вигляд

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

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

$$k_{рт} = T_{я}R_c/(2T_{дт}k_{пр}k_{дт}), \tau_{рт} = T_{я} \quad (3.9)$$

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

$$W_i^{omm}(p) = \frac{1}{2T_{om}p(T_{om}p+1)} \quad (3.10)$$

Тут наведено передавальну функцію розімкнутого контуру струму, налаштованого на оптимальну роботу за модулем, при нехтуванні впливом зворотного зв'язку по ЕРС двигуна. Зазвичай таке спрощення виправдане, оскільки вплив ЕРС можна розглядати як зовнішнє збурення для контуру регулювання струму.

Швидкість зміни ЕРС визначається електромеханічною сталою двигуна, тоді як динамічні характеристики контуру регулювання швидкості, як випливає з відповідного виразу, залежать від постійної часу датчика струму, яка значно менша за постійну часу якорного ланцюга і, відповідно, набагато менша за електромеханічну сталу. Внаслідок цього збурення від ЕРС може бути компенсоване контуром регулювання струму без виникнення динамічної помилки, і його вплив на динамічні властивості приводу можна вважати незначним.

Тому можна прийняти $A(p)=1$ і вважати, що ток якоря визначається напругою завдання струму U_{zt} , яка надходить з виходу регулятора швидкості. Для пояснення принципу налаштування регулятора швидкості передавальну функцію постійної частини контуру швидкості зручно уявити у відповідному вигляді.

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

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

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

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

Оскільки в цьому випадку об'єкт контуру швидкості представляє собою інтегруючу ланку з певною передавальною функцією, для досягнення оптимальної роботи за модулем доцільно використовувати пропорційний регулятор з відповідним передавальним коефіцієнтом.

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

Оскільки величина $R_c / (K\Phi)^2$ характеризує похибку розімкнутої системи, тобто зниження швидкості двигуна на його природній характеристиці, стає очевидним, що в замкнутій системі ця похибка буде меншою, якщо постійна часу $T_{\mu\omega}$ значно менша за T_m . У випадку великої похибки контур можна налаштувати на симетричний оптимум, використовуючи ПІ-регулятор швидкості з $\tau_{pc} = 4T_{\mu\omega}$ та коефіцієнтом k_{pc} , визначеним раніше.

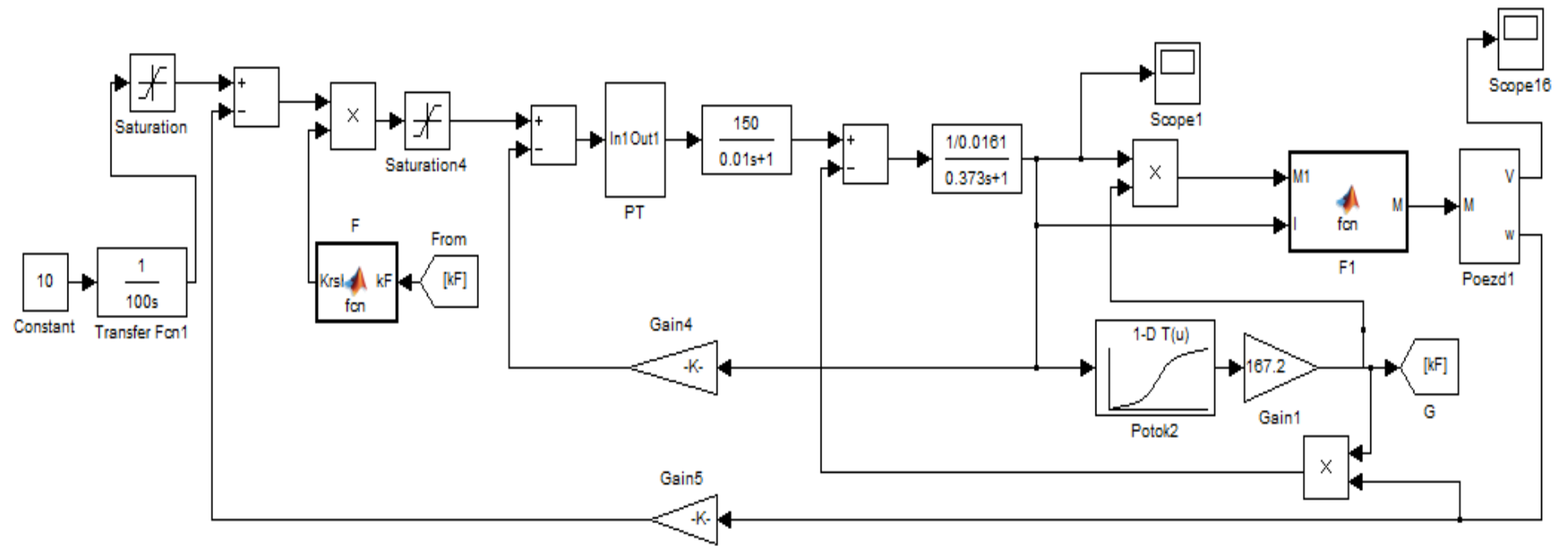


Рисунок 3.7 - Схема математичної моделі двухконтурної системи підлеглого керування

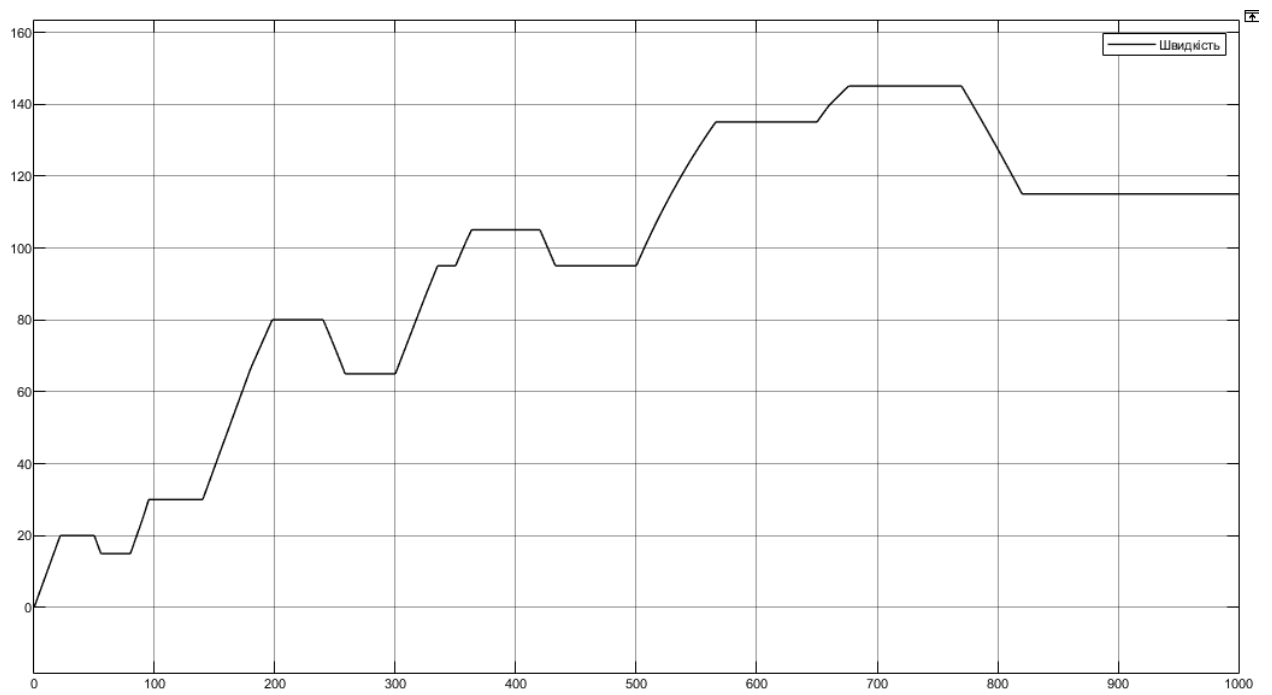


Рисунок 3.8 - Характеристика швидкості руху поїзда

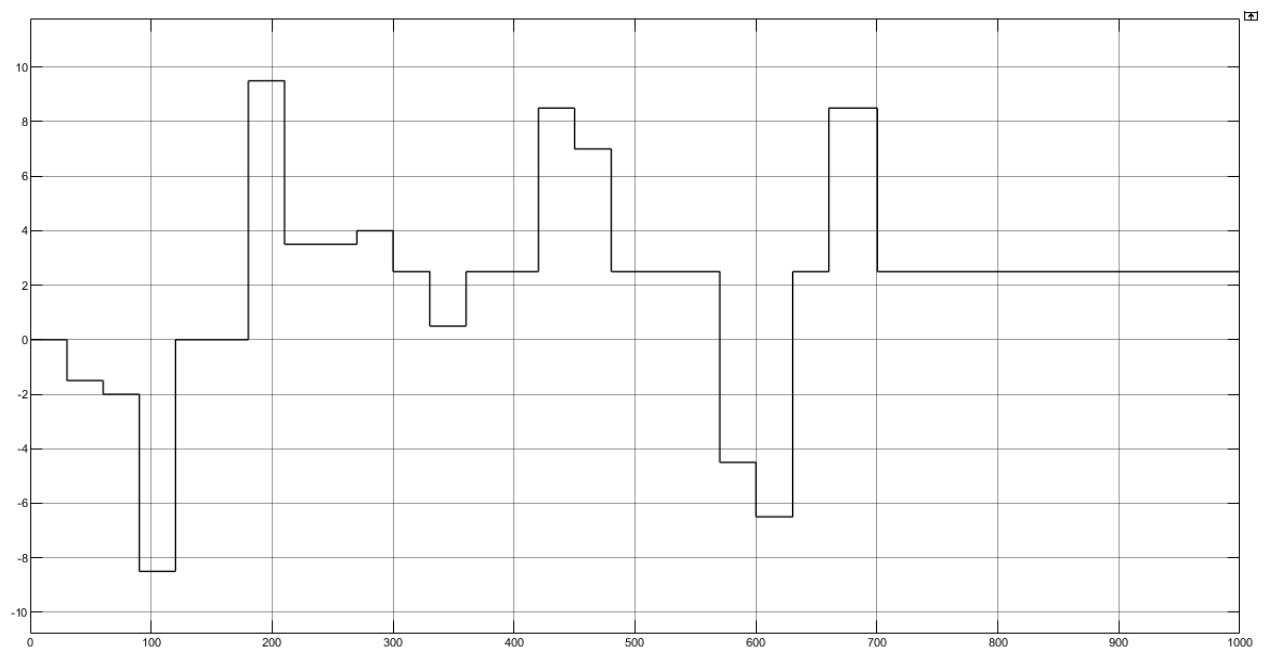


Рисунок 3.9 - Характеристика профілю шляху

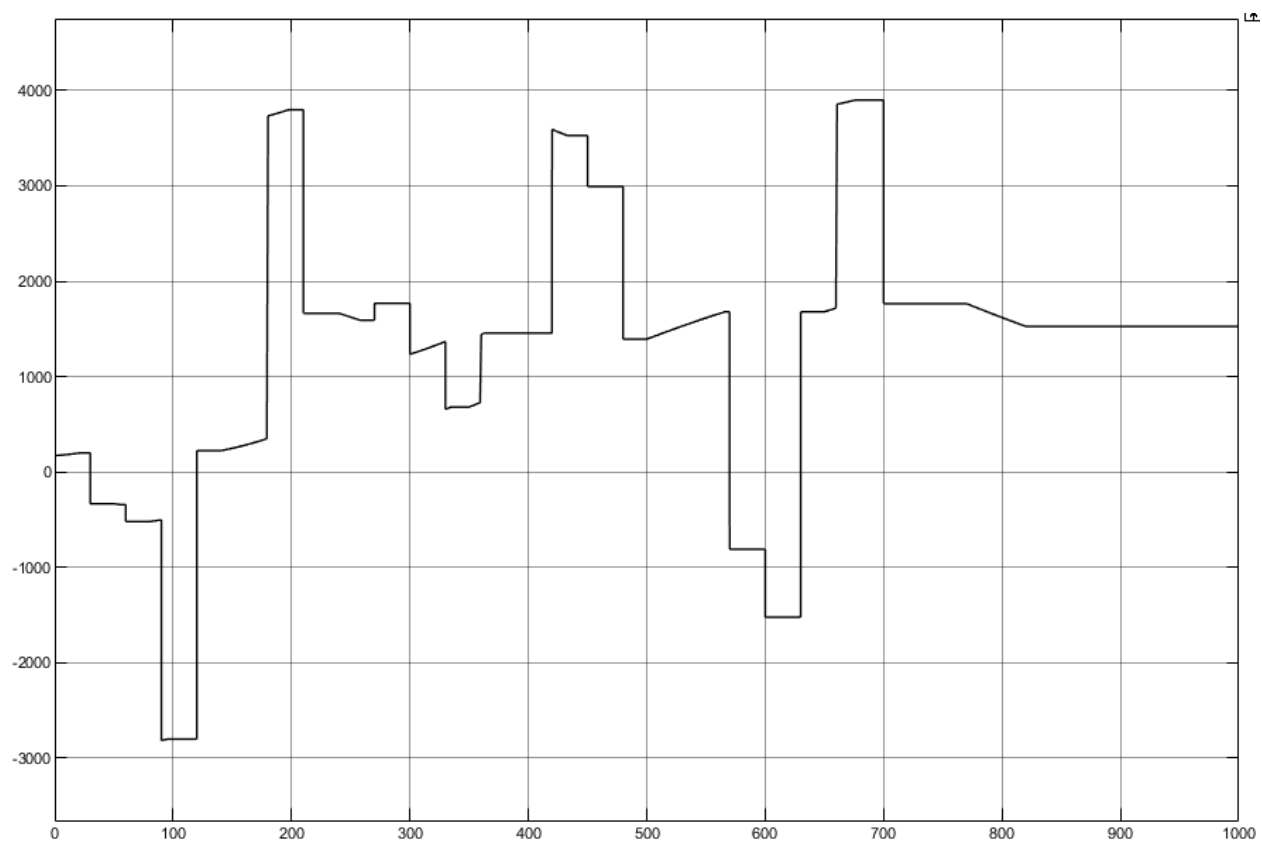


Рисунок 3.10 - Характеристика моменту опору

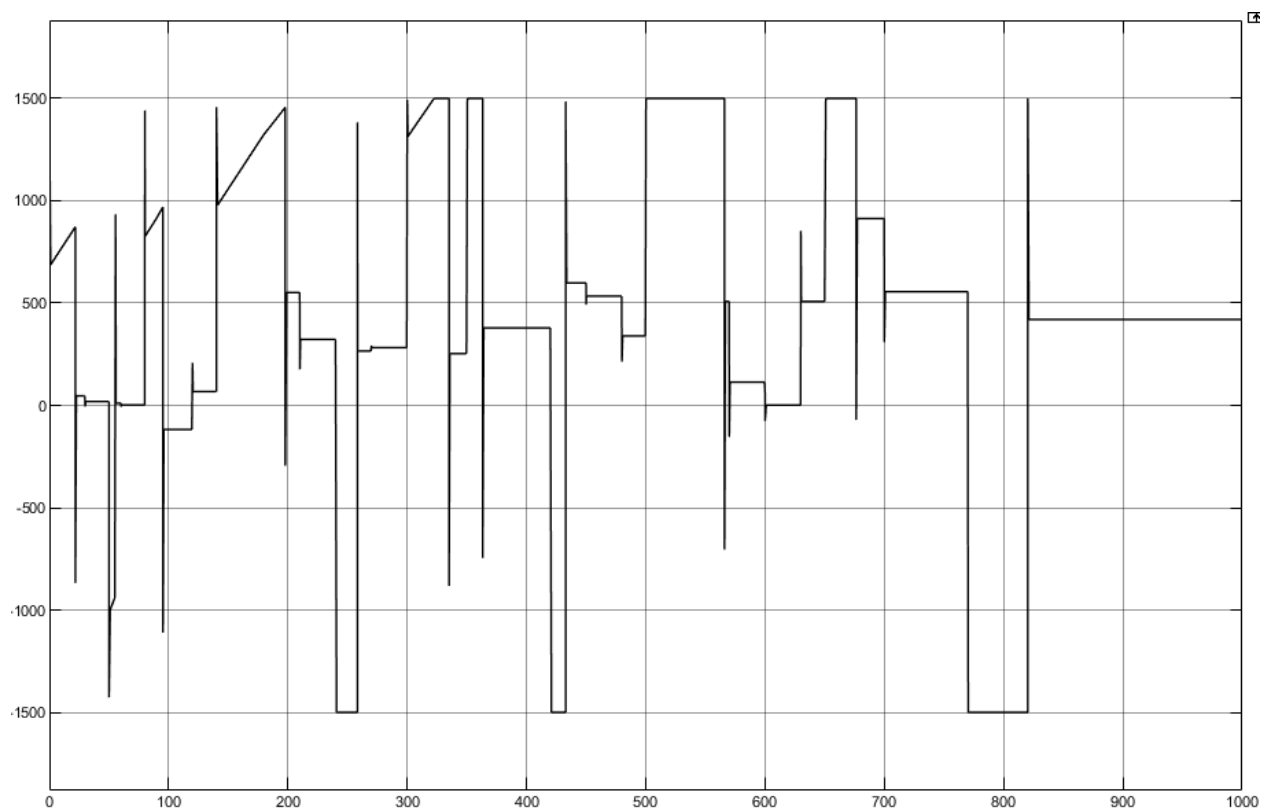


Рисунок 3.11 - Характеристика струму

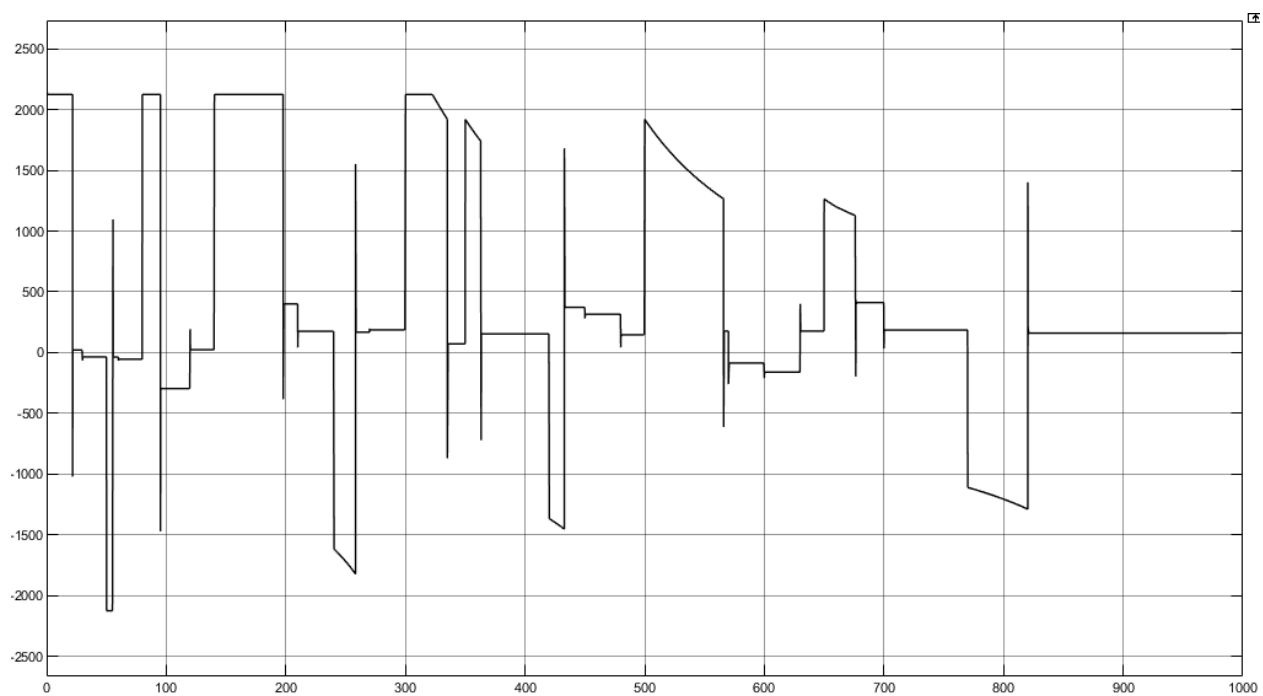


Рисунок 3.12 - Характеристика моменту двигуна

4 Математичне моделювання асинхронних тягових двигунів

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:

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

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.

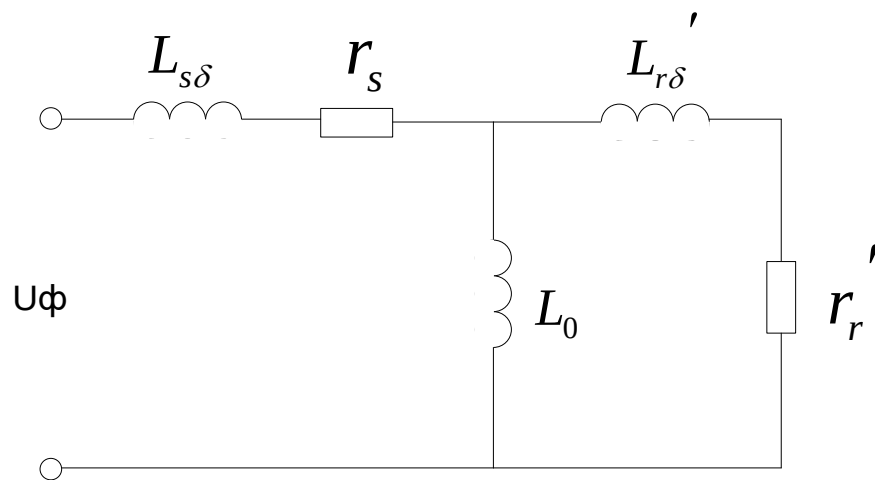


Рисунок 4.4 - Т-образна схема заміщення фази двигуна

$L_{s\delta}$ – 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.

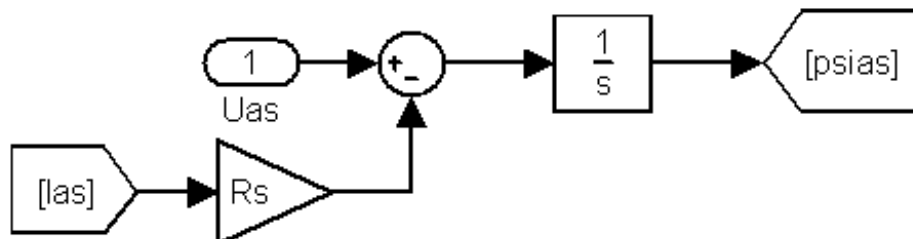


Рисунок 4.5 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення статора на вісь α

У цьому блоці реалізовано перше рівняння системи (5.1):

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

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».

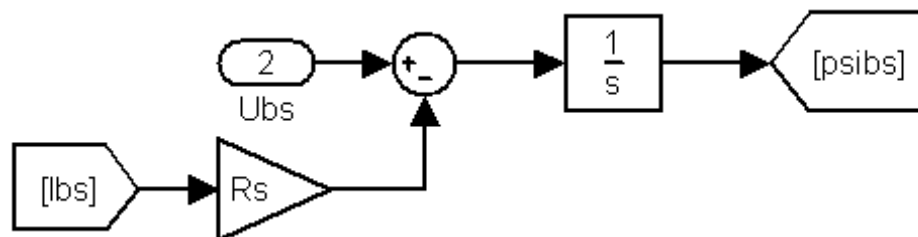


Рисунок 4.6 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення статора на вісь β

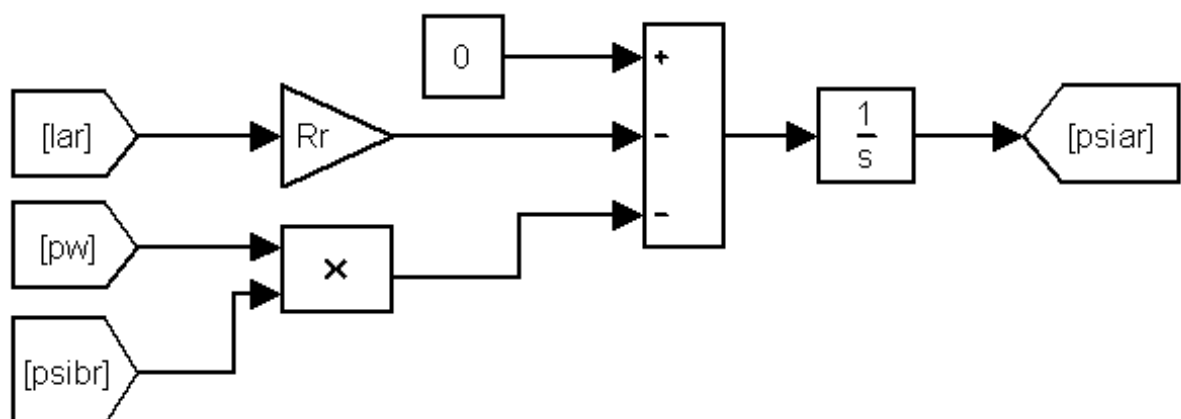


Рисунок 4.7 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення ротора на вісь α

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.

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

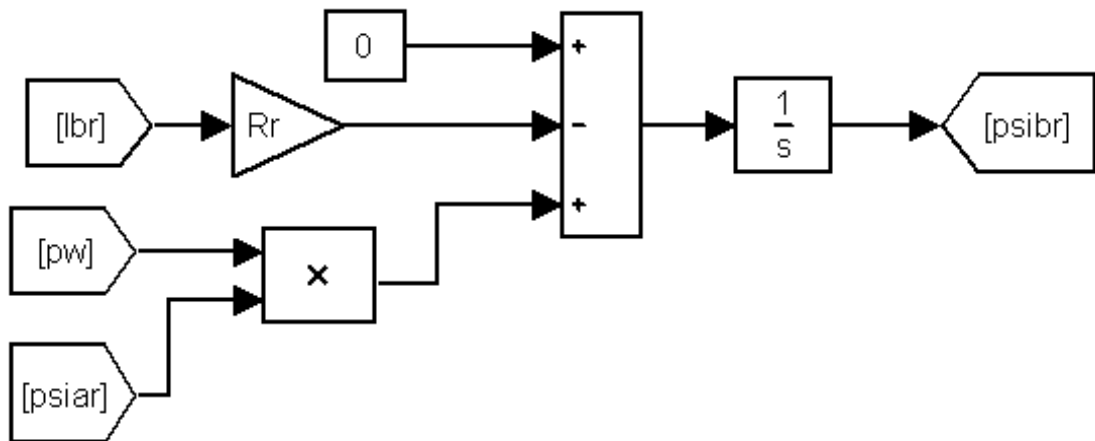


Рисунок 4.8 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення ротора на вісь β

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 А 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.

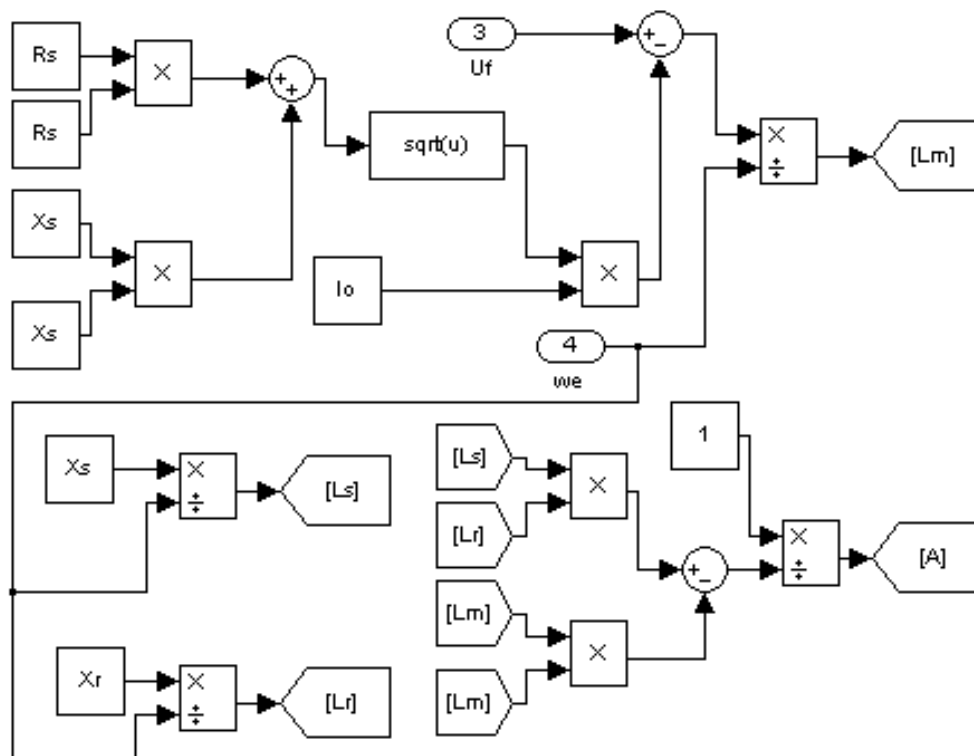


Рисунок 4.9 – Розгортка блоків, що формують індуктивність намагнічуючого контуру та коефіцієнта А.

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.

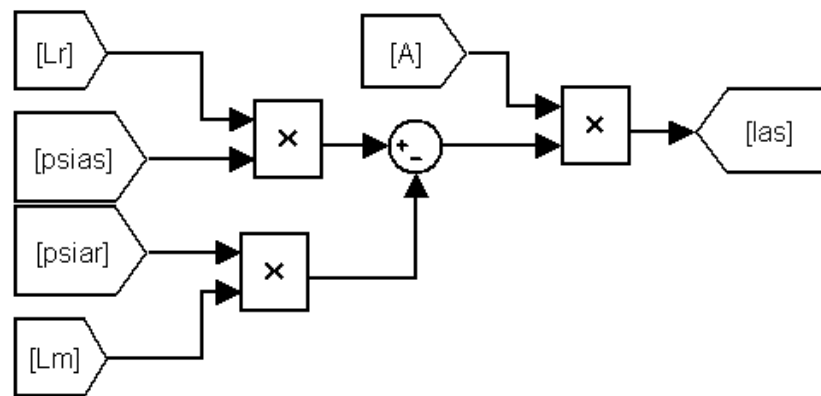


Рисунок 4.10 – Блок, що моделює проекцію вектора струму статора на вісь α

У розгортці блоку (рисунок 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.

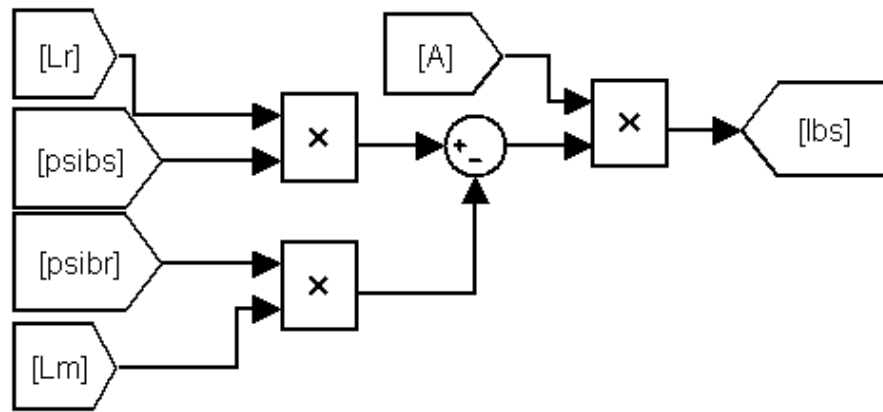


Рисунок 4.11 – Блок, що моделює проекцію вектора струму ротора на вісь β

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

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

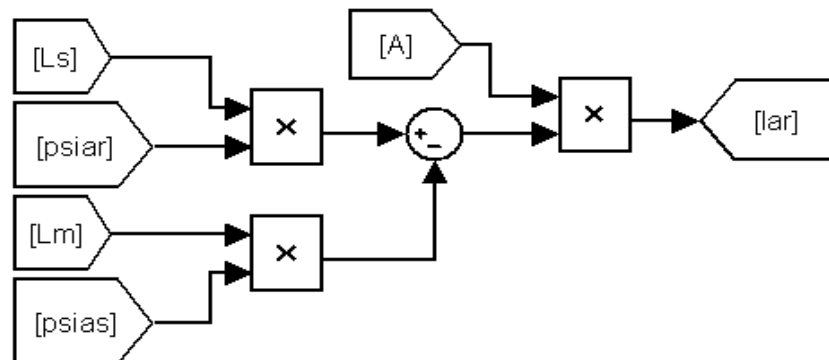


Рисунок 4.12 – Блок, що моделює проекцію вектора струму ротора на вісь α

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.

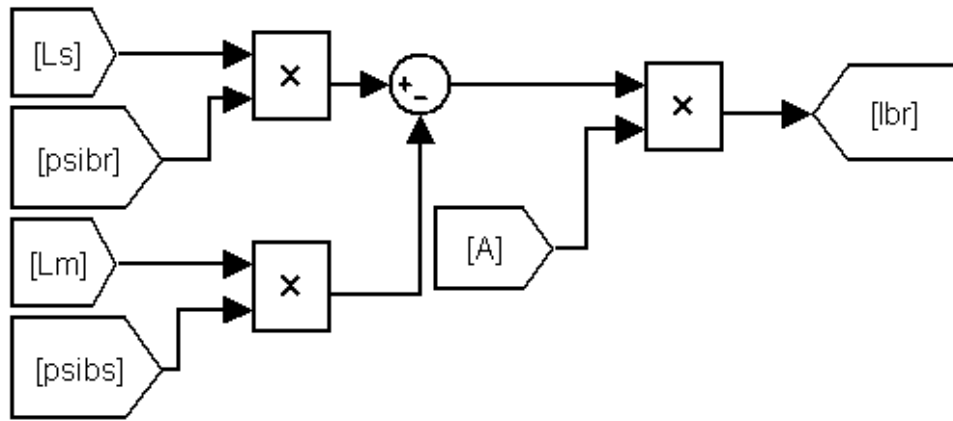


Рисунок 4.13 – Блок, що моделює проекцію вектора струму ротора на вісь β

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 добутки третього і четвертого, і результат перемножується із значенням блоку «gape», в якому указується 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».

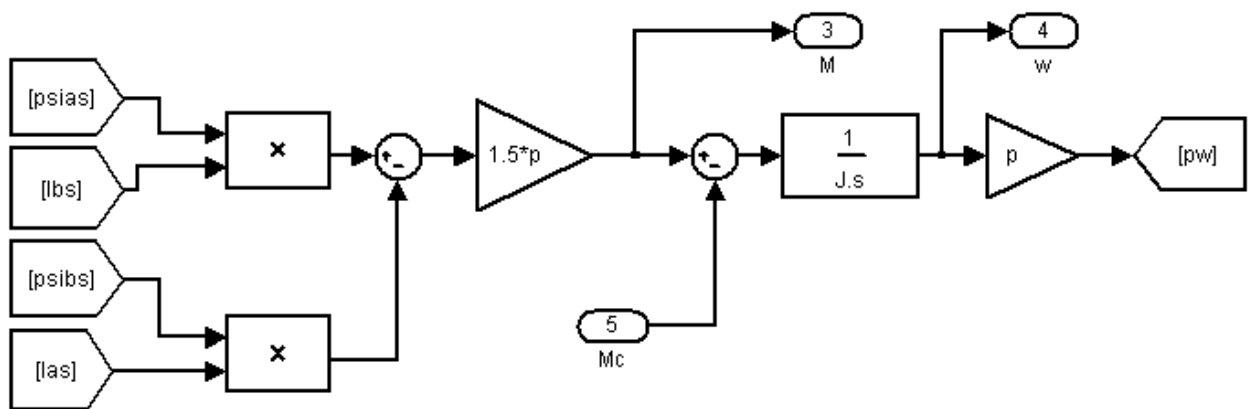


Рисунок 4.14 – Блок, що моделює момент та частоту обертання ротора двигуна

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.

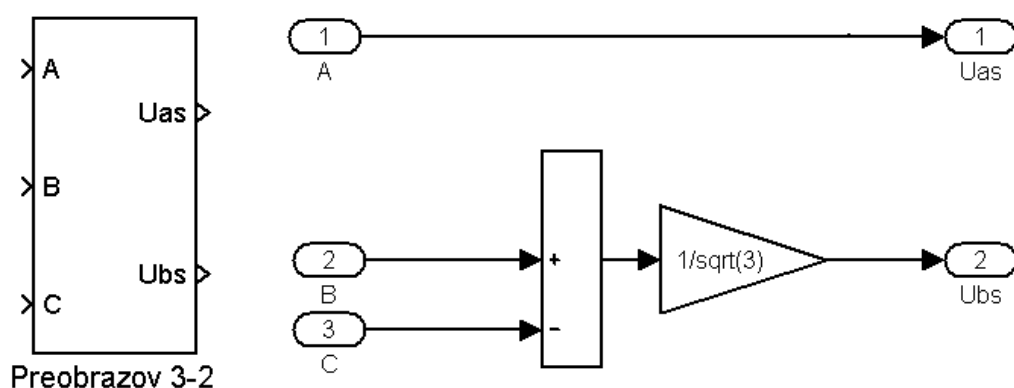


Рисунок 4.15 – Блок, що моделює перерахунок координат системи x, y в систему координат α, β та його розгортка

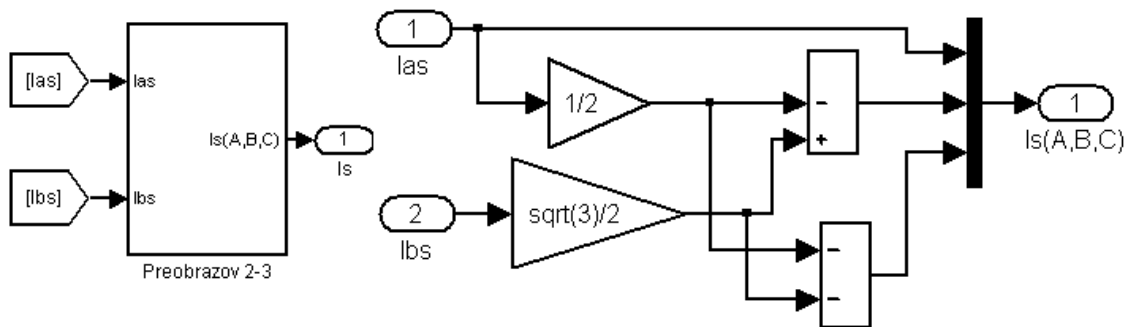


Рисунок 4.16 – Блок, що моделює перерахунок координат системи α, β в систему координат x, y та його розгортка

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.

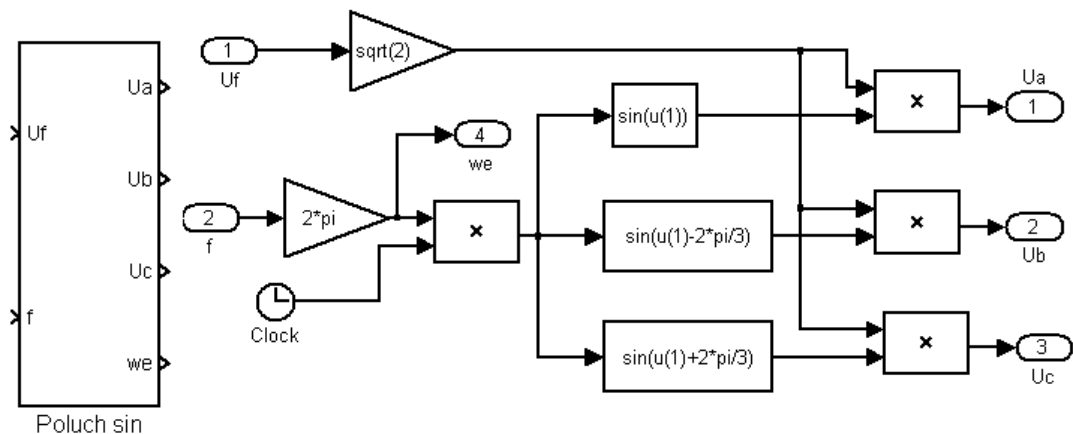


Рисунок 4.17 – Блок, що моделює трифазну напругу та його розгортка

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.

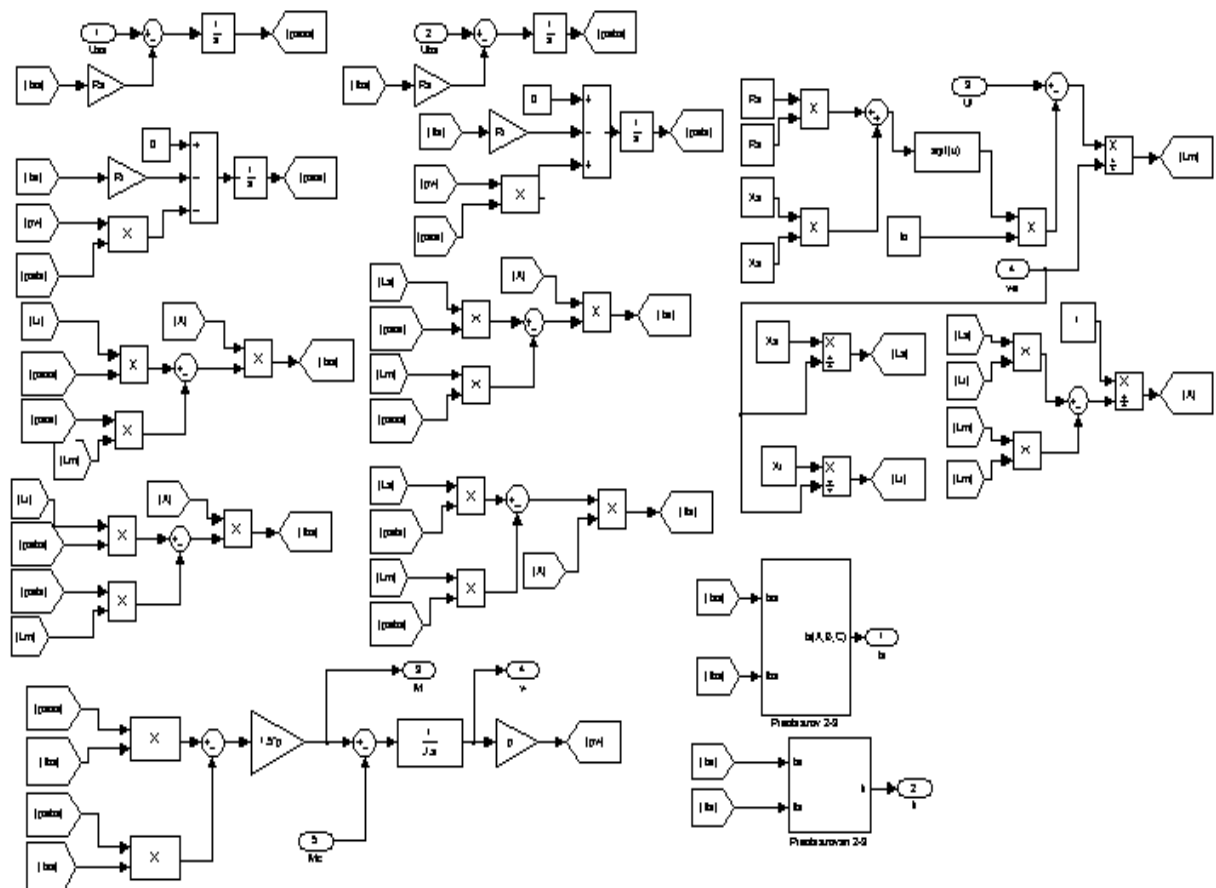


Рисунок 4.18 – Загальний вид моделі асинхронного двигуна

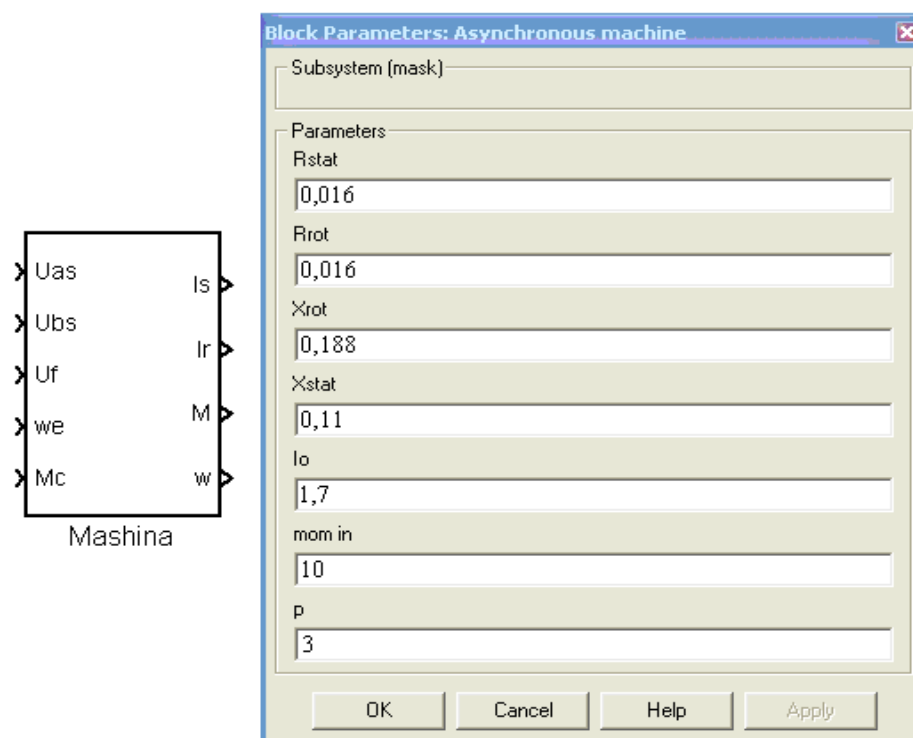


Рисунок 4.19 – Маска моделі асинхронного двигуна

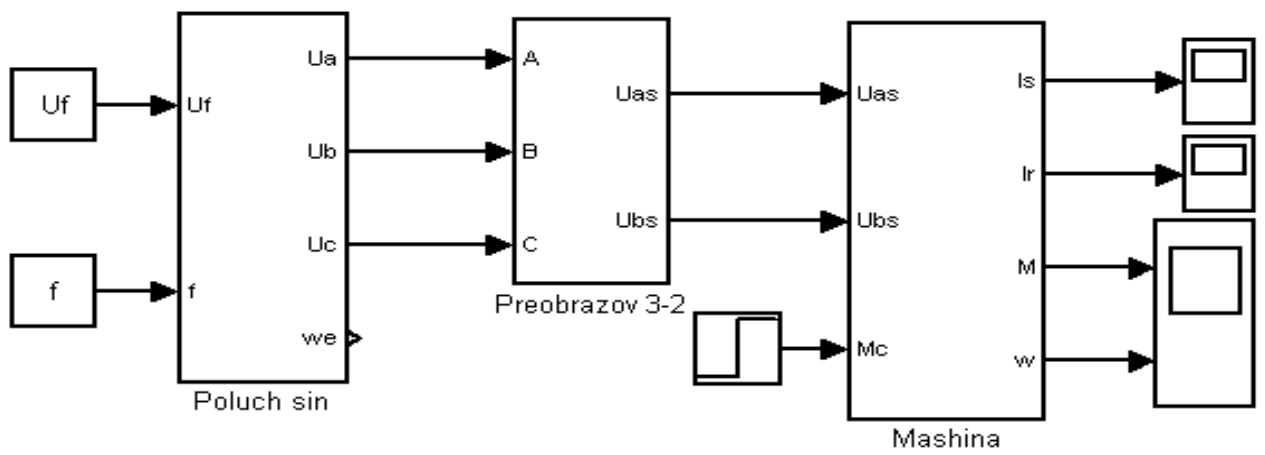


Рисунок 4.20 – Загальний вид моделі асинхронного приводу

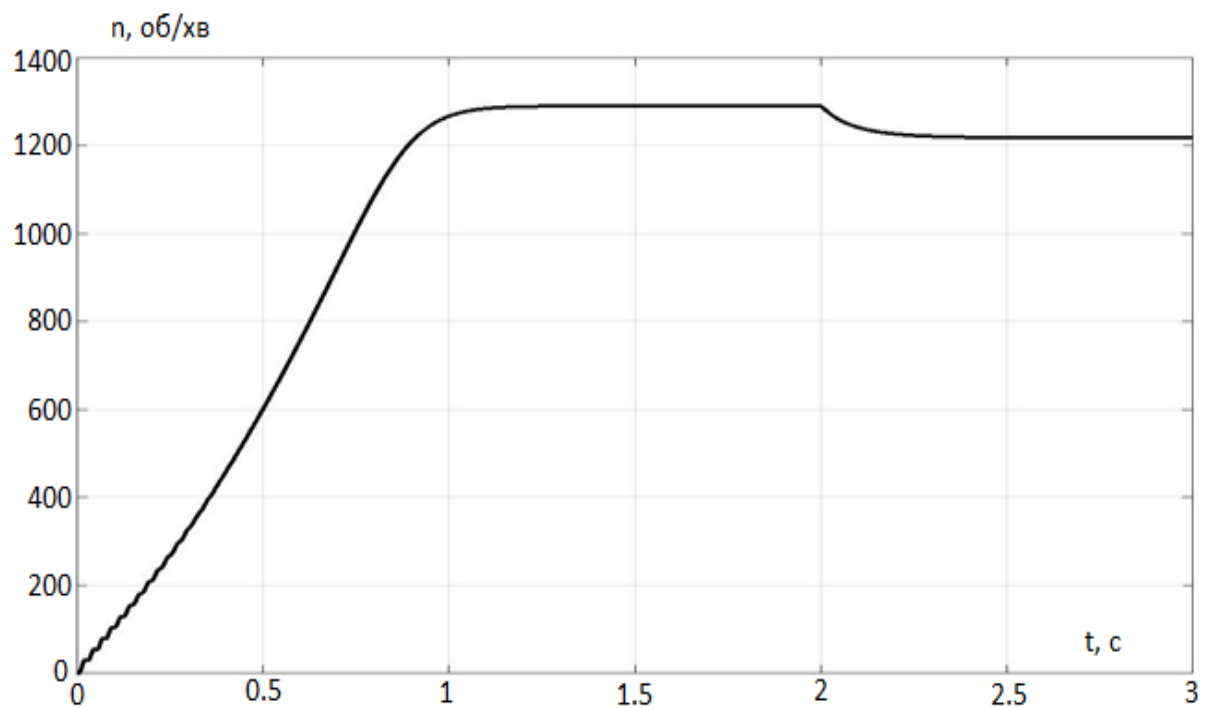


Рисунок 4.21 – Осцилограма розгону двигуна НБ-607

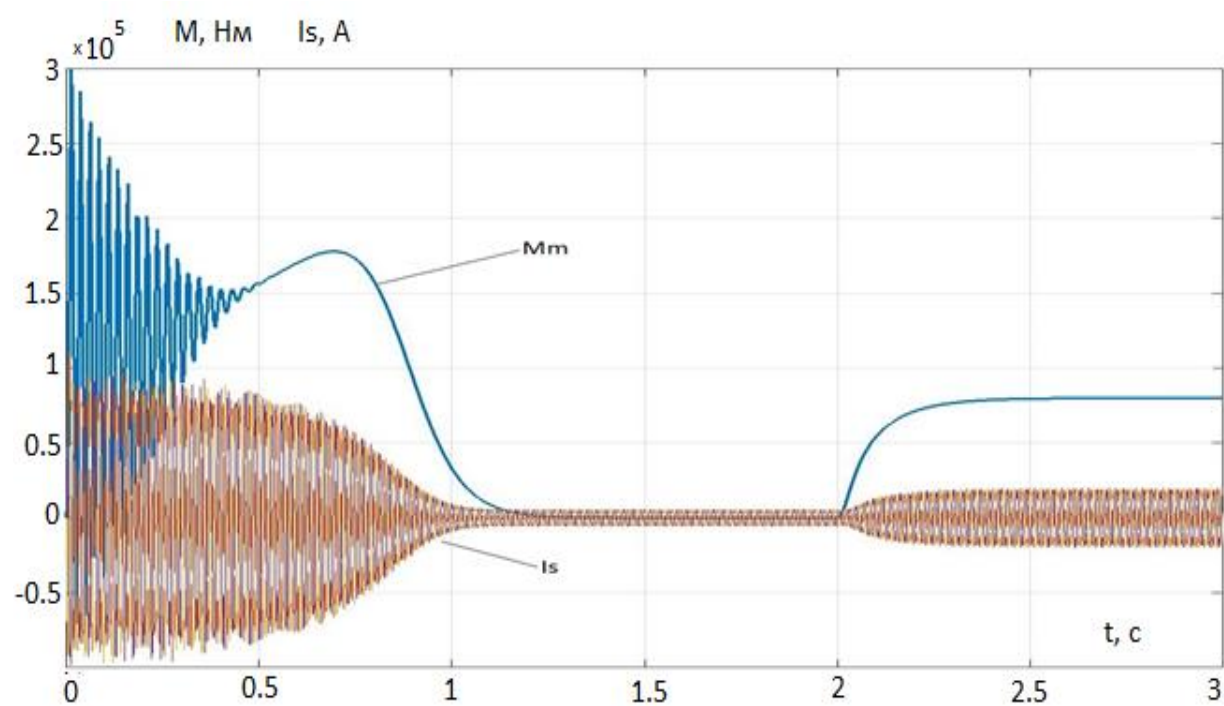


Рисунок 4.22 – Осцилограма моменту двигуна НБ-607

5 Моделювання частотного перетворювача для керування асинхронним двигуном

5.1 Вибір та обґрунтування силової схеми тягового електропривода

Частотні перетворювачі використовують для плавного та широкодіапазонного регулювання швидкості обертання валу асинхронного двигуна. Вони належать до класу інверторів напруги, що дає змогу працювати в значно ширших межах зміни вихідної частоти порівняно з іншими типами перетворювачів.

Силова частина тягового електроприводу повинна забезпечувати стабільне функціонування асинхронного тягового двигуна в режимах тяги та різних видів електричного гальмування — рекуперативного, реостатного або комбінованого рекуперативно-реостатного — на всьому діапазоні швидкостей. Перемикання між режимами має відбуватися без різких поштовхів чи стрибкоподібних змін сил, що впливають на поїзд.

Для формування будь-якої необхідної тягової або гальмівної характеристики, у межах обмежених їхніми граничними кривими, перетворювач повинен забезпечувати незалежне регулювання частоти струму статора асинхронного двигуна в діапазоні приблизно від 0,5–1 Гц до 100–150 Гц, а також регулювання амплітуди основної гармоніки напруги від мінімальних значень (із компенсацією падіння напруги в обмотках статора) до величин, що дорівнюють або навіть перевищують номінальну напругу статора.

Силова структура електронної системи керування може містити вхідний і вихідний перетворювачі. Перший забезпечує регулювання вхідної напруги, другий — зміну її частоти. На ділянках змінного струму роль вхідного перетворювача може виконувати тяговий трансформатор, тоді як вихідним елементом є дворівневий автономний інвертор напруги. Якщо живлення здійснюється від однофазної мережі змінного струму, то перетворення енергії

для живлення асинхронних тягових двигунів реалізується через ланку постійного струму.

У межах цього дипломного проєкту передбачається застосування чотириквADRантного перетворювача, аналогічного тому, що встановлений на електровозі серії ДС-3. Його параметри повністю відповідають технічним вимогам модернізації електровоза ЧС7.

Передбачається заміна колекторних ТД на асинхронні тягові двигуни з короткозамкненим ротором, які нині широко використовуються в транспортній галузі. Для ефективного керування швидкістю обертання таких двигунів необхідне живлення багатофазною напругою регульованої частоти. На електрорухомому складі змінного струму спочатку формується ланка постійної напруги за допомогою випрямляча, після чого для підвищення енергетичної ефективності використовується чотириквADRантний перетворювач.

У результаті для силової частини електроприводу обирається структура на основі чотириквADRантного перетворювача та дворівневого трифазного мостового інвертора, який живить три асинхронні тягові двигуни, з'єднані паралельно (рис. 5.1).

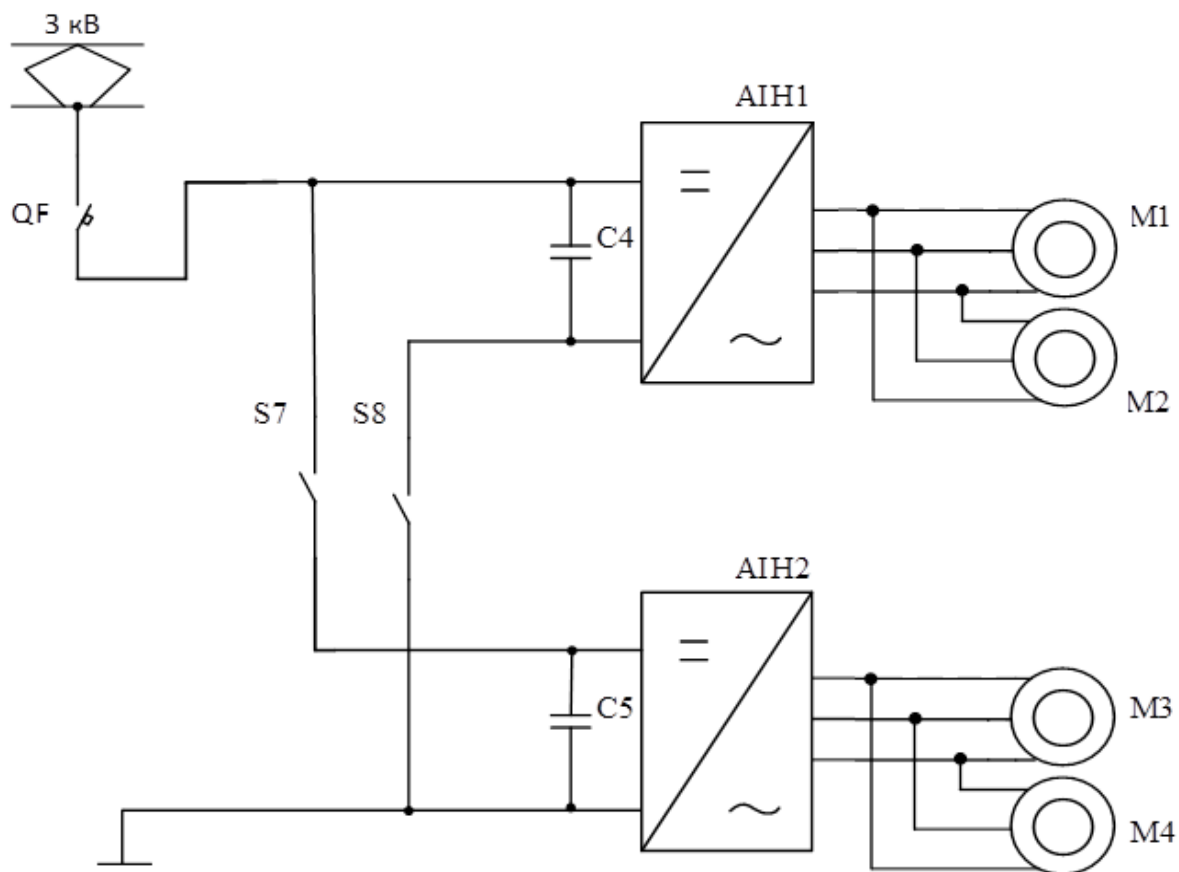


Рисунок 5.1 – Функціональна схема тягового електропривода

5.2 Вибір та обґрунтування схеми автономного інвертора напруги

Автономні інвертори напруги (АІН) сьогодні є одним з найпоширеніших елементів у системах електроприводу змінного струму з частотним керуванням і слугують основними пристроями для формування змінної напруги. Такі електроприводи активно витісняють системи з двигунами постійного струму та застосовуються як у промислових установках, так і в тягових приводах. Діапазон потужностей частотних приводів на основі АІН охоплює величини від кількох ватів до багатомегаватних установок.

У подібних системах як виконавчий механізм використовують трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором. Щоб забезпечити можливість повного регулювання параметрів роботи двигуна,

інвертор повинен формувати трифазну напругу зі змінюваними амплітудою та частотою.

Типовий автономний інвертор напруги містить шість силових ключів. Керовані транзистори, перемикаючись у визначеній послідовності, створюють на виході інвертора періодичний трифазний сигнал. Для трифазного навантаження існує $2^3 = 8$ можливих комбінацій під'єднання фаз до шин постійної напруги, дві з яких дають нульовий вектор і вважаються виродженими.

Основним недоліком такої структури є значне відхилення форми фазної напруги від синусоїдальної, що погіршує енергетичні показники асинхронного двигуна порівняно з живленням від ідеальної трифазної синусоїдальної системи.

Частота вихідної трифазної напруги АІН регулюється шляхом зміни частоти комутації силових ключів, тоді як амплітуда змінюється за принципом широтно-імпульсного (ШІМ) керування. Оскільки АІН є джерелом напруги, його основним керованим параметром виступає напруга на затискачах машини. Сучасні інвертори будуються на повністю керованих напівпровідникових модулях — IGBT-транзисторах.

Для трифазного мостового АІН класифікаційними ознаками є наявність ємнісного фільтра на вході та діодів зворотного струму, під'єднаних паралельно силовим ключам. Через транзисторні вентиля проходить активна складова струму двигуна, тоді як діоди проводять його реактивну частину. Вхідний конденсатор компенсує реактивну потужність асинхронного двигуна та забезпечує замикання змінної складової струму.

У гальмівному режимі інвертор переходить із інвертування в режим випрямлення: працюють діоди зворотного струму, а керовані ключі подають на двигун необхідну енергію збудження. Полярність вхідної напруги зберігається, але напрям струму змінюється. Для реалізації різних режимів гальмування силова частина повинна містити або керований випрямляч, який

повертає енергію в мережу, або частину кола з гальмівним резистором для реалізації реостатного гальмування.

Оскільки інверторні електроприводи в більшості випадків працюють з трифазними асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором, основні дослідницькі зусилля були спрямовані на удосконалення схем і алгоритмів перетворювачів, а також оптимізацію конструкцій двигунів із метою зменшення впливу гармонік, що виникають через несинусоїдальність напруги.

Для досягнення високої динамічності системи швидкодія перетворювача повинна значно перевищувати швидкість протікання електромагнітних процесів у двигуні. Крім того, для реалізації максимальних за умовами зчеплення тягових чи гальмівних сил інвертор має бути здатним витримувати короточасні перевантаження по струму.

Імпульсний характер роботи АІН викликає пульсації електромагнітного моменту двигуна та створює завади у мережі електроживлення, які можуть негативно впливати на інші споживачі та засоби сигналізації. Тому перетворювачі повинні формувати напругу та струм такої якості, щоб уникнути збільшених втрат у двигуні та небажаних навантажень на його механічну систему.

Для живлення асинхронних двигунів на транспорті від мережі 25 кВ змінного струму найбільшого поширення набула схема дворівневого автономного інвертора напруги (рис. 6.2). Сучасні високовольтні IGBT-модулі дозволяють застосовувати такі інвертори без потреби у складних багаторівневих структурах, що спрощує силову частину, зменшує вартість і підвищує надійність обладнання порівняно з трирівневими схемами.

В автономних транспортних електроприводах АІН використовують здебільшого для живлення асинхронних машин, а також для забезпечення роботи допоміжних бортових електросистем.

У даному дипломному проєкті передбачено застосування дворівневого автономного інвертора напруги, оскільки цей тип уже успішно експлуатується в Україні, зокрема на електровозах серії ДС-3.

Трифазна дворівнева мостова схема утворюється шляхом об'єднання трьох однофазних півмостових інверторів на спільному джерелі живлення постійної напруги. За такого підходу для під'єднання трифазного навантаження за схемою «зірка» або «трикутник» не потрібно формувати середню точку вхідної напруги.

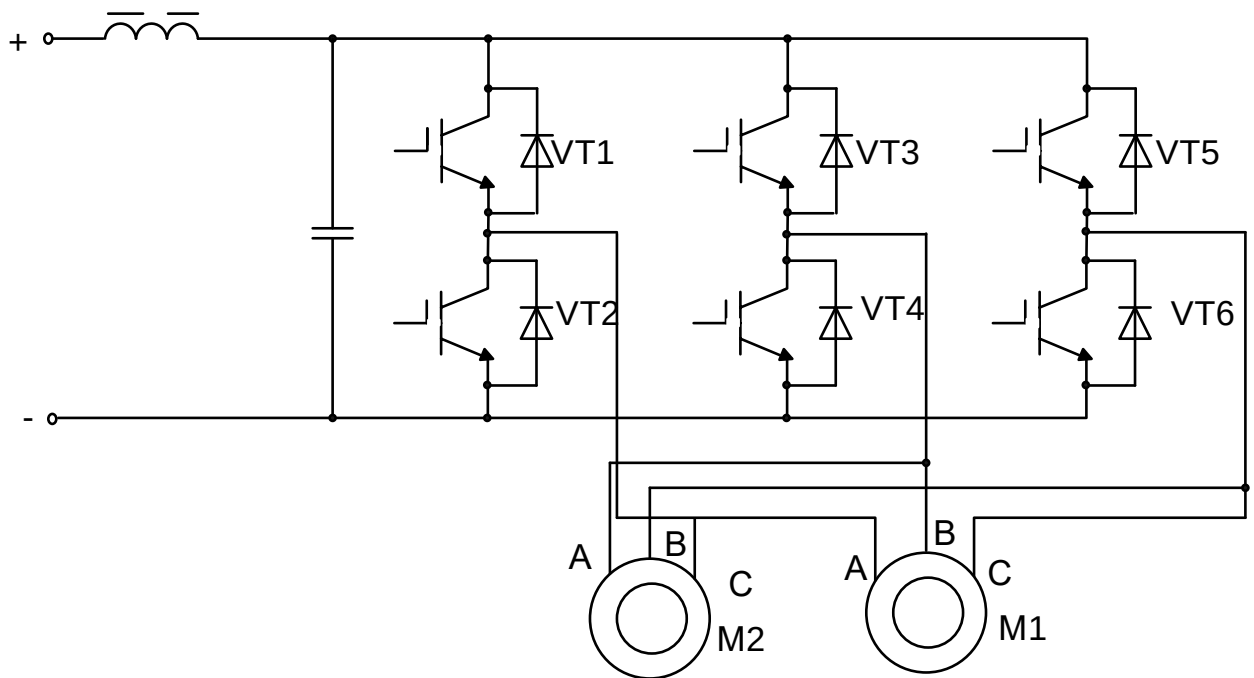


Рисунок 5.2 – Трифазний дворівневий мостовий інвертор напруги

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

5.3.1 Розрахунок та вибір елементної бази трифазного мостового інвертора

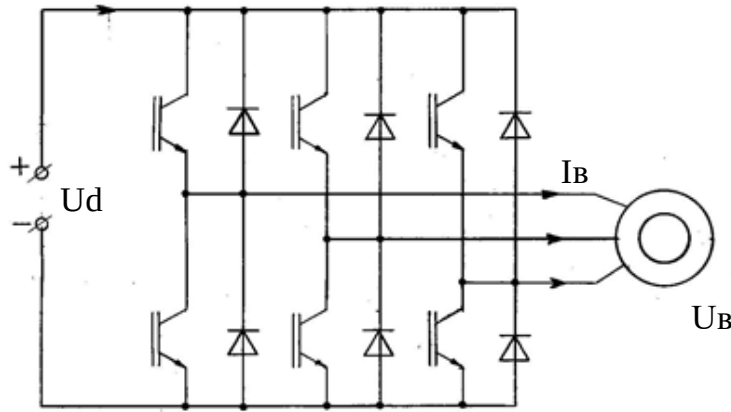


Рисунок 5.3 – Трифазний мостовий інвертор

Номінальне значення першої гармоніки вихідної напруги фази, що діє:

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

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:

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

де $\cos \phi_{B1}$ - коефіцієнт потужності в номінальному режимі.

$$I_{B1} = \frac{960000}{3 \cdot 1223,4 \cdot 0,83} = 393,92 \text{ А}$$

Номінальний середній вхідний струм перетворювача:

$$i_{do} = \frac{3 \cdot K_M}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot I_{B1} \cdot \cos \phi_{B1} \cdot \quad (5.3)$$

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

Номінальний середній струм керованого ключа і діода:

$$I_V = I_D = \frac{I_{B1}}{\sqrt{2} \cdot \pi} + \frac{i_{do}}{6}. \quad (5.4)$$

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

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. Силкові 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 І_г (діюче значення), то фільтр повинен починатися з паралельної ємності. Схема фільтру представлена на рисунку 4.5.

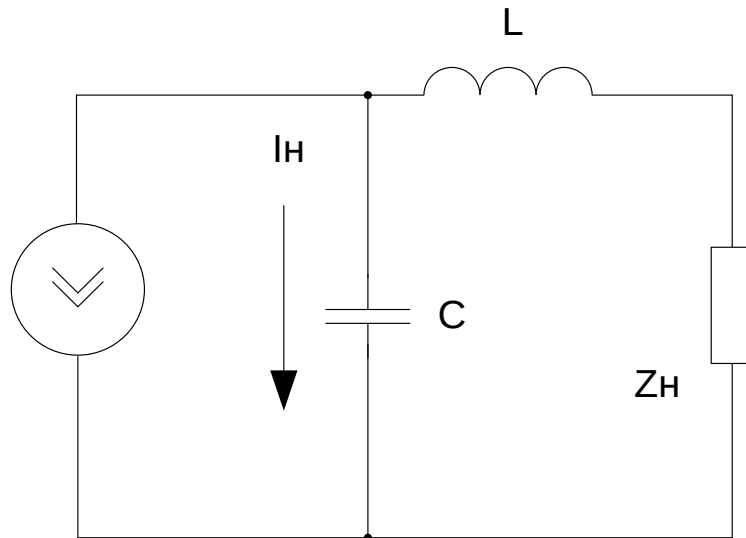


Рисунок 5.4 – Схема фільтра

Ємність фільтра 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 фільтра:

$$C = \frac{282,35}{795,2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 2130} = 2,65 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$$

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

$$\omega L = \frac{U_{\varepsilon}}{I_{H2}} \quad (5.6)$$

де I_{H2} – допустимий вміст фільтрованої гармоніки в струмі навантаження.

Величина I_{H2} визначається по допустимому коефіцієнту пульсації струму:

$$\sqrt{2} I_{H2} = K_{ni} I_{B1} \quad (5.7)$$

де I_{B1} – перша гармоніка струму навантаження.

$$I_{H2} = \frac{0,01 \cdot 39392}{\sqrt{2}} = 2,79 \text{ А}$$

$$L = \frac{795,2}{2,79 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 2130} = 0,021 \text{ Гн}$$

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:

$$u(t) = Um \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (5.8)$$

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

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.

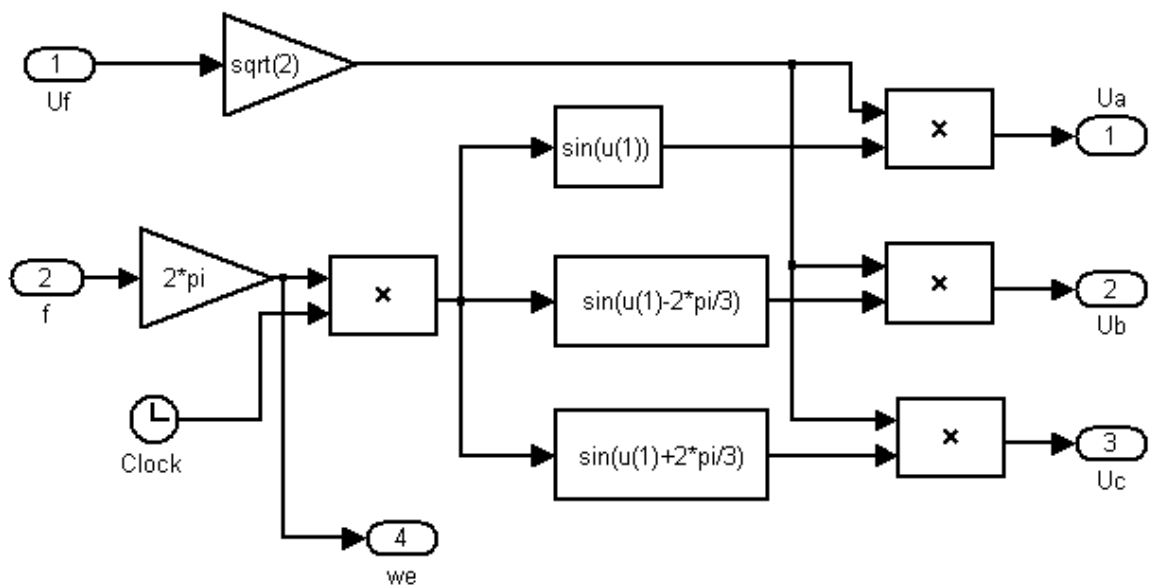


Рисунок 5.5 – Формування фази А в частотному перетворювачі

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 U_z та f_z і отриманий результат за частотним законом керування двигуном подається на блок формування синусоїди по фазам.

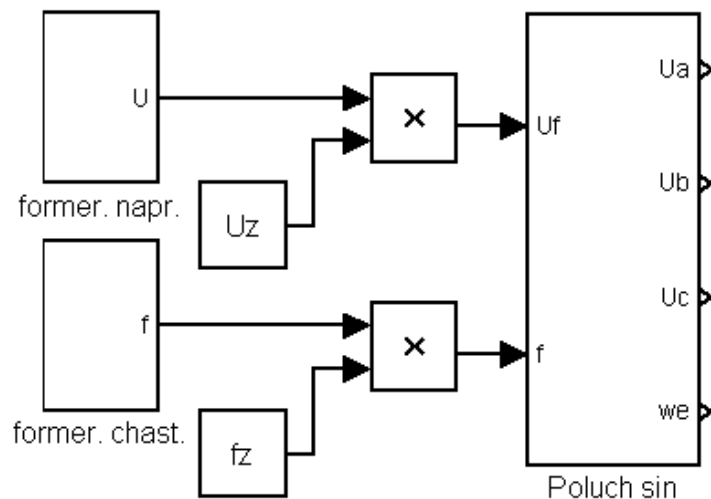


Рисунок 5.6 – Модель частотного перетворювача

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.

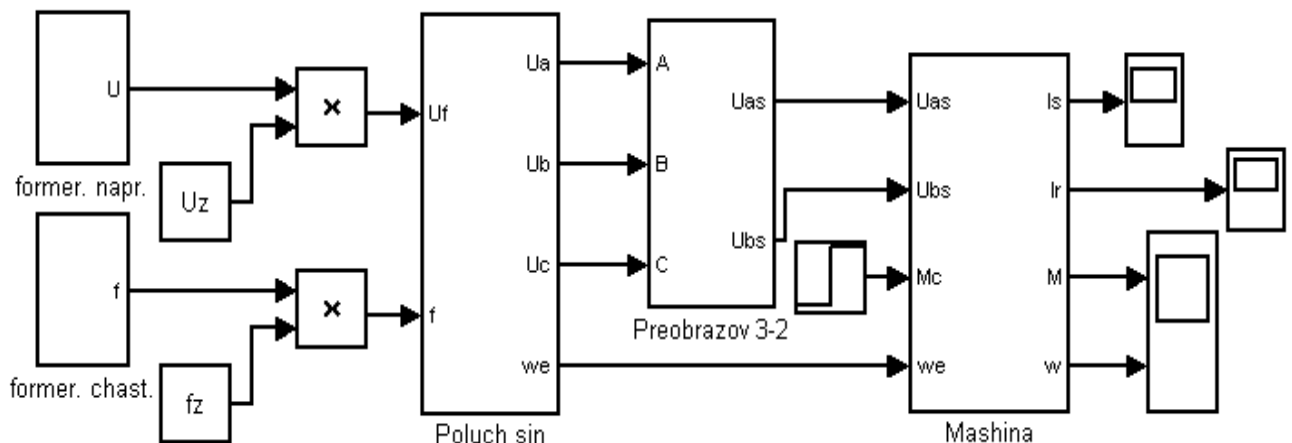


Рисунок 5.7 – Модель асинхронного двигуна разом з частотним перетворювачем

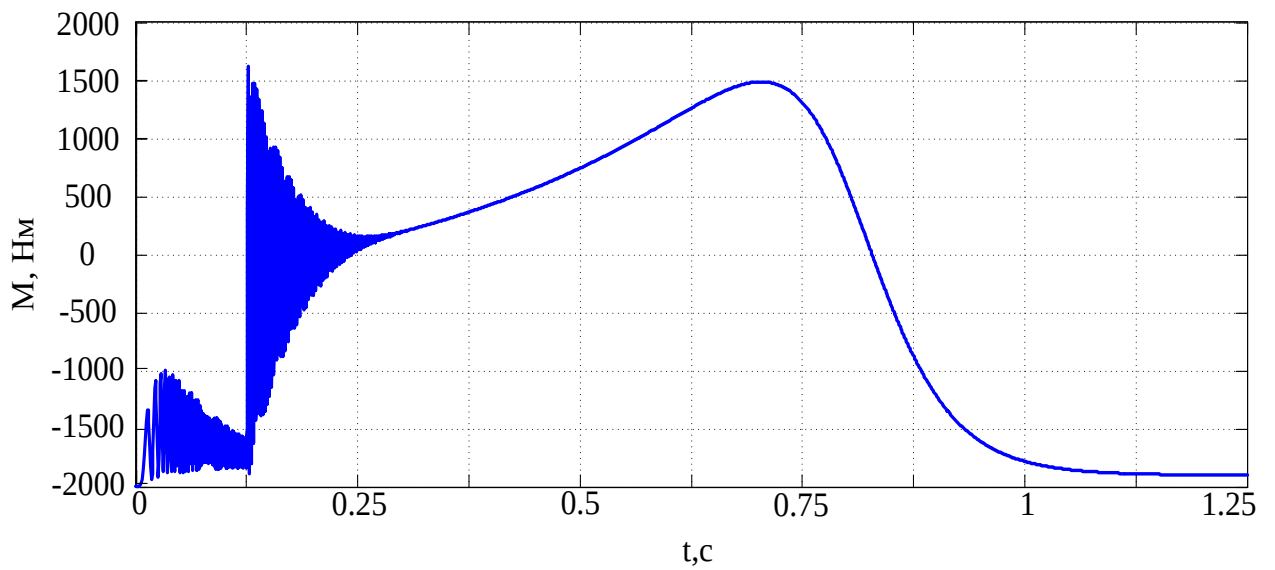


Рисунок 5.8 – Осцилограмма моменту асинхронного двигуна при $f=50$ Гц

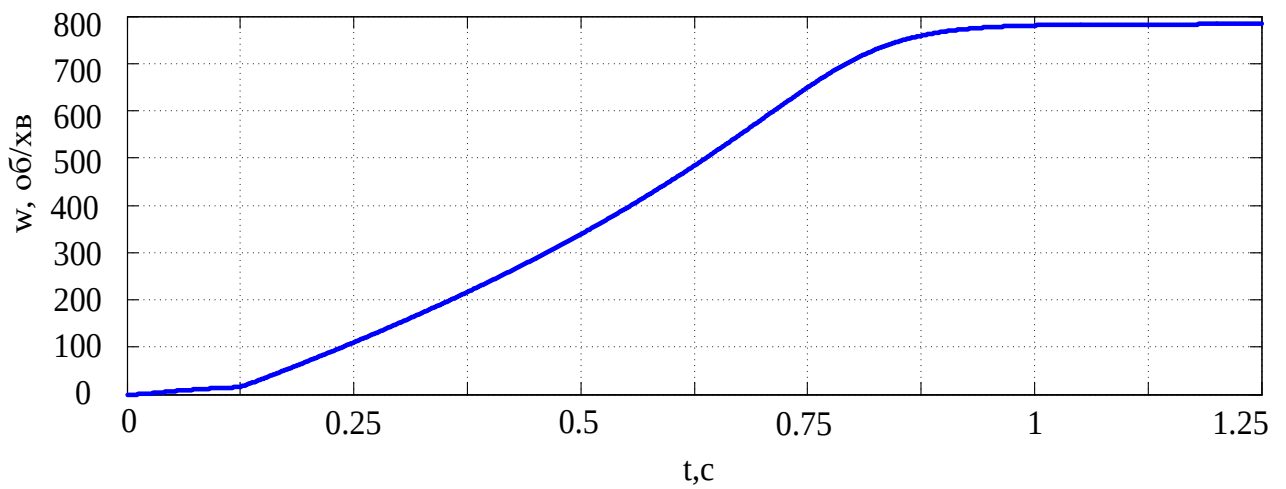


Рисунок 5.9 – Осцилограмма швидкості асинхронного двигуна при $f=50$ Гц

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 ϕ_k повинен обертатися проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю

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

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

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

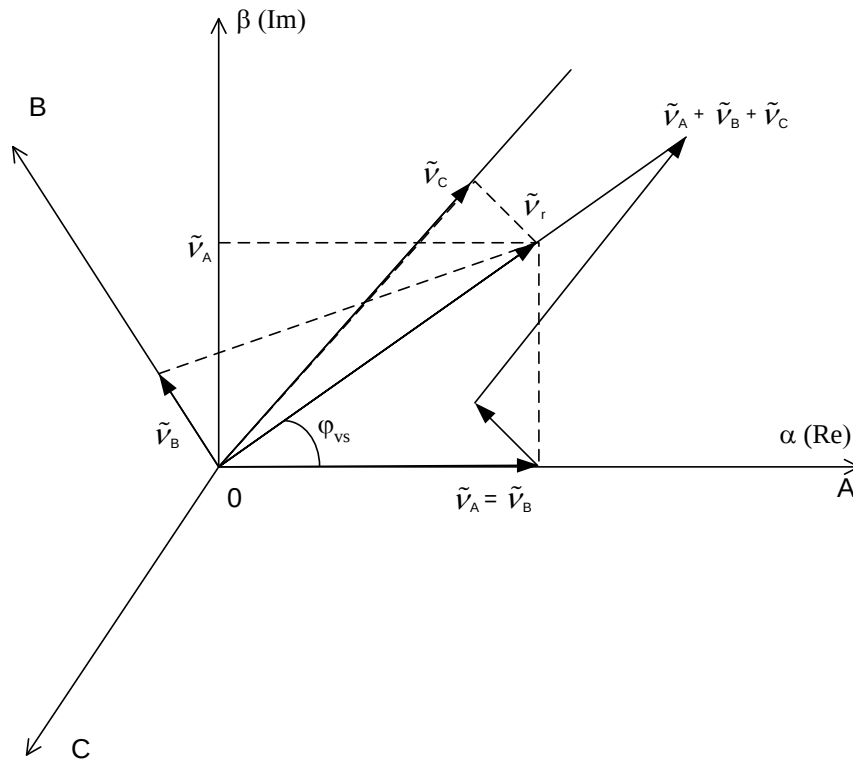


Рисунок 6.1 – Узагальнений вектор і його складові

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 (vd) збігається з віссю a , а друга (vq) - 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:

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

$$\tilde{v}_{r_{abc}} = \tilde{v}_{r_{dq}} = v j \phi_{vr} v r_{vr} d q_{rmax} r_{max}, \quad (6.4)$$

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

$$v_r = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\tilde{v}_a| \\ |\tilde{v}_b| \\ |\tilde{v}_c| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v v r_{max} \\ v v r_{max} \\ v v r_{max} \end{bmatrix},$$

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

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

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

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

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

$$\omega_k = \omega_{\psi_r}, \tag{6.6}$$

$$\psi_{rq} = 0; \psi_{rd} = |\tilde{\psi}_r| = \psi_r = \psi_{rm}. \tag{6.5}$$

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 - потікозчеплення 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:

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

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:

$$L_s = L_m + L_{sl}; L_r = L_m + L_{rl}. \quad (6.10)$$

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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:

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

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} .

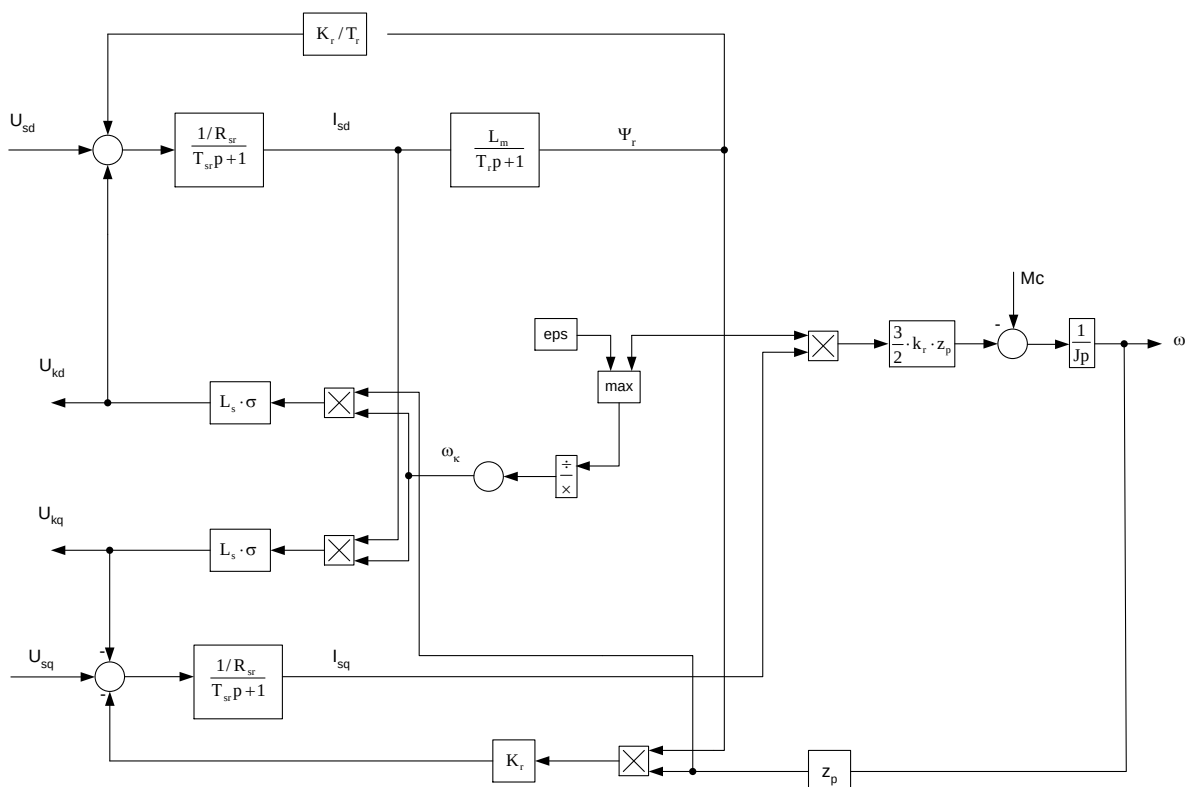


Рисунок 6.2 – Структурна схема АД з КЗ ротором в обертовій системі координат, орієнтованій по потокозчепленню ротора

6.2 Розрахунок параметрів двигуна

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

$$L_{sl} = \frac{X_{sl}}{\omega_s}, \quad (6.21)$$

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

де ω_s – номінальна електрична частота живлення статора, рад/сек;

$$\begin{aligned} \omega_s &= 2\pi f; \\ \omega_s &= 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314; \end{aligned} \quad (6.23)$$

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

- канал регулювання моменту, в якому контур регулювання активної складової струму статора i_{sq} підпорядкований контуру регулювання швидкості;

- канал регулювання потокозчеплення ротора, в якому контур регулювання реактивної складової струму статора i_{sd} підпорядкований контуру регулювання потокозчеплення ψ_r .

Для додання системі необхідних якостей, необхідно синтезувати регулятори як в каналі регулювання (стабілізації) потоку, так і в каналі регулювання швидкості.

При живленні АД від автономного інвертора напруги не вдається синтезувати регулятори класичним способом внаслідок того, що в цьому випадку сильний вплив на динаміку системи надають перехресні зв'язки.

Сучасні системи векторного керування АД, що випускаються ведучими електротехнічними фірмами, будуються на базі програмованого мікропроцесорного управління і є цифровими. Однак вони можуть бути представлені своїм аналоговим варіантом. Структурна схема такого ЕП показана на рисунку 3.15.

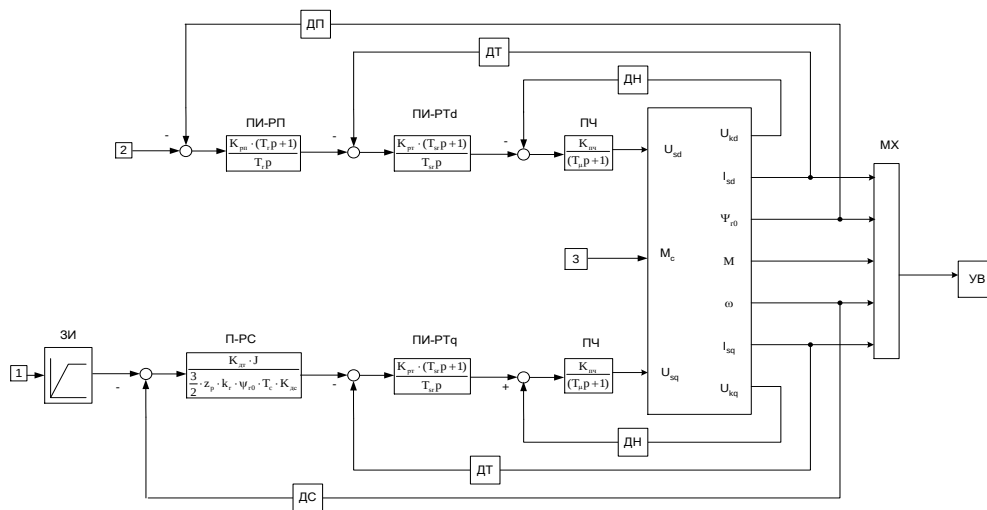


Рисунок 6.6 – Структурна схема векторного керування з компенсацією перехресних зворотних зв'язків об'єкта керування

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 некомпенсироване 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 передавальної функцією:

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

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

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

де $K_{от}$ - коефіцієнт посилення об'єкту регулювання РТ;
 $T_{\tau} = 2 \cdot T_{\mu} = 0,004$ с - постійна часу контуру струму;

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

Де $K_{д\tau}$ - коефіцієнт передачі датчика струму;

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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:

$$K_{\text{дп}} = \frac{10}{\psi_{r0}} \quad (6.42)$$

$$K_{\text{дп}} = \frac{10}{4,16} = 2,4$$

Таким чином отримуємо:

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

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

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:

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

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

де $T_c = 2 \cdot T_T = 0,008$ - 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:

$$K_{дс} = \frac{10}{\omega_n} \quad (6.45)$$

$$K_{дс} = \frac{10}{155} = 0,058$$

Тоді отримуємо коефіцієнт підсилення регулятора швидкості:

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

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 $T_{зи}$ розраховується за співвідношенням, с:

$$T_{зи} = \frac{J \cdot \omega_n}{0,8 \cdot M_n} \quad (6.46)$$

де M_n - номінальний момент двигуна, Н·м:

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

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'язки, 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):

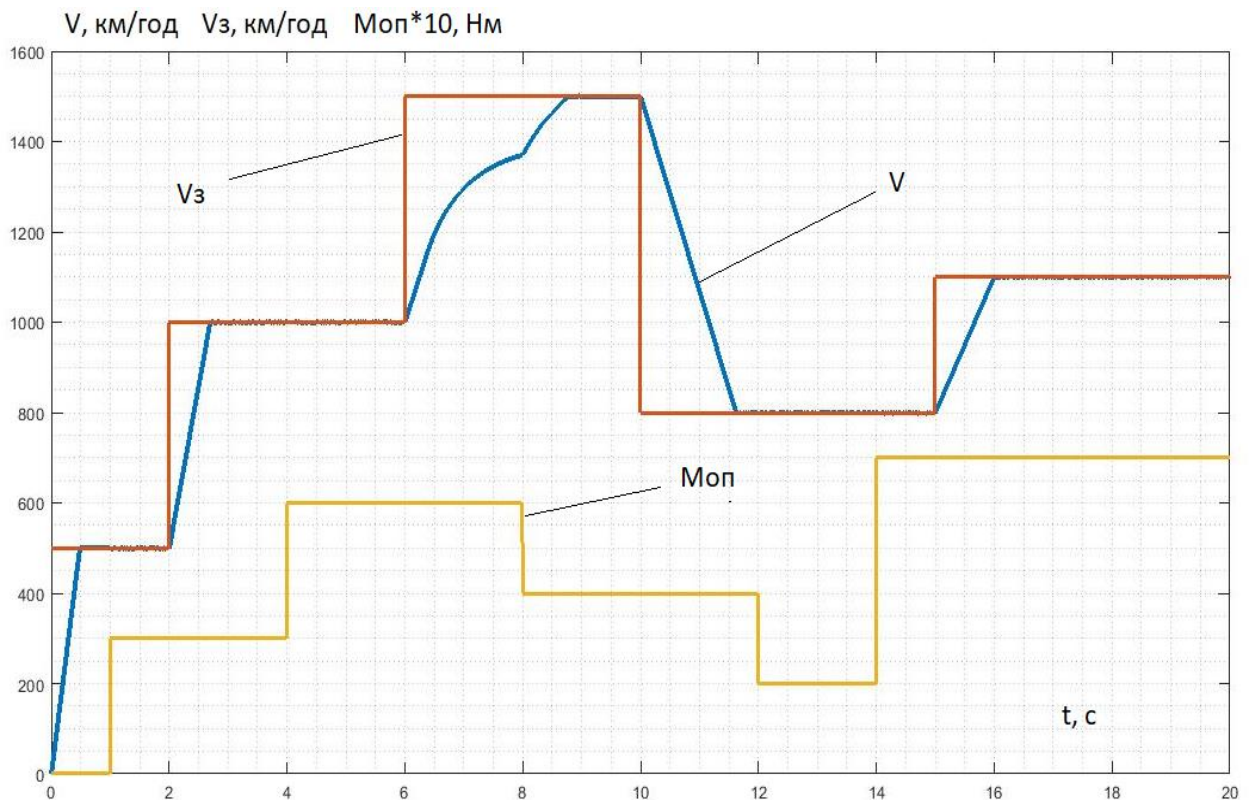


Рисунок 6.4 – Характеристики двигуна при векторному керуванні при різних значеннях моменту опору та різних швидкостях завдання

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).

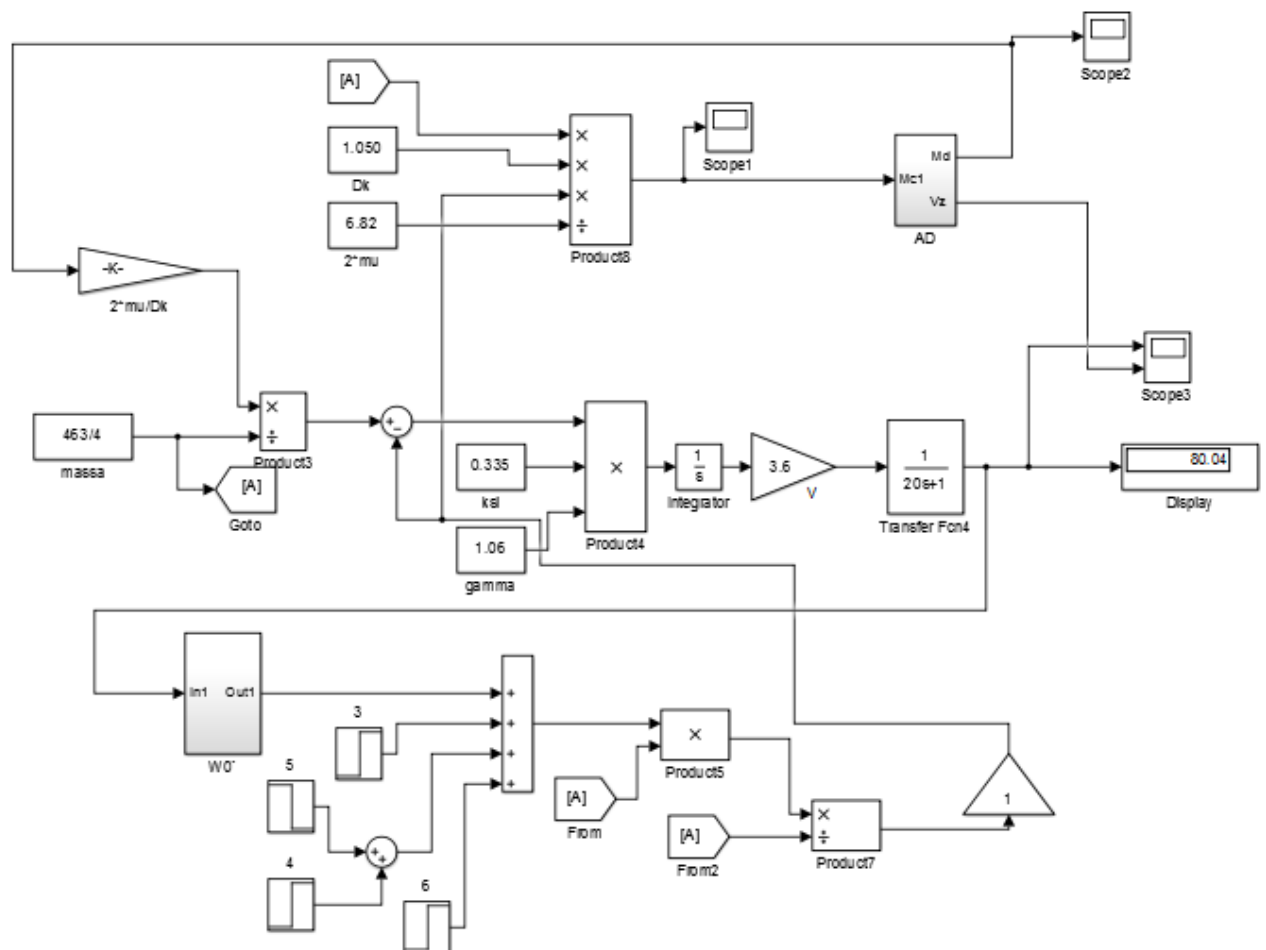


Рисунок 6.5 – Модель поїзда з асинхронним приводом

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.

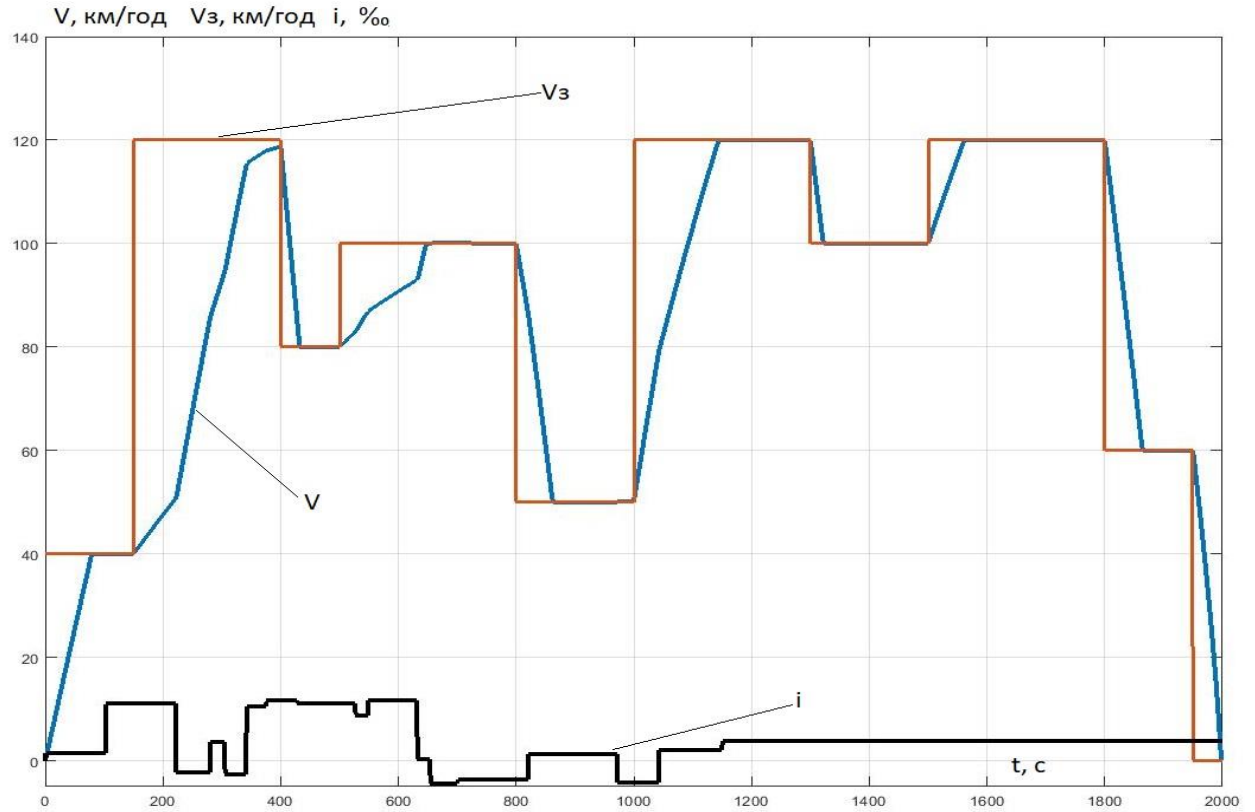


Рисунок 6.8 – Швидкість потяга на ділянці Харків – Мерефа

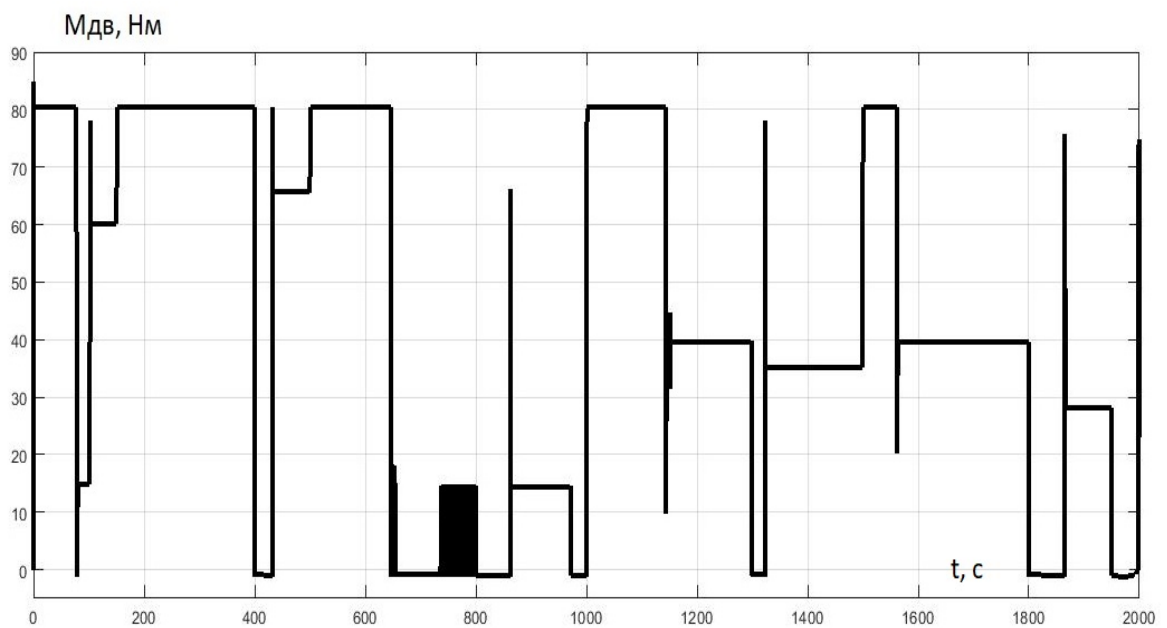


Рисунок 6.9 – Момент двигуна при русі поїзда ділянкою Харків – Мерефа

7 Визначення економічного ефекту від модернізації тягового електроприводу на електровозі постійного струму ЧС7

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 дозволяє суттєво поліпшити умови роботи ТЕД та економити електроенергію.

При модернізації буде демонтовано 8 двигунів постійного струму 1AL-4846dT, та реостатно-контакторну систему керування ними, яка складається з 16 резисторів та 32 контакторів. Замість цього буде встановлено 2 перетворювача частоти, які складаються з випрямляча та інвертора напруги та 8 тягових асинхронних двигунів НБ-914. 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-914
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 703203 грн., інвертора виробництва компанії АВВ – 1239480 грн. Вартість тягового двигуна виробництва Siemens складає 1071752 грн. Загальна вартість обладнання складе 12729381 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	703203	1406405
Інвертор напруги	2	1239480	2748960
Тяговий двигун АД-914	8	1071752	8574016
Разом			12729381

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.;

Z_M —трудові витрати на монтаж обладнання, грн

Трудові витрати на демонтаж складають

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

де m - кількість обладнання, од.;

$Z_{\text{Д}}$ —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	54,7	1	109,4	10,94	26,47	146,81
Демонтаж контактора	5	2	54,7	0,5	54,7	5,47	13,24	73,41
Демонтаж базового двигуна	5	4	54,7	4	875,2	87,52	211,8	1174,5
Монтаж випрямляча	5	3	54,7	8	1312,8	131,28	317,7	1761,8
Монтаж інвертора	5	4	54,7	8	1750,4	175,04	423,6	2349
Монтаж асинхронного двигуна	5	5	54,7	4	1094	109,4	264,75	1468,2

Підставляємо значення та отримуємо:

$$B_{\text{ДЕМОНТ.Р}} = 146,81 \cdot 16 = 2348,96 \text{ грн}$$

$$B_{\text{ДЕМОНТ.К}} = 73,41 \cdot 32 = 2349,12 \text{ грн}$$

$$B_{\text{ДЕМОНТ.Д}} = 1174,5 \cdot 8 = 9396 \text{ грн}$$

$$B_{\text{ДЕМОНТ}} = 2348,96 + 2349,12 + 9396 = 14094,08 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ.В}} = 1761,8 \cdot 2 = 3523,6 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ.ЛН}} = 2349 \cdot 2 = 4698 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ.Д}} = 1468,2 \cdot 8 = 11745,6 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ}} = 3523,6 + 4698 + 11745,6 = 19967,2 \text{ грн}$$

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	60258	2	120516
Монтаж інвертора	комплект монтажний	79955	2	159910
Монтаж асинхрон. двигуна	комплект монтажний	19627	8	157016

Загальні витрати на монтаж обладнання складають 437442 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.

$$\Delta K = 12729381 + 14094,08 + 19967,2 + 437442 = 13200884,28 \text{ грн}$$

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

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

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

T_l – повний обіг локомотива, год.

Час оберту електровозу:

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

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

$t_{\text{пр}}$ – 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 про слідування 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

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

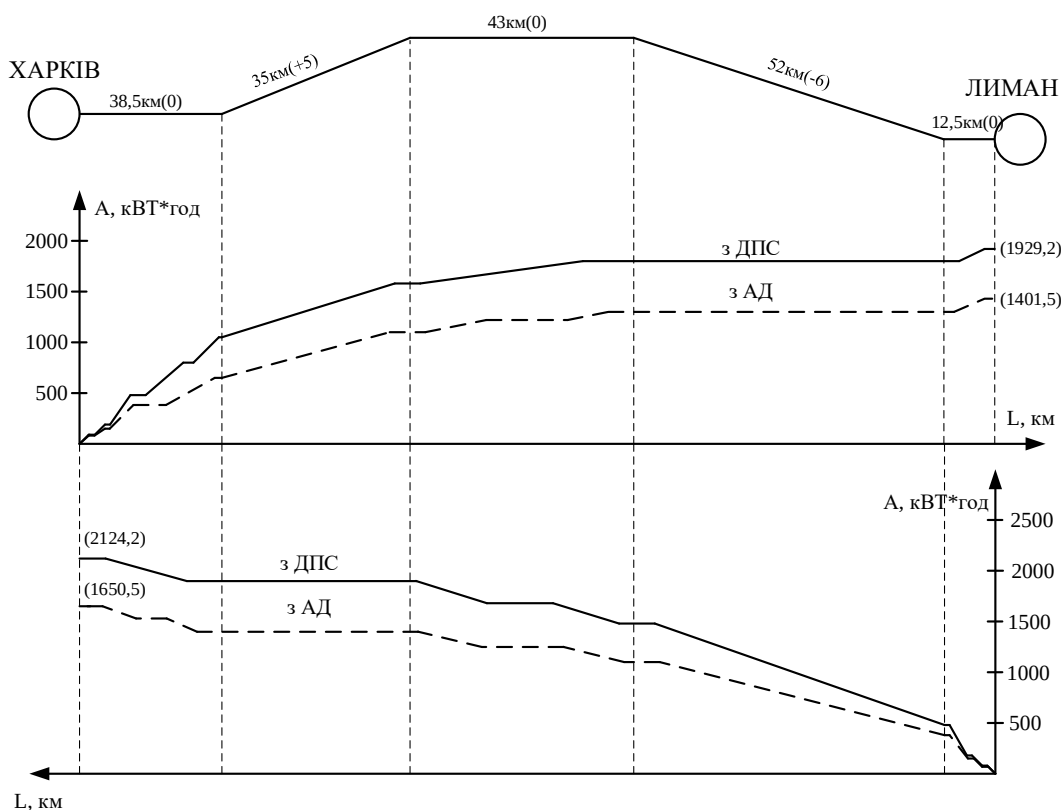


Рисунок 7.1 – Графік залежності використання електроенергії на ділянці 181 км

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.

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

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

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

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

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

Простій на ремонті за рік

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

Кількість ремонтів і-го виду за рік

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

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

$$\sum M_{\text{КР}2} = \frac{140765}{2400000} = 0,06$$

$$\sum M_{\text{КР}1} = \frac{140765}{800000} - 0,06 = 0,12$$

$$\sum M_{\text{пр}3} = \frac{140765}{400000} - 0,06 - 0,12 = 0,18$$

$$\sum M_{\text{пр}2} = \frac{140765}{200000} - 0,06 - 0,12 - 0,18 = 0,35$$

$$\sum M_{\text{пр}1} = \frac{140765}{30000} - 0,06 - 0,12 - 0,18 - 0,35 = 3,99$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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 вентиляно-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:

$$\sum M_{ТО-2} = \frac{365}{2} - \sum M_{KP2} - \sum M_{KP1} - \sum M_{mp3} - \sum M_{mp2} - \sum M_{mp1} - \sum M_{mo3}$$

$$\sum M_{TO-2} = \frac{365}{2} - 0,06 - 0,12 - 0,18 - 0,35 - 3,99 - 4,69 = 173,1$$

Час на обслуговування колекторного двигуна постійного струму при виконанні ТО-2 0,5год., а тому, при умові виконання ТО слюсарем п'ятого розряду з годинною тарифною ставкою 54,7 грн, економію коштів на виконання ТО-2 можна розрахувати за наступною формулою:

$$\Delta E_{TO-2, \text{річ}} = 173,1 \cdot 50,46 = 8734,63 \text{ грн}$$

Отже, загальна економія коштів за рік наступна:

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

$$\Delta E_{\text{річ}} = 2474349,25 + 8734,63 = 2483083,88 \text{ грн.}$$

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
	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Капітальні вкладення K_t , тис.грн.	13200									
Економія поточних витрат Δu_t , тис. грн	2483	2483	2483	2483	2483	2483	2483	2483	2483	2478,7
Економічний ефект E_t , тис.грн.	-10717	2483	2483	2483	2483	2483	2483	2483	2483	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 $E_t \cdot$ α_t	-9742,7	2052,1	1865,5	1695,9	1541,7	1401,6	1274,2	1158,3	1053	957,3
Економічний ефект наростаючим підсумком $E_1 +$ $E_2 + \dots + E_k$ тис.Г рн.	-9742,7	-7690,7	-5825,1	-4129,2	-2587,5	-1185,9	88,3	1246,6	2299,7	3257

З таблиці 7.6 видно, що за життєвий цикл обладнання у 10 років економічний ефект складе 3257000 грн., що вказує на доцільність запропонованої модернізації тягового електроприводу електровозу ЧС-7. Час повернення коштів, що пішли на капітальні затрати – 7 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. Красношاپка, 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 ескалатора 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

Розробка та дослідження тягового асинхронного електропривода для електровоза постійного струму

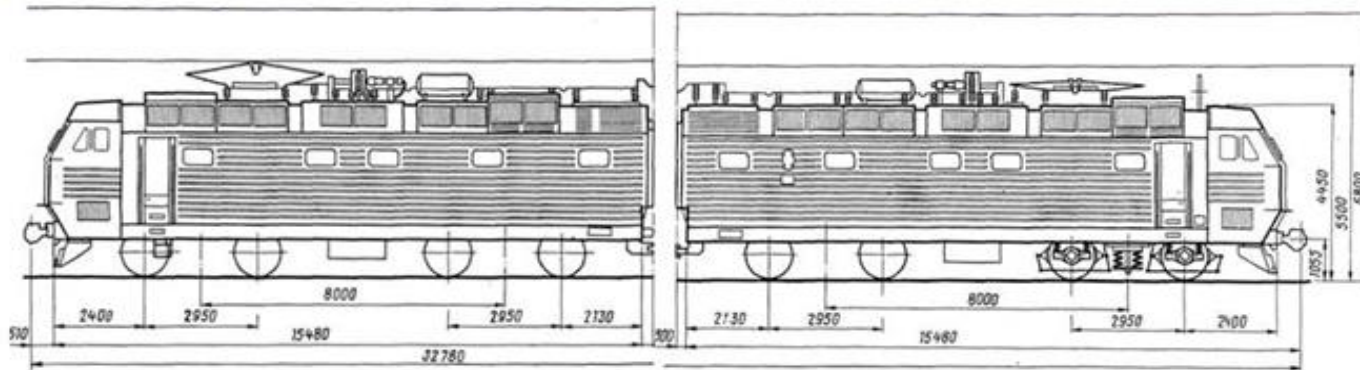


Розробив:
студент групи 214-ЕЕ-Д24
Юрій РУДЬ
Керівник:
к.т.н., доц. Артем МАСЛІЙ

- 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 1AL-4846dT

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 2 - Система рівнянь

Рисунок 1 – Загальний вигляд тягового електродвигуна

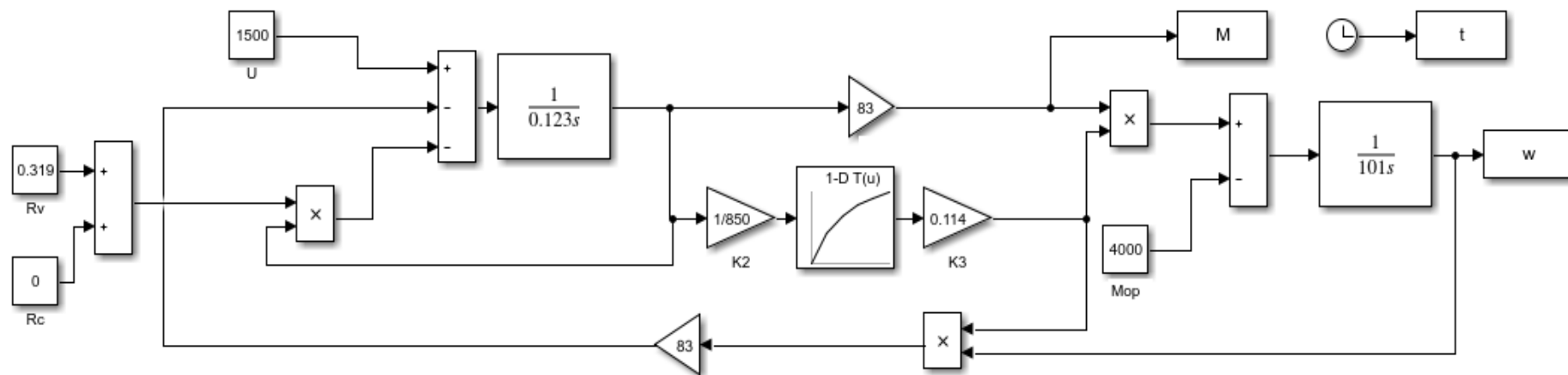
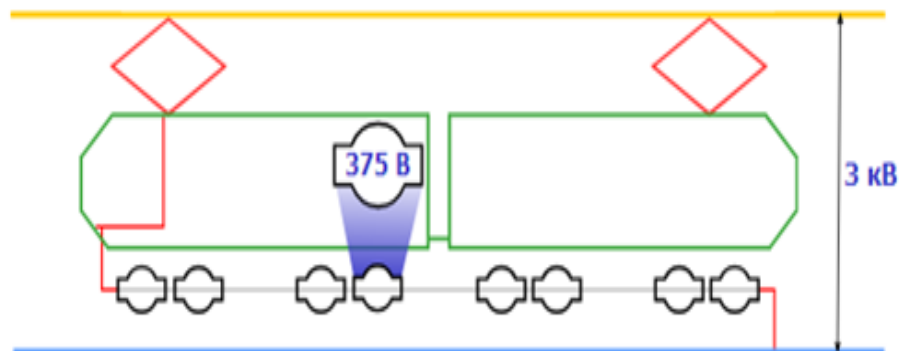


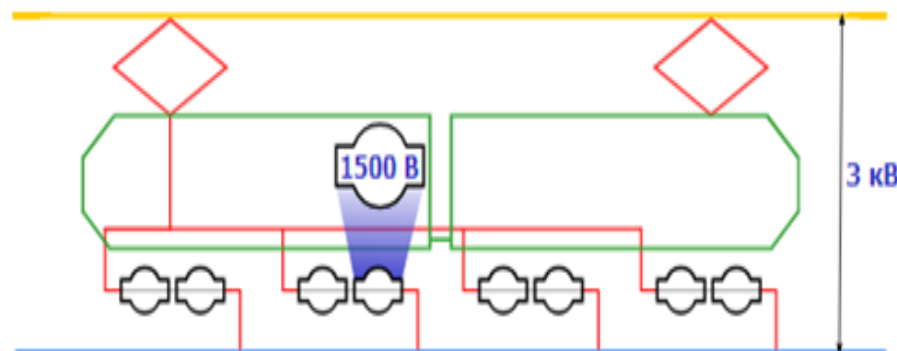
Рисунок 3 – Математичне модель

Способи регулювання швидкості електровоза ЧС7

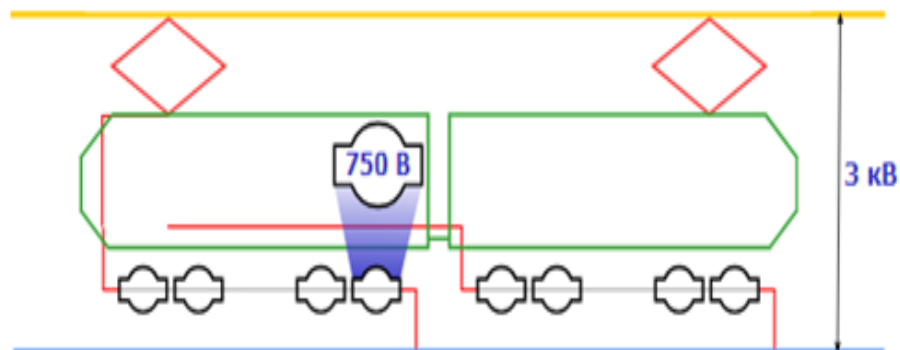
Послідовне з'єднання



Паралельне з'єднання



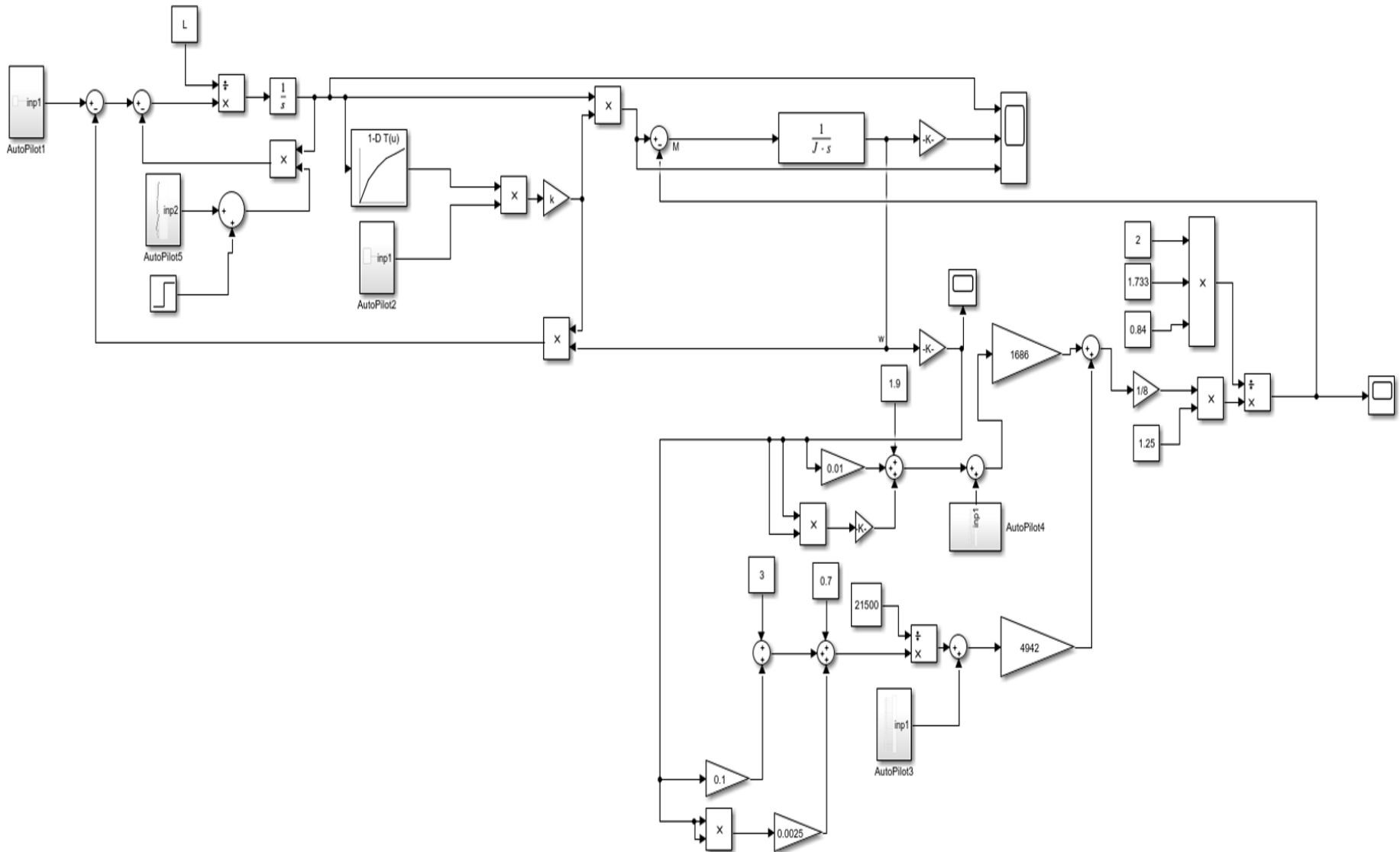
Паралельно-послідовне з'єднання



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

Математична модель поїзда з реостатно-контакторною системою керування

6



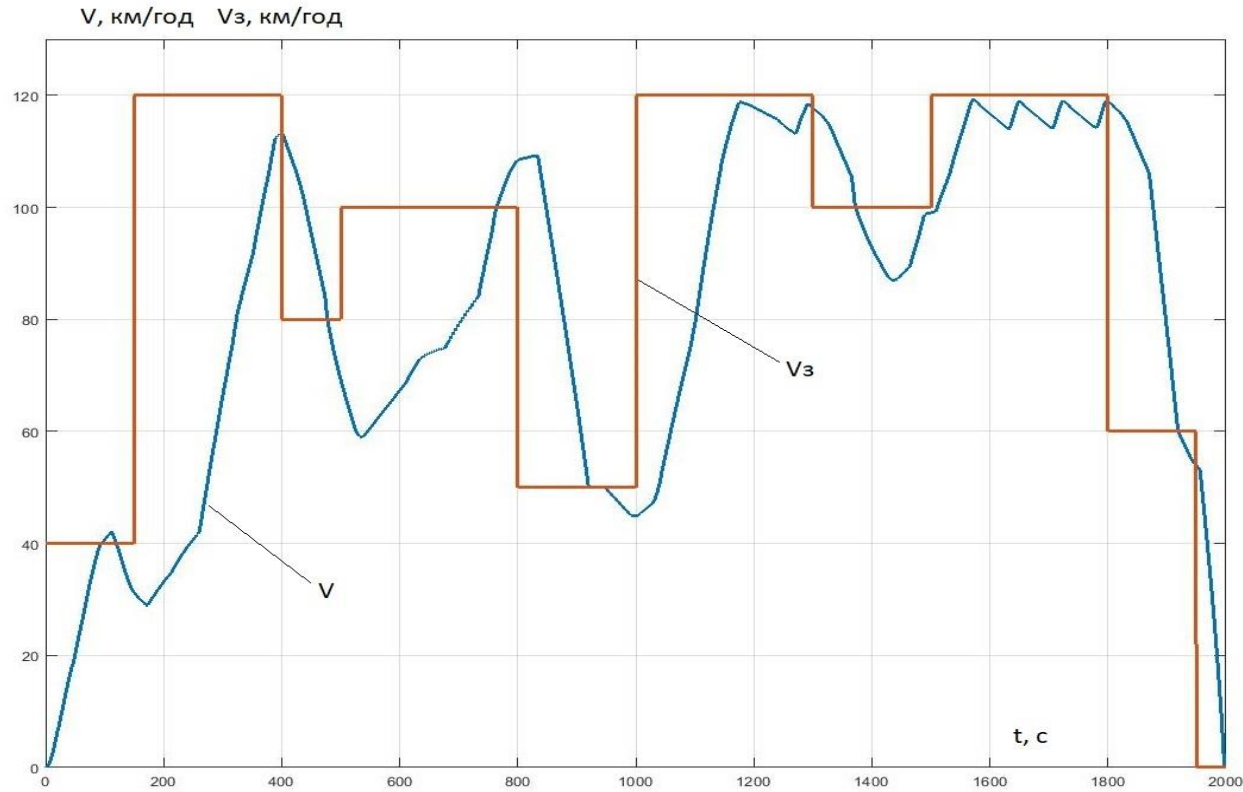


Рисунок 1 - Характеристика швидкості поїзда

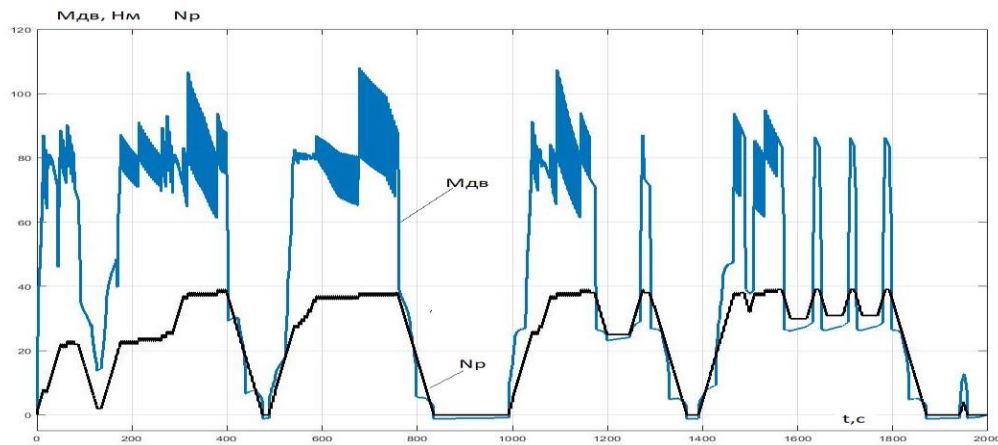


Рисунок 2 - Характеристика тягового моменту

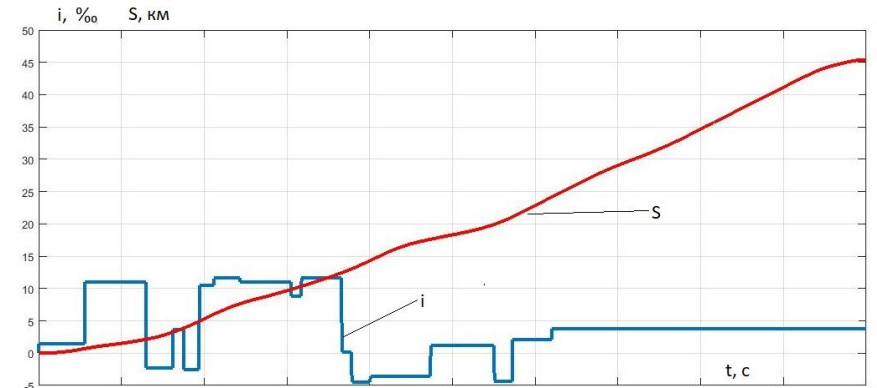


Рисунок 3 - Характеристика переміщення поїзда то профіль шляху

Математичне моделювання руху поїзда із системою підлеглого керування

8

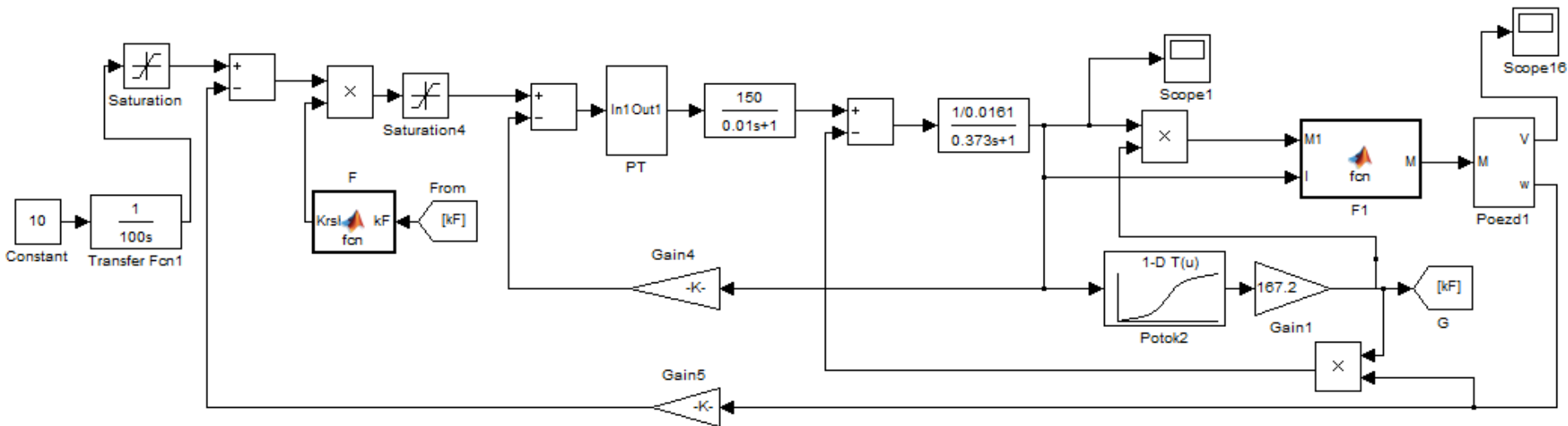


Рисунок 1 – Імітаційна модель руху поїзда із системою підлеглого керування

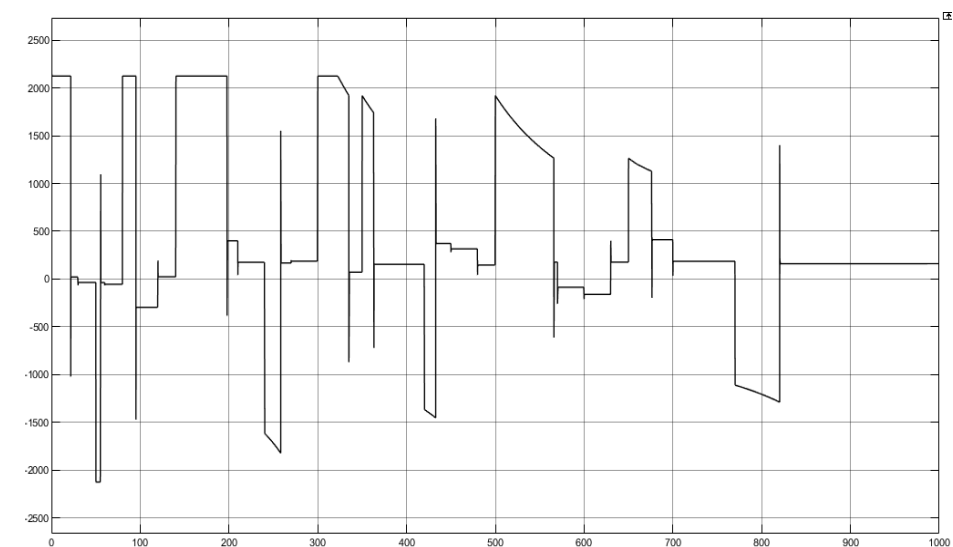


Рисунок 2 – Момент на валу тягового двигуна

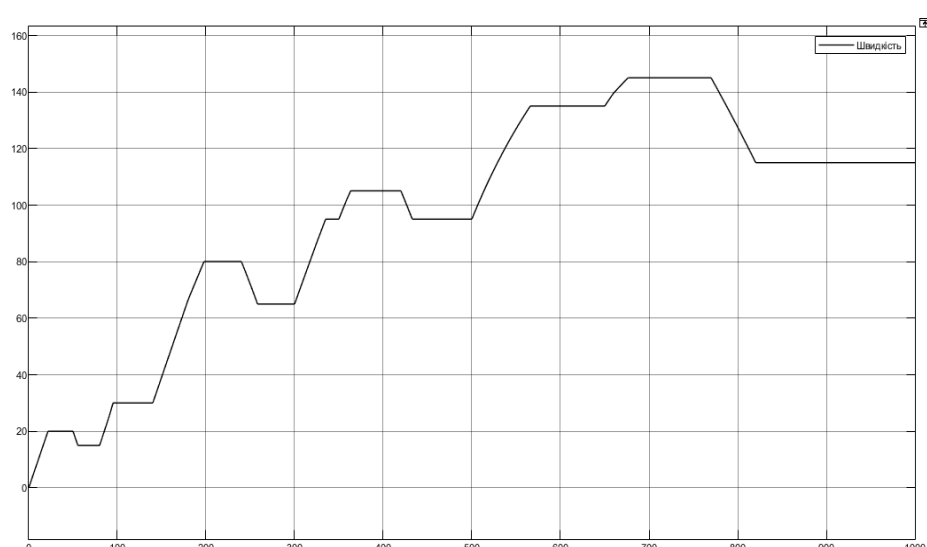


Рисунок 3 – Швидкість руху поїзда

Моделювання тягового асинхронного двигуна НБ-607 ⁹

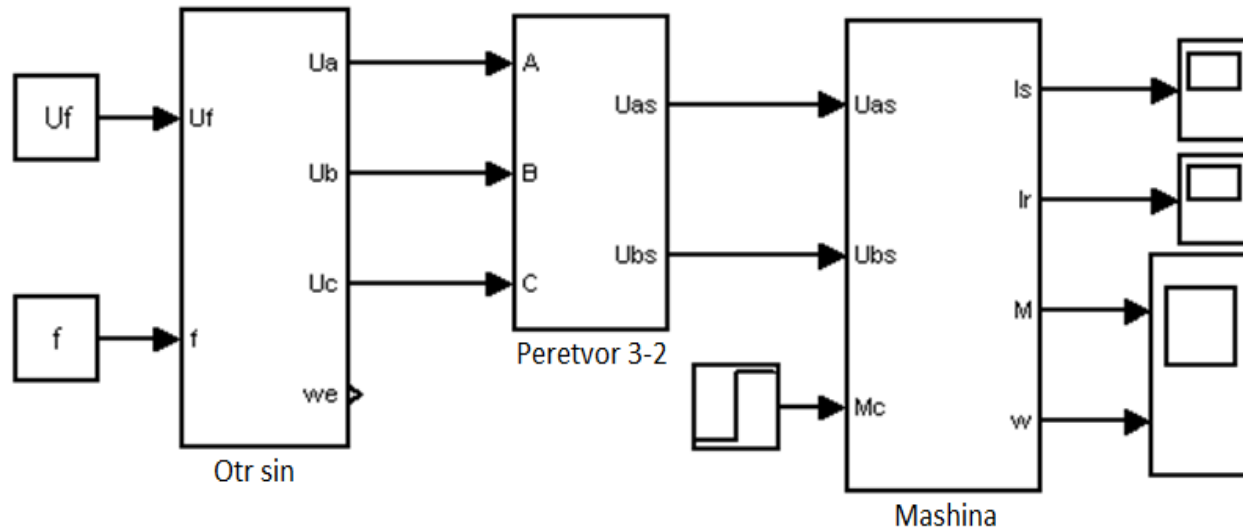


Рисунок 1 – Осцилограма швидкості обертання асинхронного двигуна

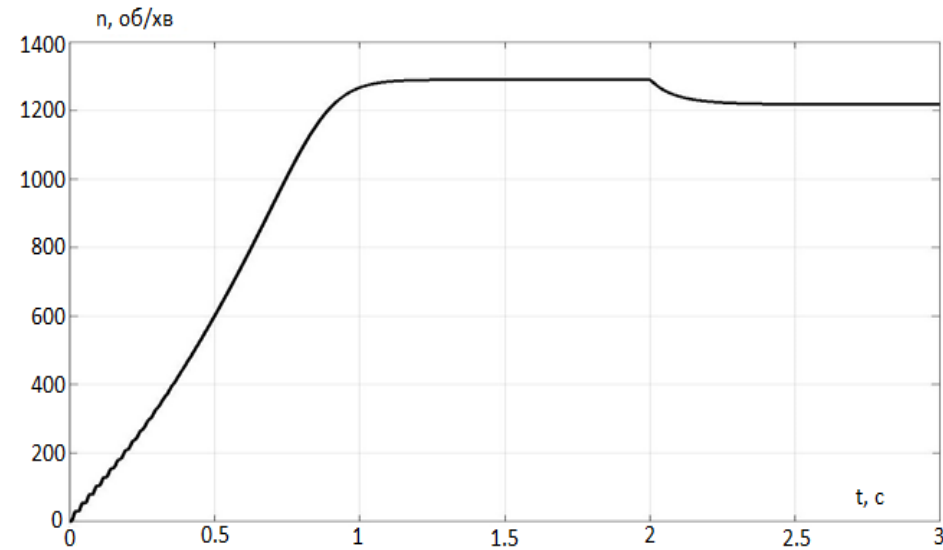


Рисунок 2 – Осцилограма швидкості обертання асинхронного двигуна

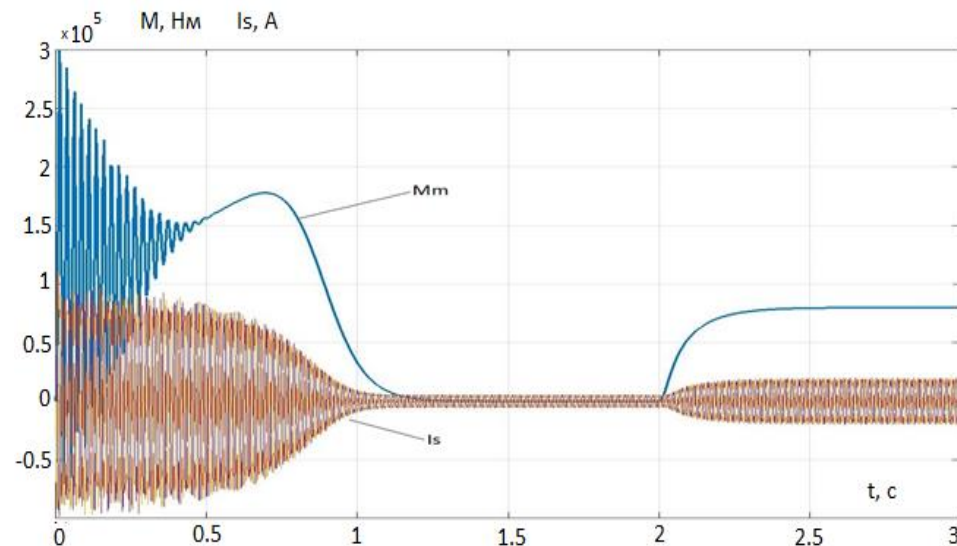
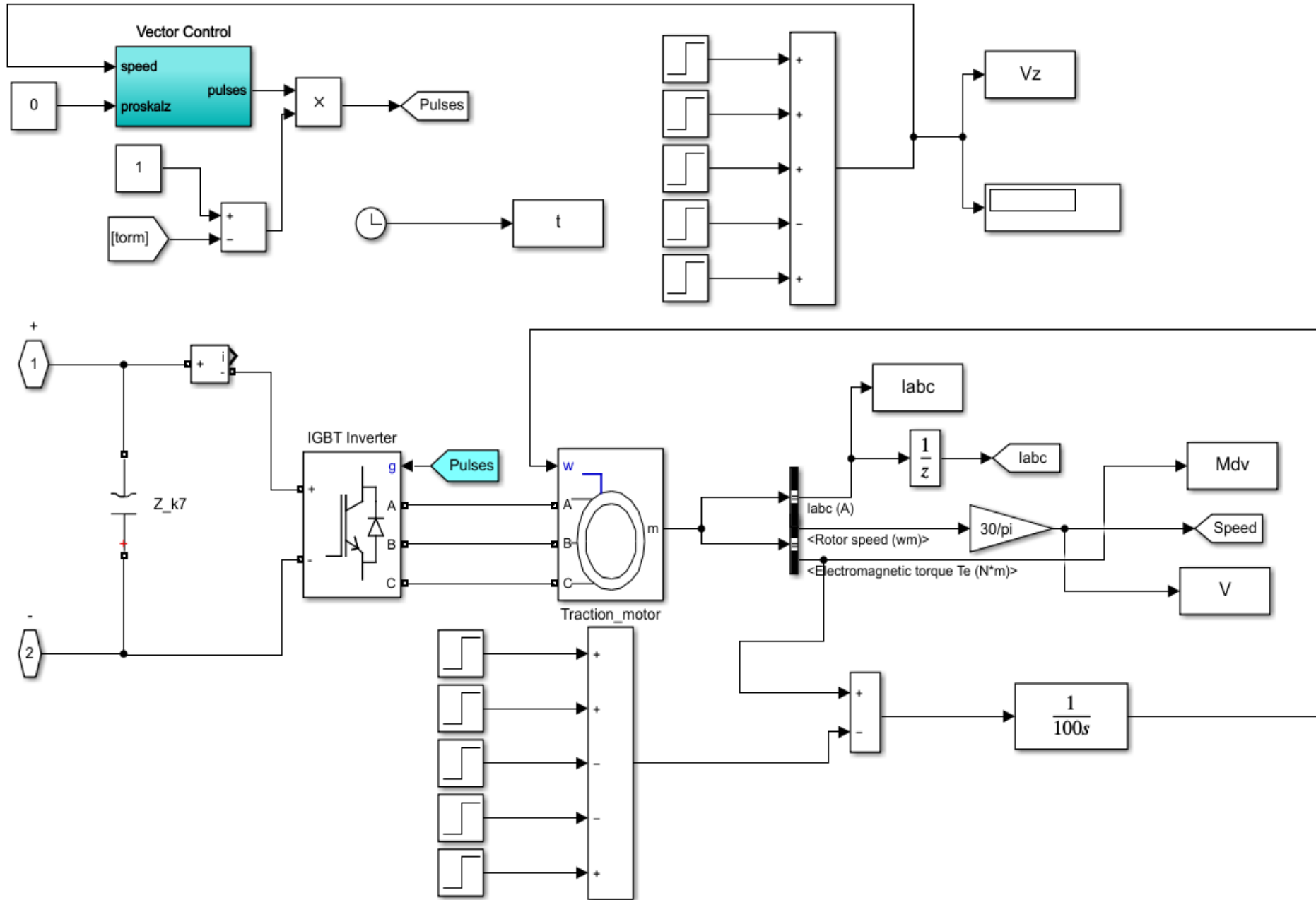


Рисунок 3 – Осцилограма статормого струму та моменту асинхронного двигуна

Моделювання асинхронного привода з векторним керуванням 10



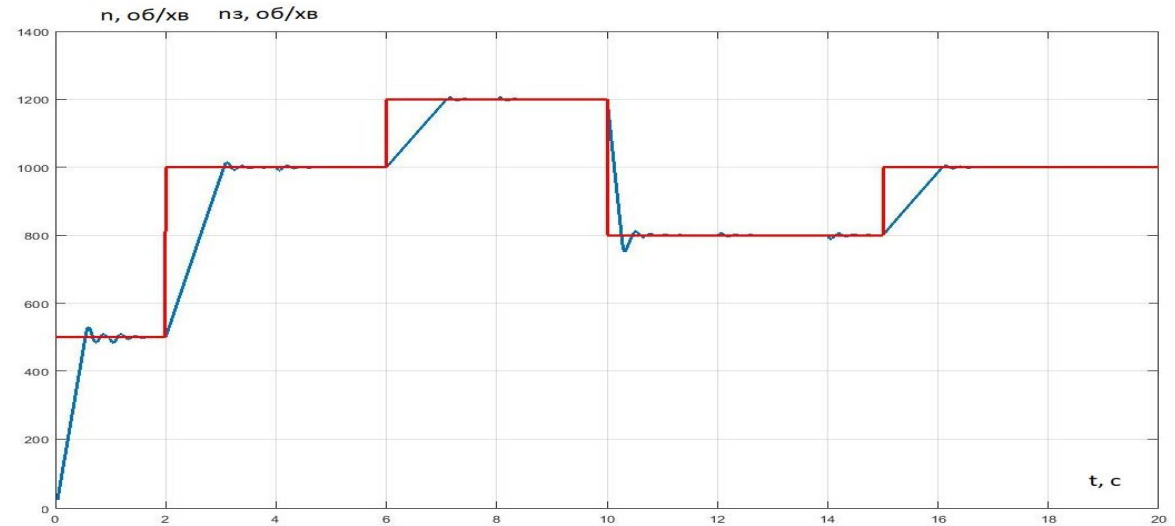


Рисунок 1 – Осцилограма швидкості асинхронного двигуна при векторному керуванні

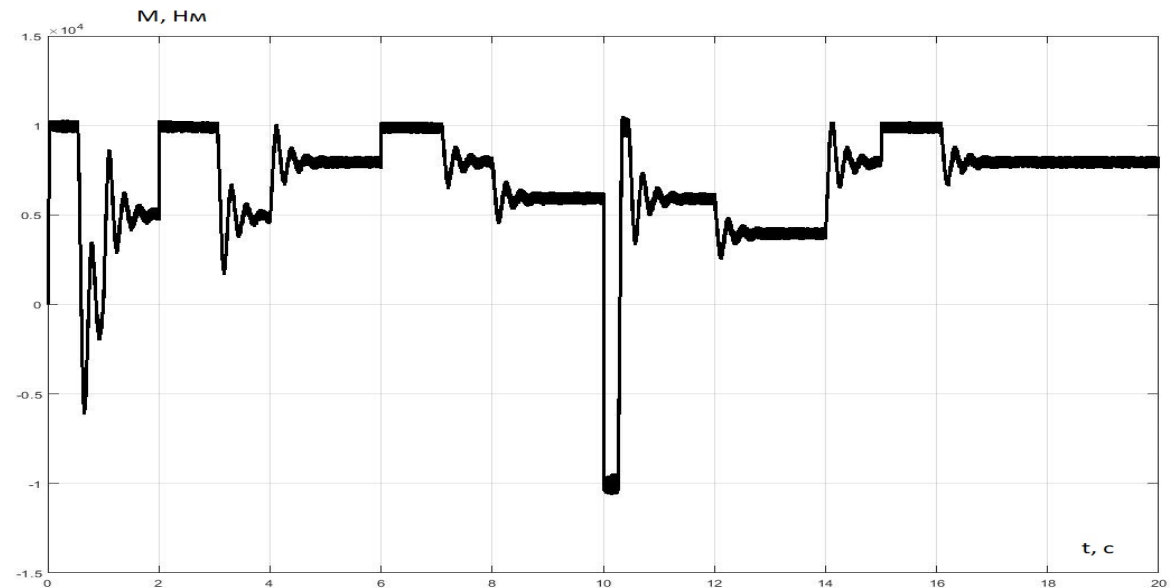
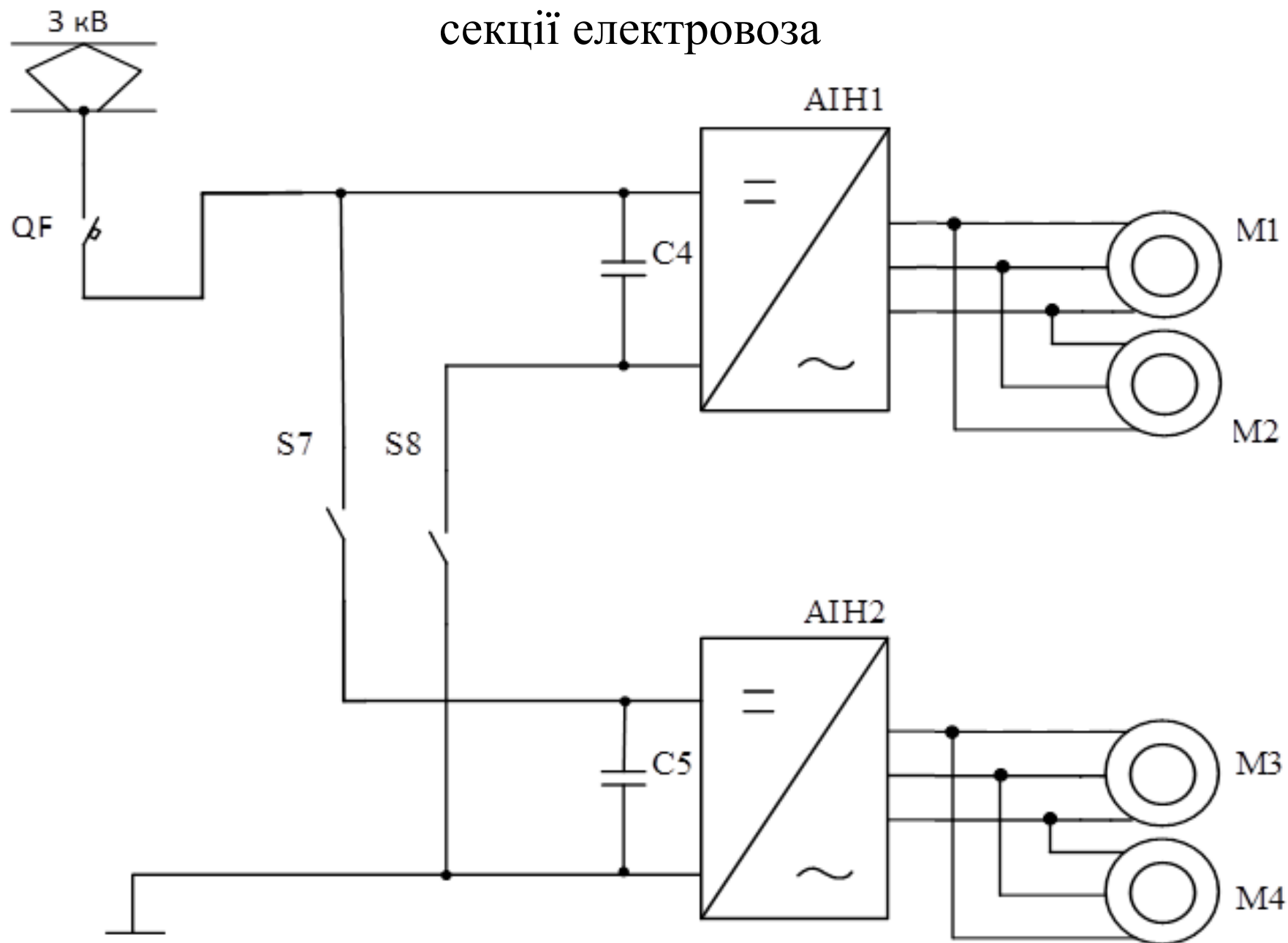


Рисунок 2 – Осцилограма моменту асинхронного двигуна при векторному керуванні

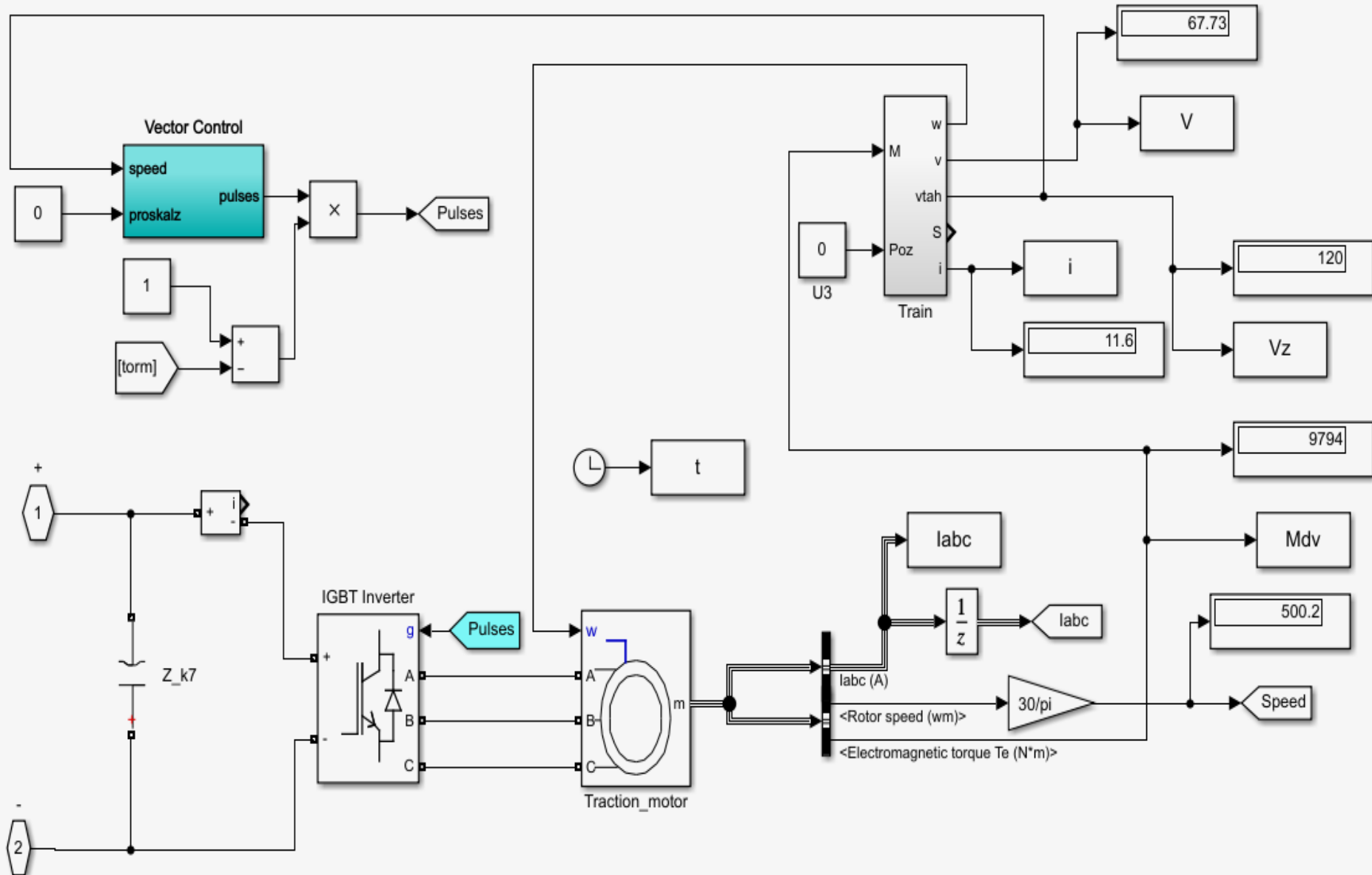
Функціональна схема тягового електропривода однієї секції електровоза

12



Математична модель роботи модернізованого електровоза з поїздом

13



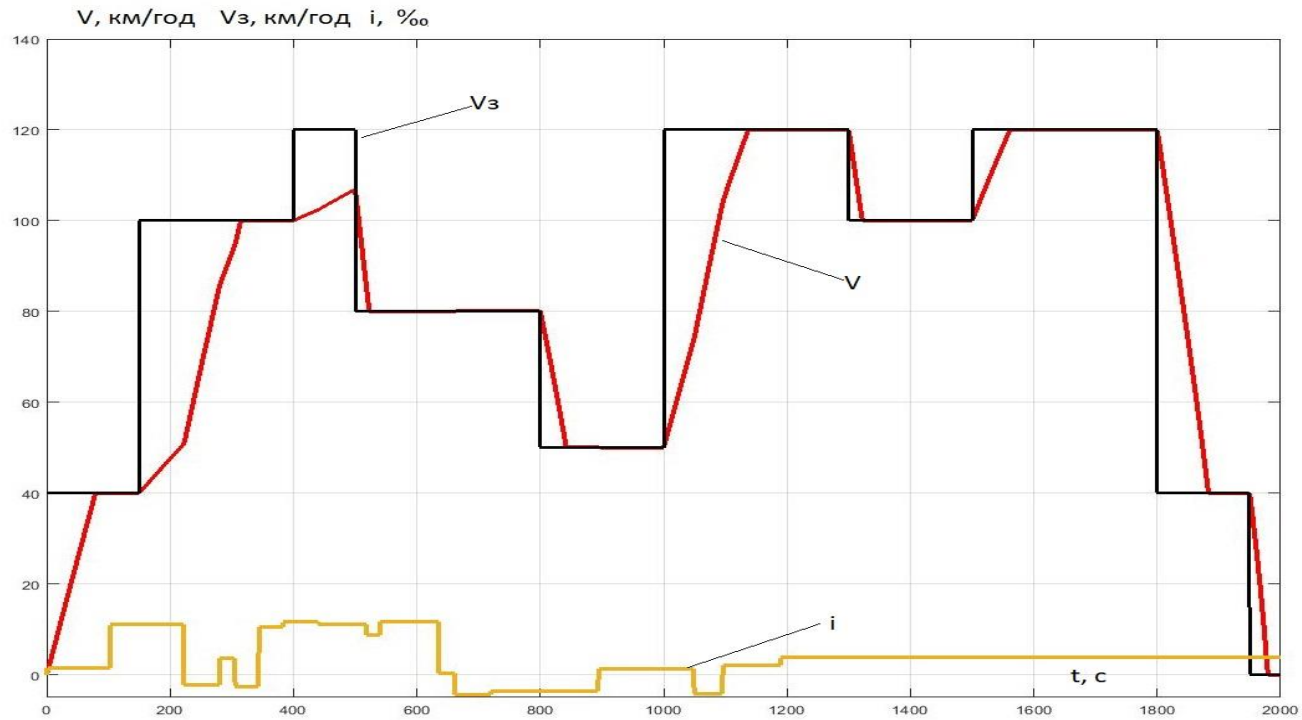


Рисунок 1 – Швидкість потяга з асинхронним приводом при векторному керуванні

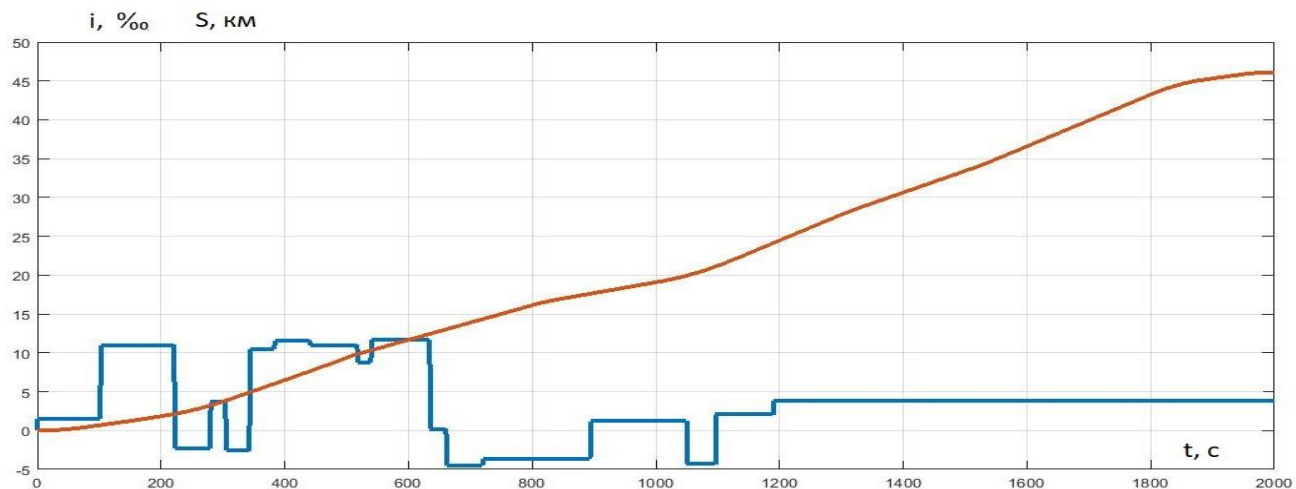


Рисунок 2 – Переміщення потяга та профіль шляху

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 – 7 років.