

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

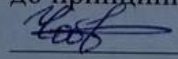
ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОВОЗУ ЧС8 З АСИНХРОННИМ
ПРИВОДОМ

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

КРМ.273.8.04.24.01 ПЗ

Розробив: студент групи 214-ЕЕ-323
спеціальності 273 «Залізничний транспорт»
освітньої програми «Електровози та
електропоїзди»

(роботу виконано самостійно, відповідно
до принципів академічної доброчесності)

 ЧОБІТЬКО Олександр

Керівник: к.т.н., доцент
Артем МАСЛІЙ

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

Харків – 2024

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет: механіко-енергетичний

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

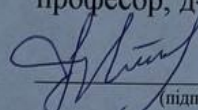
Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

Освітня програма: «Електровози та електропоїзди»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук


Михайло БАБАЄВ
(підпис)

«__» _____ 2024 р.

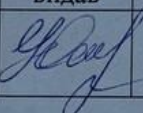
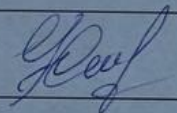
**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Чобітька Олександра Сергійовича

- 1 Тема «Дослідження роботи електровозу ЧС8 з асинхронним приводом», керівник Маслій Артем Сергійович, к.т.н., доцент, затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету від 30 вересня 2024 року № 8/24.
- 2 Строк подання студентом закінченої роботи 03 січня 2025 року.
- 3 Вихідні дані: електровоз змінного струму ЧС8, колекторний двигун постійного струму, асинхронний двигун НБ-607, частотний перетворювач, векторна система керування.
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки
Зміст розрахунково-пояснювальної записки
 - 1) Загальні відомості про електровоз
 - 2) Математичне моделювання потяга з двигунами постійного струму
 - 3) Асинхронні двигуни та їх математичне моделювання
 - 4) Вибір та моделювання роботи частотного перетворювача
 - 5) Математичне моделювання роботи потяга з модернізованим електровозом
 - 6) Визначення економічного ефекту від запровадження асинхронних двигунів на електровозі змінного струму
- 5 Перелік графічного матеріалу
 - 1) Загальний вид електровозу ЧС-8 – один слайд (формат А4).

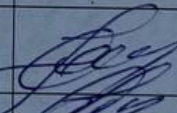
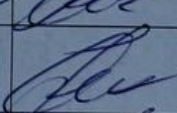
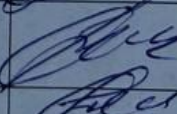
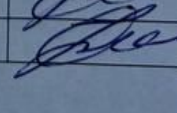
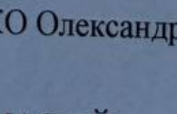
- 2) Математична модель електропривода постійного струму – один слайд (формат А4).
- 3) Математична модель поїзда та результати моделювання – один слайд (формат А4).
- 4) Моделювання тягового асинхронного двигуна НБ-607 – один слайд (формат А4).
- 5) Моделювання асинхронного привода з векторним керуванням – два слайда (формат А4).
- 6) Функціональна схема модернізованого тягового електропривода – один слайд (формат А4).
- 7) Моделювання руху поїзда з асинхронним приводом – два слайди (формат А4).
- 8) Висновки до роботи – один слайд (формат А4).

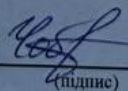
6 Консультанти окремих розділів

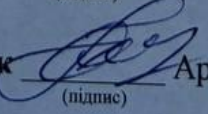
Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М., доцент, канд. екон. наук		

7 Дата видачі завдання: 02 жовтня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент  ЧОБИТЬКО Олександр
(підпис)

Керівник  Артем МАСЛІЙ
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 102 аркуші пояснювальної записки формату А4, у тому числі 75 рисунки, 5 таблиць, 12 літературних джерел.

Ключові слова: електровоз змінного струму, векторна система керування, тяговий асинхронний двигун, частотний перетворювач.

Об'єктом дослідження є модернізований тяговий електропривод та система керування електровозу ЧС8.

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

У кваліфікаційній роботі розглянуто можливість модернізації електровозу постійного струму ЧС8 з тяговим електроприводом постійного струму. Для підвищення надійності системи запропоновано замінити двигуни постійного струму на частотнорегульовані асинхронні. Була обрана схема живлення двигунів та розраховані параметри інвертора. Для асинхронного тягового електроприводу була обрана система керування на основі векторного керування. У останньому розділі був розрахований економічний ефект від впровадження запропонованої системи.

ABSTRACT

This qualification paper includes 102 sheets of A4 explanatory note, including 54 pictures, 5 tables, 12 literary sources.

Keywords: electric locomotive, vector control system, traction asynchronous motor, frequency converter

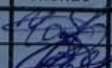
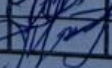
The object of research are modernized control system of electric traction electric locomotive ChS8.

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

In the qualification work the possibility of modernization of the electric current of the ChS8 with a traction electric drive of a direct current is considered. To increase the reliability of the system, it is proposed to replace DC motors with frequency-regulated asynchronous ones. The engine power scheme and calculated parameters of the inverter were selected. For an asynchronous traction electric drive, a control system was chosen based on the vector control. In the last section the economic effect from the introduction of the proposed system was calculated.

Зміст

Вступ	7
1 Загальні відомості про електровоз	10
1.1 Призначення та технічна характеристика електровозу	10
1.2 Механічна частина	11
1.3 Силова схема електровозу	13
2 Математичне моделювання потяга з двигунами постійного струму	16
2.1 Статистичні характеристики двигуна з послідовним збудженням	16
2.2 Розрахунки та побудова математичної моделі	21
2.3 Математичне моделювання руху поїзда	28
3 Асинхронні двигуни та їх математичне моделювання	43
3.1 Будова та принцип дії асинхронного електродвигуна	43
3.2 Обмотки ротора	44
3.3 Загальні механічні характеристики асинхронних електродвигунів	45
3.4 Математичне моделювання асинхронного двигуна НБ-607	46
4 Вибір та моделювання роботи частотного перетворювача	63
4.1 Вибір та обґрунтування силової схеми тягового електропривода	63
4.2 Вибір та обґрунтування схеми автономного інвертора напруги	65
5 Математичне моделювання роботи потяга з модернізованим електровозом	80
6 Визначення економічного ефекту від запровадження асинхронних двигунів на електровозі змінного струму	89
Висновки	100
Список використаних джерел	101
Додаток	102

					КРМ.273.8.04.24.01 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Чобітько			Дослідження роботи електровозу ЧС8 з асинхронним приводом	Літ.	Арк.
Перевір.		Маслій					Аркушів
Рецензент		Обозний				6	102
Н. Контр.		Маслій				УкрДУЗТ кафедра ЕТЕМ	
Затверд.		Бабасєв					

Вступ

Історія залізниць України бере свій початок в 1861 році, коли з Відня до Львова прибув перший пасажирський поїзд. Сьогодні залізничному транспорту належить провідна роль в транспортній системі країни. Вона має найважливіше державне, народногосподарське і оборонне значення. Від залізниць потрібне своєчасне і повне задоволення потреб населення і народного господарства в перевезеннях. Будь-яка навіть короточасна затримка виконання заявки на перевезення завдає збитку нормальній роботі підприємств, підриває договірні основи господарювання. Питома вага залізничного транспорту в загальному вантажообігу складає близько 85%, а в пасажирообороті – 45%.

До складу залізниць України входять 1340 залізничних станцій, 129 пасажирських вокзалів, 57 локомотивних депо, 48 вагонних депо. На залізничному транспорті працюють більше 350 тис. чол., що складає близько 2% всього працездатного населення України. Сьогодні українські залізниці безпосередньо граничать і взаємодіють із залізницями Білорусі, Молдови, Польщі, Румунії, Словаччини, Угорщини, забезпечують роботу по 40 міжнародним залізничним переходам, а також обслуговують 18 українських морських портів Чорноморсько-азовського басейну. Загальна довжина мережі залізниць України складає 22 тис. км., зокрема протяжність міжнародних транспортних коридорів по території України – 3,2 тис. км.

У розпорядженні Укрзалізниці більше 137 тис. вантажних вагонів, більше 7,5 тис. пасажирських вагонів, близько 4,3 тис. локомотивів. По об'ємах вантажів, що перевозяться, українські залізниці займають четверте місце на Євразійському континенті (після Китаю і Індії) і шосте місце в світі. Інфраструктура коридорів, що проходять по території України, дозволяє забезпечити пропуск існуючих і перспективних вантажопотоків. Послугами залізничного транспорту скористалися 518,8 млн. пасажирів.

Транспорт вслід за добувною промисловістю, землеробством і оброблювальною промисловістю є сферою матеріального виробництва. На відміну

від інших галузей промисловості транспорт не виробляє нових продуктів. Продукцією транспорту є само переміщення, саме перевезення пасажирів і вантажів. Залізниці зв'язують в єдине ціле всі області і райони країни, забезпечують потреби населення в перевезеннях і нормальний оборот продуктів промисловості і сільського господарства. У цьому величезне державне і народногосподарське значення залізничного транспорту.

Залізничний транспорт найбільш пристосований до масових перевезень, функціонує вдень і вночі незалежно від пори року і атмосферних умов. Залізниці приносять життя в труднодоступні місцевості, допомагають освоїти природні багатства.

По розмірах вантажообігу залізничний транспорт займає перше місце. На залізницях порівняно невелика собівартість перевезень і висока швидкість доставки вантажів. За останні роки швидкість руху вантажних і пасажирських поїздів значно збільшилася, швидкість експресів досягає 140км/ч.

Залізниці є універсальним видом транспорту для перевезень всіх видів вантажів в міжрайонних і у внутрішньо районних сполученнях. Проте будівництво залізниць вимагає великих капітальних вкладень, залежних від топографічних, кліматичних і екологічних умов.

На залізничному транспорті є висока частка витрат, що не залежить від довжини руху (ремонт будівель і інших пристроїв, склад адміністративно-технічного персоналу). Вона складає близько половини загальних витрат по експлуатації. Все це визначає ефективність застосування залізниць при значній концентрації вантажних потоків.

Перевезення вантажів по залізниці на відносно великі відстані економічно вигідніше ніж на малих, що пояснюється високою питомою вагою витрат, що не залежних від дальності перевезень і здорожують собівартість їх на коротких відстанях. Сюди відносяться витрати на початкові і кінцеві операції, включаючи подачу вагонів до місць вантаження вивантаження і прибирання їх, виконання вантажних операцій і ін.

Залізниці в порівнянні з іншими видами транспорту у меншій мірі впливають на навколишнє середовище і мають меншу енергоємність перевізної роботи.

Проте в даний час тяговий рухомий склад (ТРС) залізниць України не справляється із зростанням транспортної складової українських товаровиробників і транзитної складової вантажообігу інших країн. Це в першу чергу пов'язано з великим зносом ТРС, що вимагає корінного оновлення локомотивного парку залізниць України.

Одним із головних напрямів вирішення цієї проблеми полягає в створенні нових досконаліших локомотивів підвищеної потужності та експлуатаційною швидкістю до 160 км/ч. Основний напрям вдосконалення ТРС на Україні – це створення ТРС з тяговими електродвигунами постійного струму з послідовним збудженням (магістральний вантажний електровоз 2ЕЛ5, електропоїзди ЕПЛ, пасажирський тепловоз ТЕП150 виробництва «Луганськтепловоз»). Проте даний тип тягового електроприводу по рівнянню з безколекторним електроприводом має низькі показники, як в ремонті, так і в експлуатації.

ТРС наступного покоління повинен допомогти залізницям укріпити їх позиції в конкурентній боротьбі з іншими видами транспорту. Для цього він повинен бути економнішим. В даний час економічність рухомого складу визначають не тільки капітальні вкладення в його створення, але і загальні витрати при його експлуатації.

1 Загальні відомості про електровоз

1.1 Призначення та технічна характеристика електровозу

Електровози ЧС8 призначені для роботи з пасажирськими поїздами на магістральних залізницях, електрифікованих на змінному струмі (25 000 В, 50 Гц). Все устаткування цих електровозів розраховане на надійну роботу при напрузі в контактній мережі від 19 до 29 кВ, а також при зміні температури навколишнього середовища поза кузовом електровоза від - 50 до +40°C.

Основні технічні дані електровоза:

Напруга	25 000 В
Формула ходової частини	2(2 ₀ -2 ₀)
Колія	1524 мм
Передаточне відношення	1:2,64
Потужність годинного режиму на валах тягових двигунів	5100 кВт
Потужність тривалого режиму на валах тягових двигунів	4920 кВт
Сила тяги в годинному режимі	17,4 тс
Сила тяги тривалому режимі	16,8 тс
Швидкість у годинному режимі	107,1 км/год
Швидкість у тривалому режимі	109,1 км/год
Конструкційна швидкість	160 км/год
Вага електровоза з 2/3 запасу піску	123 т±2%
Тиск осі на рейку	20,5 т ± 2%
Висота осі автозчеплення від головки рейки при нових бандажах	1080 мм
Висота від головки рейки до робочої поверхні полоза струмоприймача:	
в опущеному положенні	5240 мм
у робочому положенні	5500—6800 мм
Діаметр коліс по колу катання	1250 мм

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

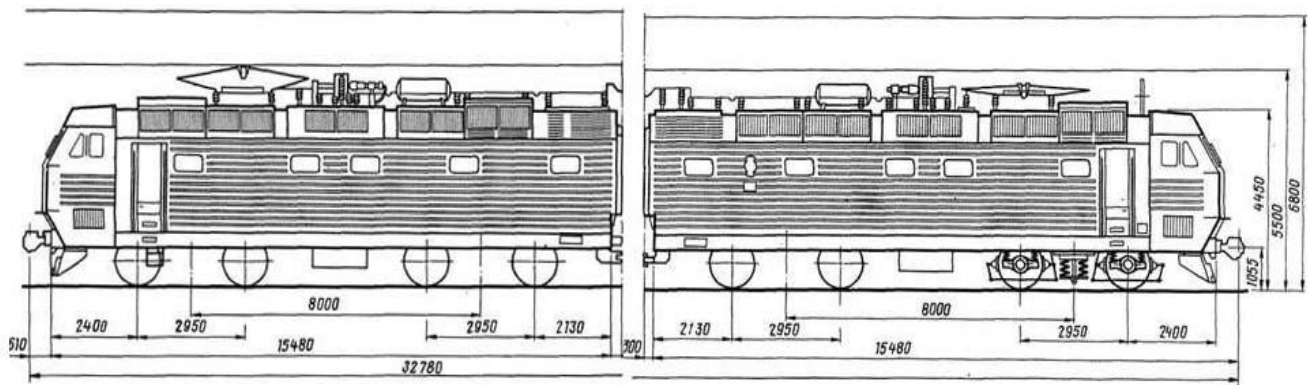


Рисунок 1.1 – Загальний вид електровозу ЧС-8.

1.2 Механічна частина

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

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

1.2.1 Візок

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

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

Для передачі обертаючого моменту з вала якоря тягового двигуна на ведучі колеса застосовується однобічна прямозуба зубчаста передача. Передача моменту від валу тягового двигуна до малої шестерні здійснюється приводом спеціальної

конструкції, що забезпечує компенсацію зміни відстані між віссю колісної пари і валом тягового двигуна при русі електровоза.

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

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

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

1.2.2 Кузов

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

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

балки, які сполучені зваркою з боковинами рами кузова.

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

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

1.3 Силова схема електровозу

Силова схема електровозу складається з головного вимикача, високовольного розрядника, тягового трансформатора, перемикача ступенів трансформатора, полу провідникового перетворювача, тягових двигунів та допоміжних машин.

1.3.1 Тяговий трансформатор

Тяговий трансформатор SL-66/3749/54 складається з активної частини магнітопроводу з обмотками, поміщених в бак, який в верхній частині закритий кришкою з гумовою підкладкою. Бак спирається на раму кузова плитою з ребрами. Всі обмотки трансформатора – регульовальна, первинна, вторинна, власних потреб та опалення потяга – розміщені на загальному трьох стержневому магнітопроводі. На

кришці бака трансформатора установлені високовольтні прохідні ізолятори, шинні вводи вторинних обмоток, газове реле, на боковій стінці – прохідні ізолятори власних потреб та опалення потяга. До бака трансформатора кріпиться перемикач ступенів.

1.3.2 Випрямна установка

На електровозі є дві конструктивно однакові випрямні установки типу RV10, кожна із яких включає в себе одну тягову та одну допоміжну випрямні установки. Тягова випрямна установка представляє собою однофазний міст, в плече якого входить 20 паралельних віток, які складаються із чотирьох паралельно з'єднаних кременевих вентилів. Таким чином, в одному плечі знаходиться 80, а в усій тяговій випрямній установці 320 вентилів. Використані вентиля типу VK 200/5, у яких номінальна амплітудна зворотна напруга – 500 В, а номінальний прямий струм – 200А. Всі паралельно ввімкнені вентиля електрично з'єднані між собою малоомними резисторами зв'язку.

1.3.3 Тяговий електродвигун

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

Тяговий двигун типа AL4442nP складається з остову, якоря, шести головних полюсів, шести додаткових полюсів, траверси, шести щіткотримачів, двох підшипникових щитів з підшипниками і карданного приводу. Остов є магнітопроводом електродвигуна і служить для зміцнення на ньому головних і додаткових полюсів, траверси і підшипникових щитів. Остов тягового двигуна відлитий із спеціальної сталі з високою механічною міцністю і хорошими магнітними властивостями. Внутрішня і зовнішня поверхні основної частини остову мають циліндрову форму; перетин її 370 см². У верхній частині остову з боку колектора розташований прямокутний

вентиляційний люк для приводу повітря, що охолоджує. Для огляду колектора і щіткового апарату передбачено два люки. До внутрішньої поверхні остову кріплять головні і додаткові полюси.

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

Додаткові полюси служать для створення додаткового магнітного поля в комутаційній зоні. Суцільні осердя додаткових полюсів виготовлені з електротехнічної сталі і кріпляться до остову двома шпильками. Котушка намотана на ребро із смугової міді перетином 7×32 мм і має 10 витків.

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

2 Математичне моделювання потяга з двигунами постійного струму

2.1 Статистичні характеристики двигуна з послідовним збудженням

Як було сказано в попередніх розділах на електровозі ЧС-8 встановлений двигун постійного струму послідовного збудження, а тому більш детально розглянемо цей тип двигуна. Його функціональна електромеханічна та електрична схеми представлені на рисунку 2.1.

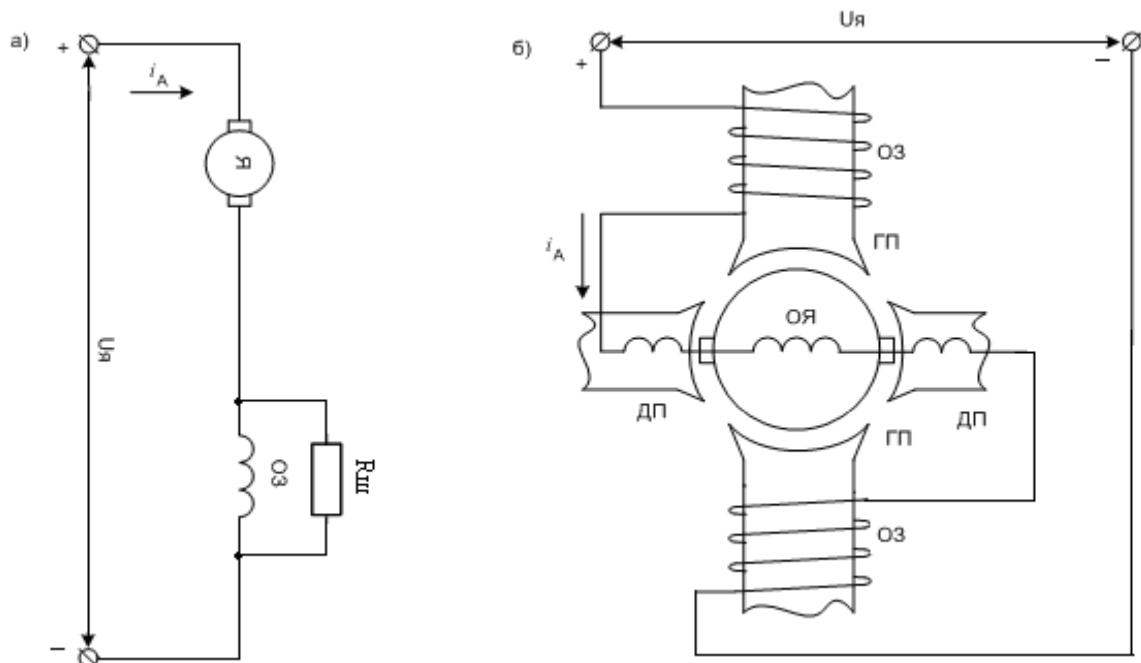


Рисунок 2.1 – Спрощена електрична схема двигуна постійного струму з послідовним збудженням (а) та з'єднання обмоток узагальненої машини (б)

При прийнятій апроксимації кривої намагнічування (крива 2 на рисунку 2.2) механічна характеристика двигуна може бути представлена наступною формулою:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \Phi(I_{\text{я}})} - \frac{MR_{\text{я}} \Sigma}{\kappa^2 (\Phi(I_{\text{я}}))^2}, \quad (2.1)$$

та електромеханічна:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \Phi(I_{\text{я}})} - \frac{I_{\text{я}} R_{\Sigma}}{\kappa \Phi(I_{\text{я}})}, \quad (2.2)$$

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 – електромеханічний момент двигуна;

$\Phi(I_{\text{я}})$ – магнітний потік двигуна;

κ – конструкційний коефіцієнт двигуна.

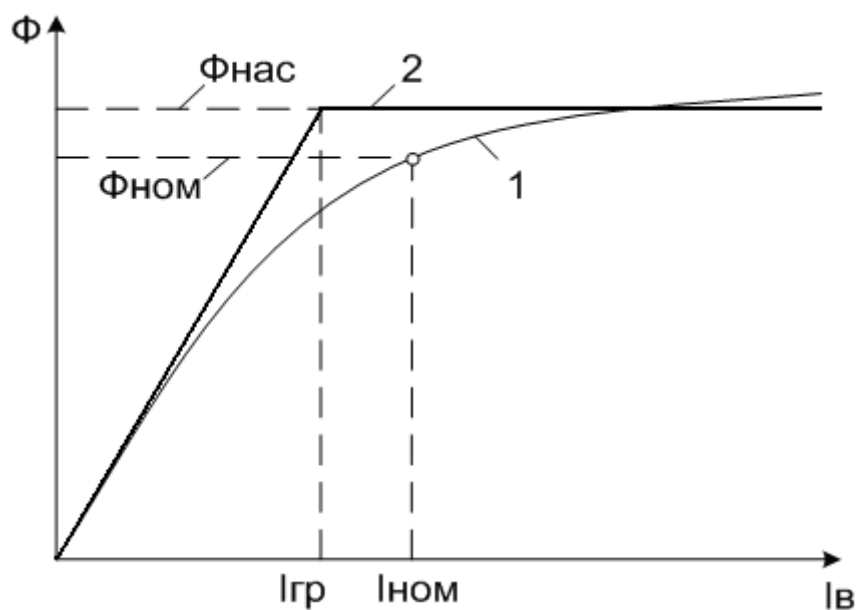


Рисунок 2.2 – Характеристика намагнічування двигуна $\Phi = f(I_{\text{в}})$

Користуючись характеристикою (рисунок 3.2) при різних струмах збудження рівняння (2.1) та (2.2) мають різний вигляд. При $I_{\text{я}} < I_{\text{гр}}$ магнітний потік записується залежністю – $\Phi = I_{\text{в}} \kappa_{\Phi}$ і рівняння (2.1) та (2.2) перетворюються до виду:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{I_{\text{в}} \cdot \kappa \cdot k_{\phi}} - \frac{R_{\text{я}} \Sigma M}{(I_{\text{в}} \cdot \kappa \cdot k_{\phi})^2} \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{I_{\text{в}} \cdot \kappa \cdot k_{\phi}} - \frac{R_{\text{я}} \Sigma}{\kappa \cdot k_{\phi}} \quad (2.4)$$

де k_{ϕ} — коефіцієнт, який пов'язує між собою магнітний потік та струм збудження по кривій намагнічування.

При $I_{\text{я}} > I_{\text{зр}}$ магнітний потік $\Phi = \Phi_{\text{нас}} = \text{const}$ і рівняння (2.1) та (2.2) записуються наступним чином:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \Phi_{\text{нас}}} - \frac{R_{\text{я}} \Sigma}{\kappa^2 \Phi_{\text{нас}}^2} M; \quad (2.5)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{\kappa \Phi_{\text{нас}}} - \frac{R_{\text{я}} \Sigma}{\kappa \Phi_{\text{нас}}} I_{\text{я}}. \quad (2.6)$$

Рівняння (2.3) та (2.4) свідчать про те, що в області навантаження, що менше номінального, статичні характеристики двигуна послідовного збудження мають гіперболічний характер і при $M \rightarrow 0$ та $I \rightarrow 0$ асимптотично наближуються до вісі координат. Ця форма характеристики визначається умовами електричної рівноваги машини: при ідеальному холостому ході ($I_{\text{я}} = 0$) ЕРС двигуна повинна урівноважувати прикладену до якірного кола напругу $U_{\text{я}}$. Так при $I_{\text{я}} \rightarrow 0$ потік Φ також прямує до нуля і при цьому повинна виконуватися наступна умова:

$$E = k\Phi\omega = U_{\text{я}} \quad (2.7)$$

Але виконання цієї умови можливе тільки при необмеженому зростанні швидкості. На справі швидкість ідеального холостого ходу двигуна з послідовним збудженням завдяки наявності залишкового потоку $\Phi_{\text{зал}}$ обмежена значенням $\omega_0 = U_{\text{я}} / k\Phi_{\text{зал}}$. Однак $\Phi_{\text{зал}}$ настільки малий, що значення ω_0 набагато перевищує допустиме для двигуна за умовами механічної витривалості. Тому при проектуванні та експлуатації електроприводів з двигунами послідовного збудження необхідно виключити можливість їх роботи з малими навантаженнями, при яких швидкість двигуна може перевищувати допустиму за умовами механічної витривалості.

Форма природної механічної характеристики двигуна з послідовним збудженням дозволяє при зниженні навантаження підвищувати мінімальну швидкість в 1,5-2 рази, забезпечувати підвищення продуктивності при заданій потужності двигуна. При цьому важливою перевагою двигуна є підвищена перевантажувальна спроможність, але при цьому двигуни послідовного збудження досить схильні в тязі до боксування.

В зв'язку з не лінійністю кривої намагнічування розрахувати природні характеристики двигуна з послідовним збудженням тільки за його номінальними даними неможливо, тому при проектуванні слід користуватися природними характеристиками $\omega = f(I_{\text{я}})$ і $M = f(I_{\text{я}})$, що наведені в каталогах (рисунок 2.3). Штучні характеристики можна отримати шляхом зміни активного опору обмоток двигуна, а також зміною прикладеної напруги.

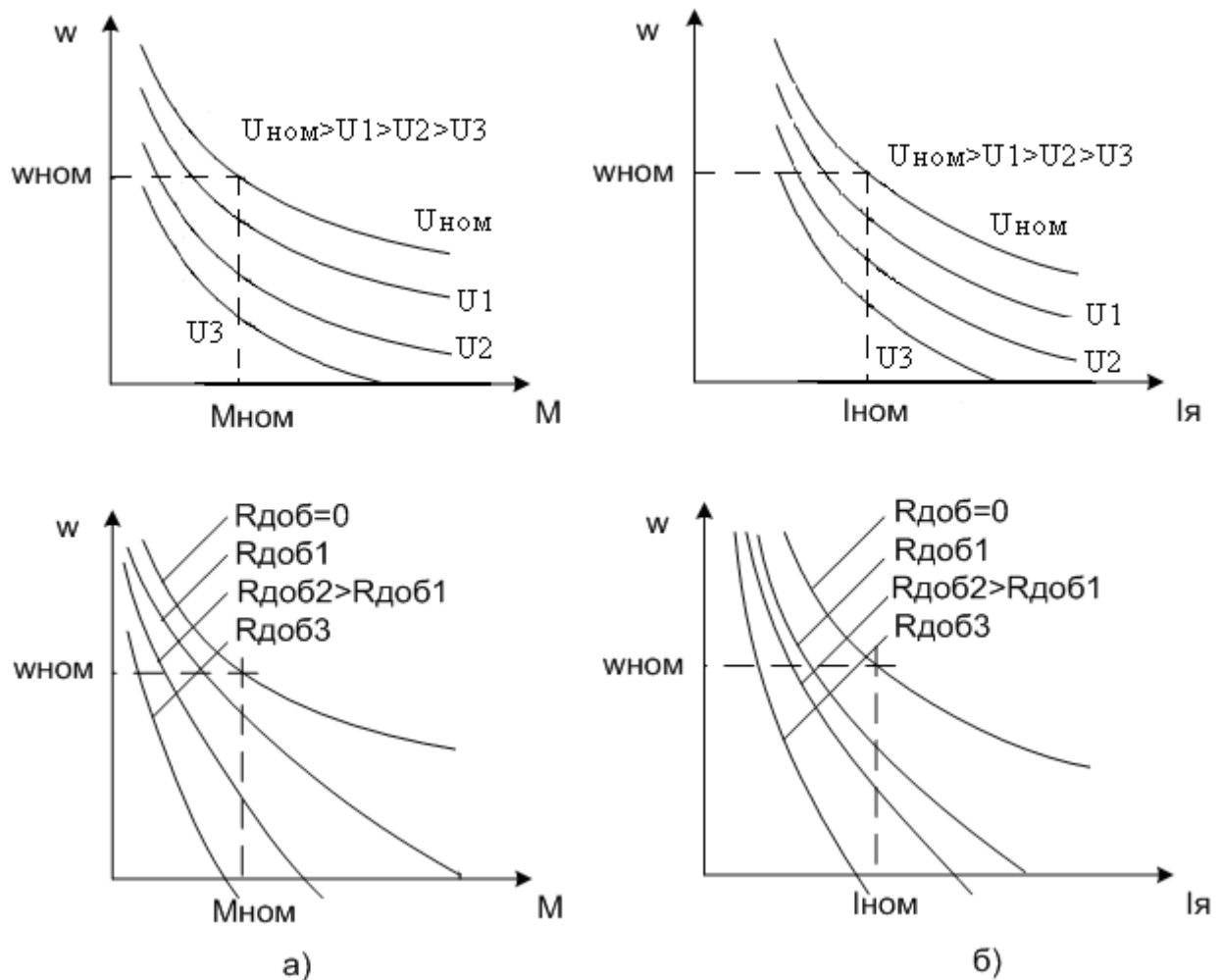


Рисунок 2.3 – Механічні (а) та електромеханічні (б) статичні характеристики двигуна з послідовним збудженням

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, яке визначається:

$$\beta = \frac{\kappa^2 \Phi_{нас}^2}{R_{я} \Sigma} \quad (2.8)$$

Відповідно введення додаткового опору зменшує жорсткість механічних характеристик, а зміна напруги на жорсткість практично не впливає (цей вплив значно більший при $I_{я} < I_{ер}$). Штучні механічні та електромеханічні характеристики показані на рисунку 3 (а), (б) разом з природними характеристиками,

відповідно при $R_{\partial\partial\partial}=0$ та $U=U_{ном}$ на яких бачимо, що введення додаткового опору в коло якоря та зменшення напруги дозволяє обмежити момент та струм короткого замикання двигуна.

2.2 Розрахунки та побудова математичної моделі

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

$$\begin{cases} U_{\text{я}} = L_{\Sigma} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + r_{\Sigma} \cdot I_{\text{я}} + E \\ M_{\partial\partial} - M_{\text{с}} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ E = C_{\text{м}} \Phi \omega \\ M_{\partial\partial} = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}} \end{cases} \quad (2.9)$$

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;

$M_{\partial\partial}$ – 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:

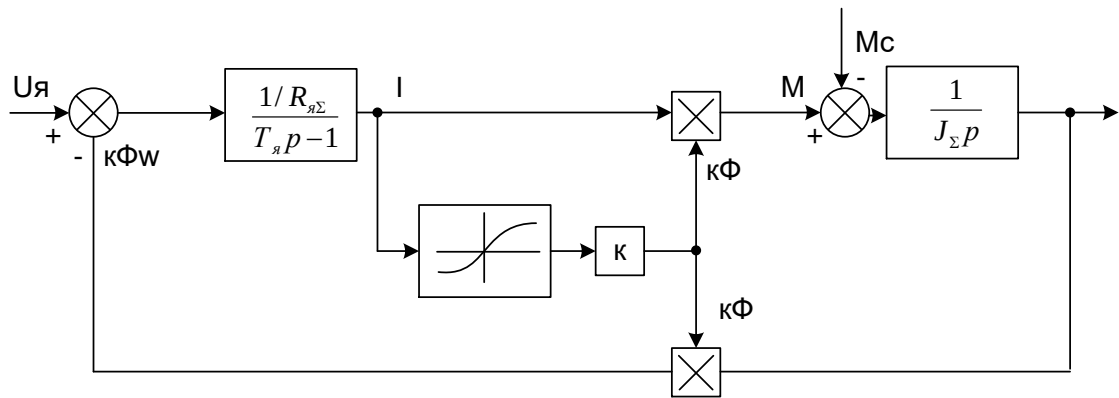


Рисунок 2.4 – Структурна схема двигуна послідовного збудження

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

Розрахунок сумарного опору якірного ланцюга:

$$R_{яЕ} = R_{я} + R_{г.п} + R_{д.п} \quad (2.10)$$

де $R_{я}$ - опір обмотки якоря;

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

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

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

Розрахунок індуктивності якірного ланцюга:

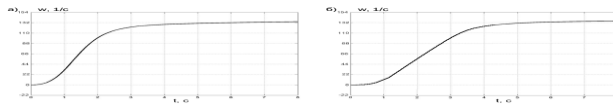
$$L_{я} = \frac{0,25 U_H 60}{2 p n I_H \pi} \quad (2.11)$$

де U_H - номінальна напруга двигуна;

I_H - номінальний струм двигуна;

p – номінальна частота обертання об/хв;

r – число пар полюсів двигуна.



Розрахунок електромеханічної сталої двигуна:

$$C_M = \frac{pN}{2\pi a} \quad (2.12)$$

де N – число ефективних провідників;

a – число паралельних гілок.

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

Розрахунок магнітного потоку двигуна:

$$\Phi = \frac{M}{C_M \cdot I_H} \quad (2.13)$$

де M - номінальний момент двигуна;

I_H - номінальний струм двигуна.

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

Розрахунок ЕРС двигуна:

$$E = C_M \omega \cdot \Phi \quad (2.14)$$

де ω – кутова швидкість двигуна:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.15)$$

$$\omega = 2 \cdot 3.14 \cdot \frac{1210}{60} = 126,647 \text{ c}^{-1}$$

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

Розрахунок індуктивності обмотки збудження:

$$L_{oz} = \frac{\Psi}{I_z} \quad (2.16)$$

де I_z - струм збудження двигуна;

Ψ – потокозчеплення обмотки збудження.

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

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

де W – кількість витків обмотки збудження;

Φ – магнітний потік двигуна;

σ - коефіцієнт розсіювання полюсів.

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

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

Еквівалентна стала часу для математичної моделі розраховується за формулою:

$$T_e = \frac{L_{я} + L_{oz}}{R_{я} + R_{oz}}, \quad (2.18)$$

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

L_{oz} — індуктивність обмотки збудження;

$R_{я}$ - опір якірного ланцюга;

R_{oz} - опір обмотки збудження.

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

Розрахунок моменту інерції якоря:

$$J = \frac{mR^2}{2}, \quad (2.19)$$

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 12, яка моделює прямий пуск, а також пуск зі ступеневим підвищенням напруги.

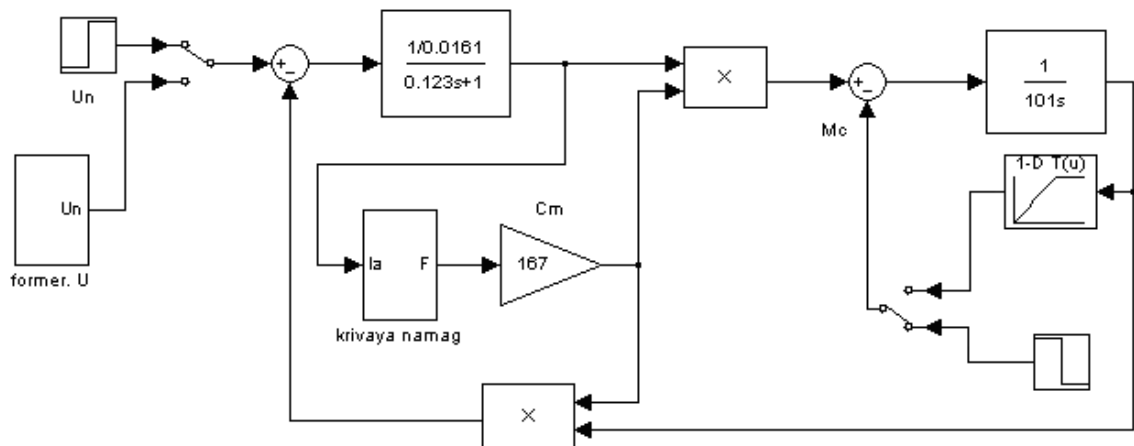


Рисунок 2.5 – Математична модель електропривода постійного струму

На рисунках 2.6 та 2.7 показані відповідно характеристики моменту та швидкості електродвигуна при прямому пуску та при ступеневому підвищенні напруги з номінальним навантаженням.

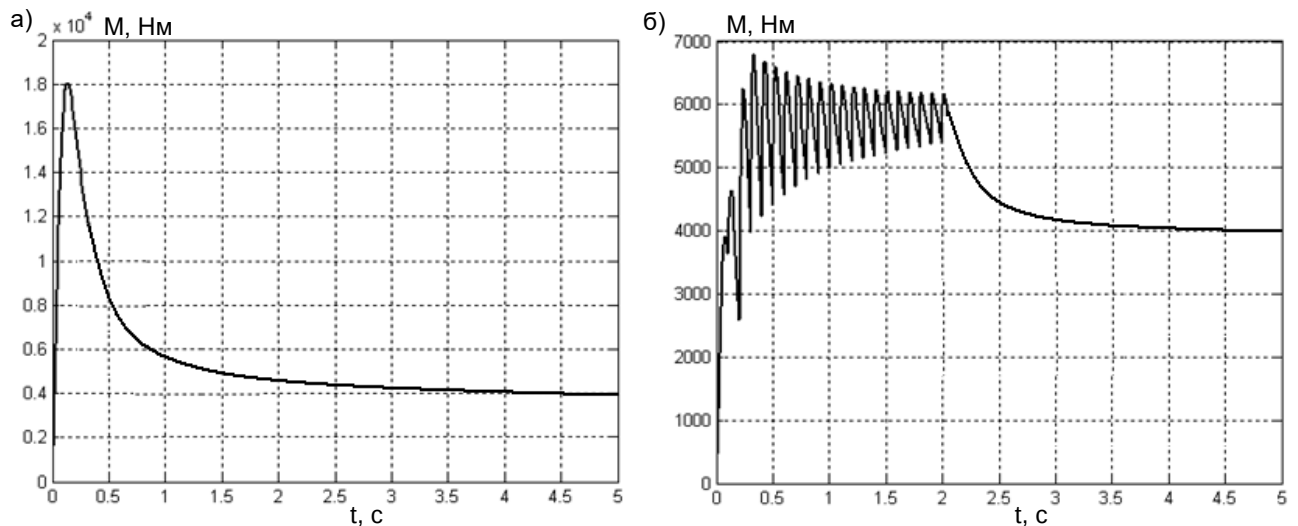


Рисунок 2.6 – Характеристика моменту електродвигуна: а) – при прямому пуску, б) – при ступеневому підвищенні напруги

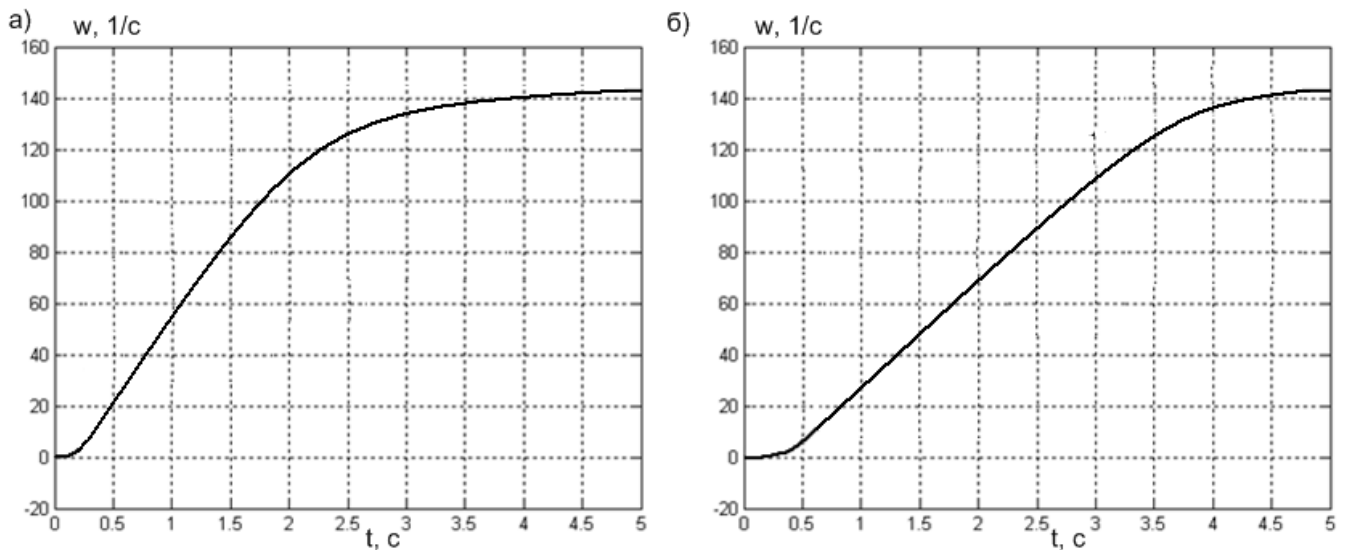


Рисунок 2.7 – Характеристика швидкості двигуна а) – при прямому пуску, б) – при ступеневому підвищенні напруги

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

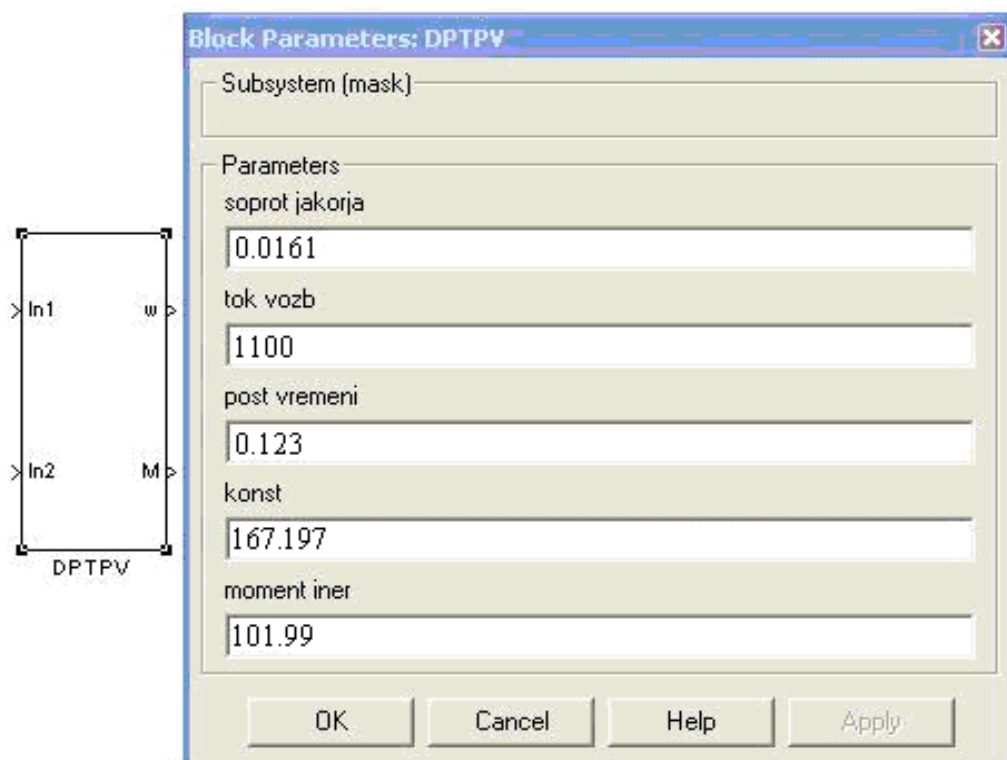


Рисунок 2.8 - Маска моделі двигуна постійного струму

Тобто в моделі за схемою 2.5 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.

2.3 Математичне моделювання руху поїзда

2.3.1 Загальні відомості про рух потяга

Потяг є складною системою, що складається з багатьох частин, пружно і жорстко пов'язаних один з одним. Тому рух поїзда по рейковому шляху можна представити з корисного переміщення уздовж осі шляху, що супроводжується обертанням коліс, осей, якорів тягових двигунів, елементів рушійних механізмів і різних коливальних рухів, що накладаються на нього. Ці коливання з'являються від збурюючих сил з боку шляху і навколишнього середовища, а також унаслідок взаємодії між окремими частинами поїзда. Розглянемо корисний рух і для цього представимо потяг як тверде тіло з масою m зосередженою в його центрі мас.

Рівняння руху поїзда можна вивести з виразу для його кінетичної енергії по теоремі Кеніга:

$$A_k = \frac{mv^2}{2} + \sum \frac{J_{\partial} \omega_{\partial}^2}{2} + \sum \frac{J_n \omega_n^2}{2} + \sum \frac{J_{\text{я}} \omega_{\text{я}}^2}{2}, \quad (2.20)$$

де A_k – кінетична енергія потяга;

m – маса потяга;

V – швидкість поїзда;

$J_{\text{д}}, W_{\text{д}}$ — момент інерції і кутова швидкість рушійної колісної пари при застосуванні диференціальної передачі з пов'язаними з ними елементами рушійного механізму;

$J_{\text{п}}, W_{\text{п}}$ — момент інерції і кутова швидкість підтримуючої колісної пари або коліс;

$J_{\text{я}}, W_{\text{я}}$ — момент інерції і кутова швидкість якоря двигуна, включаючи частини передачі, укріплені на його валу.

У формулі (2.41) знаки суми вказують, що підсумовування енергії розповсюджується відповідно на всі колісні пари, колеса і якорі тягових двигунів, які можуть бути різних типів.

При радіусах рушійних і підтримуючих коліс відповідно $R_{\text{д}}$ і $R_{\text{п}}$ та передавальному числі рушійного механізму $\mu = \frac{\omega_{\text{я}}}{\omega_{\text{д}}}$ кутові швидкості руху частин, що обертаються, нехтуючи проковзуванням коліс, приймають:

$$\omega_{\text{д}} = \frac{v}{R_{\text{д}}} \quad (2.21)$$

$$\omega_{\text{п}} = \frac{v}{R_{\text{п}}} \quad (2.22)$$

$$\omega_{\text{я}} = \mu \omega_{\text{д}} = \frac{\mu v}{R_{\text{д}}} \quad (2.23)$$

Підставивши ці значення кутових швидкостей у вираз (2.20) після винесення за дужки $\frac{mv^2}{2}$ отримуємо:

$$A_k = \frac{mv^2}{2} \left[1 + \frac{\sum J_{\partial} / R_{\partial}^2 + \sum J_n / R_n^2 + \sum J_{\mu} \mu^2 / R_{\partial}^2}{m} \right] = \frac{mv^2}{2} \left(1 + \frac{m_{\gamma}}{m} \right) \quad (2.24)$$

Величину, рівну чисельнику другого члена в квадратній дужці, називають еквівалентною масою частин, що обертаються, двочлен $1 + \frac{m_{\gamma}}{m} = 1 + \gamma$ – коефіцієнтом інерції частин, що обертаються, а вираз $(1 + \gamma)m = m_n$ – приведеною масою поїзда.

Таким чином, поїзд з масою m , що має поступальну ходу з одночасним обертанням деяких його частин, еквівалентний тілу з приведеною масою m_n , що здійснює тільки поступальну ходу. Позначимо F_d – рівнодіючу сил, що діють на потяг. Зміна кінетичної енергії поїзда рівна роботі прикладених до нього сил, тому:

$$d \frac{(1 + \gamma)mv^2}{2} = F_d ds \quad (2.25)$$

Звідки:

$$(1 + \gamma)mv \frac{dv}{ds} = F_d \quad (2.26)$$

Для знаходження співвідношення між швидкістю і часом слід підставити в рівняння (2.26) $v = \frac{ds}{dt}$, тоді:

$$(1 + \gamma)m \frac{dv}{dt} = F_d \quad (2.27)$$

Формули (2.26) і (2.27) також можна вивести на підставі другого закону Ньютона, застосувавши його до умов руху поїзда.

У рівняння (2.26) і (2.27) необхідно ввести, наприклад, в праві їх частини, переводні коефіцієнти ξ , оскільки довільно можуть бути вибрані одиниці вимірювань тільки для трьох з чотирьох вхідних в них величин:

$$(1+\gamma)m\frac{dv}{dt}=\xi F_{\partial} \quad (2.28)$$

$$(1+\gamma)mv\frac{dv}{ds}=\xi' F_{\partial} \quad (2.29)$$

Рівності (2.28) і (2.29) називають відповідно першою і другою формою рівняння руху поїзда.

Тягові розрахунки зручніше виконувати, користуючись питомими значеннями рівнодіючої сили і її складових, для чого рівняння (2.28) і (2.29) ділять на вагу G поїзда (іноді на масу поїзда m):

$$\frac{dv}{dt}=\frac{\xi}{(1+\gamma)}f_{\partial} \quad (2.30)$$

$$v\frac{dv}{ds}=\frac{\xi'}{(1+\gamma)}f_{\partial}, \quad (2.31)$$

де $f_{\partial}=F_{\partial}/G$ – питома значення рівнодіючої сили.

2.3.2 Загальний аналіз основних режимів руху поїзда

За позитивний напрям сил, прикладених до поїзда, приймають напрям його руху. Тоді сила тяги F позитивна, а гальмівна сила B , що завжди діє протилежно руху, - негативна. Рівнодіюча сил опору руху поїзда W , яку називають повним опором руху, в більшості випадків, направлена проти руху поїзда, але на крутих спусках W може діяти в позитивну сторону. Тому її слід розглядати як величину алгебри, причому вважатимемо W позитивними, якщо вона направлена проти руху поїзда. Під B умовимося розуміти абсолютне значення гальмівної сили. Тоді для F_d і f_d в загальному випадку справедливі вирази

$$F_d = F - W - B \quad (2.32)$$

$$f_d = f - w - b, \quad (2.33)$$

де f, w, b — відповідно питомі значення сили тяги, повного опору руху, гальмівної сили.

Для подальшого аналізу вводимо в рівняння руху (2.32) замість F_d вираз (2.15) і отримуємо наступну формулу:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{(1 + \gamma)} (F - W - B) \quad (2.34)$$

Таким чином, в будь-якому режимі при рівнодіючій силі, рівній нулю, поїзд рухається із сталою швидкістю. Якщо ж, процес руху відбуватиметься із збільшенням швидкості поїзда, то $F_d > 0$, а із зменшенням, то $F_d < 0$.

Процес руху поїзда в режимі тяги істотно залежить від значення сили тяги F , яке витікає з рівняння (2.34). При числі n_d тягових двигунів в поїзді і силі тяги F_k кожного маємо:

$$F = n_{\text{д}} \cdot F_k \quad (2.35)$$

Силу тяги, а отже, прискорення і швидкість поїзда регулюють за допомогою перемикачів резисторів або контакторів трансформатора в ланцюгах живлення для зміни напруги на тягових двигунах та їх збудженнях. На будь-якій позиції перемикаючих пристроїв сила тяги F змінюється зі швидкістю руху поїзда і цю характеристику (залежність сили тяги поїзда від швидкості його руху $F(v)$) називають тяговою характеристикою локомотива, а $F_k(v)$ — тяговою характеристикою двигуна. Ці характеристики для всіх ступенів регулювання визначають по знятих експериментально на заводі-виготівнику електромеханічним характеристикам двигуна, віднесеним до його валу, якими є наступні залежності від струму якоря колекторних тягових двигунів або струму фази статора трифазних безколекторних двигунів: кутової швидкості, моменту, що обертає, корисної потужності, коефіцієнта корисної дії, коефіцієнта потужності, за умови постійності підведеної до двигуна напруги U , опору обмоток і частоти струму.

Електромеханічними характеристиками, віднесеними до обох рушійних коліс, або електротягою, називають залежності, які отримують шляхом перерахунку електромеханічних характеристик, віднесених до валу двигуна, по формулах:

$$v = 1.8 \frac{D}{\mu} \omega \quad (2.36)$$

$$F_k = \frac{2\mu}{D} M \eta_3 \quad (2.37)$$

$$P = M \eta_3 \omega \quad (2.38)$$

$$P = 0,278 v F_k \quad (2.39)$$

$$\eta = \eta_o \eta_z, \quad (2.40)$$

де D – діаметр рушійних коліс, м;
 ω – кутова швидкість, рад.;
 M – обертаючий момент, кН.м;
 η_z – ККД рушійного механізму;
 V – лінійна швидкість в точці катання, км\год;
 F_k – сила тяги, що створюється одним двигуном, кН.;
 P – потужність на ободі рушійних коліс, кВт.

2.3.3 Математична модель, що реалізує рівняння руху поїзда з двигунами постійного струму

За основу моделі поїзда взята модель двигуна постійного струму послідовного збудження, з тією лише різницею, що, згідно формулі (2.38), приведені величини моменту опору, маси складу і сили тяги локомотива до відповідних значень. Структура моделі вибрана блокова з метою спрощення процесу зміни параметрів блоків

Можна позначити наступні основні блоки:

- блок, що моделює роботу електровоза;
- блок, що обчислює швидкість поїзда;
- блок, що обчислює питомий опір локомотива;
- блок, що обчислює питомий опір складу;
- блок, що обчислює питомий опір поїзда в цілому;
- блок, що обчислює момент опору.

Останні 5 блоків об'єднані у subsystem, що називається «Poezd».

Оскільки блок, що моделює роботу електровоза, виконаний на основі ДПСПЗ, модель якого була детально описана раніше, то пояснень він не потребує.

Блок, що обчислює швидкість поїзда, реалізований за наступним рівнянням:

$$V = \frac{3,6 \cdot D_k \omega}{2\mu}. \quad (2.41)$$

Прослідкуємо логічний ланцюжок виконання операцій в цьому блоці:

Вхідне значення моменту тягового двигуна, що обертає, перетвориться в кутову швидкість у блоці «Transfer Fcn», де коефіцієнт біля s дорівнює механічній сталій часу потяга. Швидкість отримуємо у блоці «Gain» за формулою 2.20. Від моменту віднімається момент опору руху потяга, що отримується помноженням питомого опору на масу потяга.

Блок, що обчислює питомий опір локомотива, реалізується з наступної залежності:

$$\omega_0' = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2. \quad (2.42)$$

Вхідним параметром цього блоку є швидкість поїзда. За допомогою блоку «produkt» швидкість поїзда помножується спочатку на 0,01, а потім квадрат швидкості помножується на 0,0003, після чого за допомогою суматора всі величини складуються. Маскувати цей блок не має сенсу, оскільки рівняння, закладене в ньому, має постійні коефіцієнти і не існує параметрів, які потрібно було б змінювати.

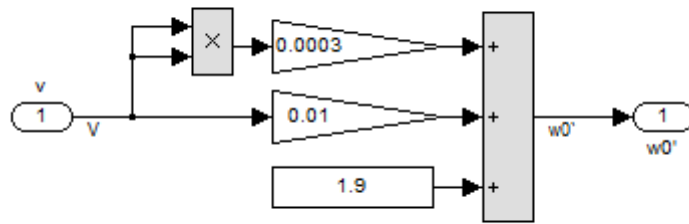


Рисунок 2.9 – Структура моделі блоку, що обчислює питомий опір руху локомотива

Блок, що обчислює питомий опір складу, реалізується за наступною залежністю:

$$\omega_{04кач}'' = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_{04кач}}, \quad (2.43)$$

де $q_{04кач}$ — осьове навантаження вагону, яке обчислюється за формулою:

$$q_{04кач} = \frac{q}{n}, \quad (2.44)$$

де q — маса брутто вагону, т;

n — кількість осей вагону.

$$q_{04кач} = \frac{60}{4} = 15 \text{ т}.$$

У даній моделі зроблено допущення, що пересувний склад одного типу — чотиривісні вагони з підшипниками кочення.

Вхідним параметром цього блоку також є швидкість складу. Як і в попередньому блоці, її значення за допомогою блоку «produkt» помножується на 0,1, потім квадрат швидкості помножується на 0,0025, після чого результати підсумовуються в суматорі, вихідне значення якого ділиться на осьове навантаження

Після цього до отриманого додається 0,7 і результат – питомий опір руху складу з чотиривісних вагонів з підшипниками кочення – подається на вихід «out». Структура блоку, що моделює питомий опір складу представлена на рисунку 2.10.

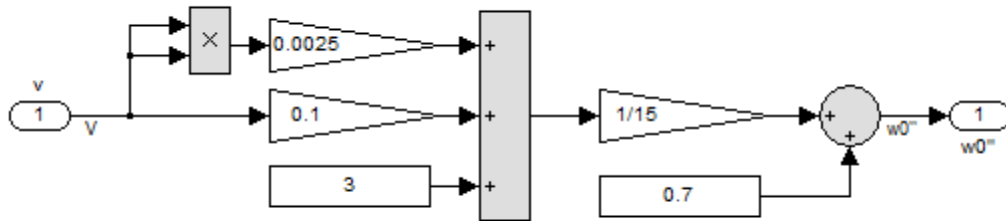


Рисунок 2.10 – Структура моделі блоку, що моделює питомий опір складу

Блок, що обчислює питомий опір поїзда в цілому, реалізується за наступною залежністю:

$$\omega_0 = \frac{m_e \cdot (\omega_0' + i) + m_c \cdot (\omega_0'' + i)}{m_e + m_c}, \quad (2.45)$$

де i - величина ухилу на даній ділянці профілю шляху.

Вхідними параметрами для даного блоку є питомий опір руху локомотива, поїзда та їх маси.

Виконання умови рівняння (2.45) відбувається таким чином (рисунку 2.10): до вхідних сигналів (питомий опір складу і локомотива) додається за допомогою суматора значення величини ухилу, вихідні сигнали після цього перемножуються за допомогою блоку «produkt» з відповідними масами. У підсистемі формування профілю вхідною величиною є пройдений шлях.

В залежності від значення вхідної величини у вихідний суматор поступає те чи інше значення, яке на виході з суматора дає значення ухилу на цій ділянці. Блок отримання ухилу зображений на рисунку 2.11, за основу взята ділянка Харків-Мерефа.

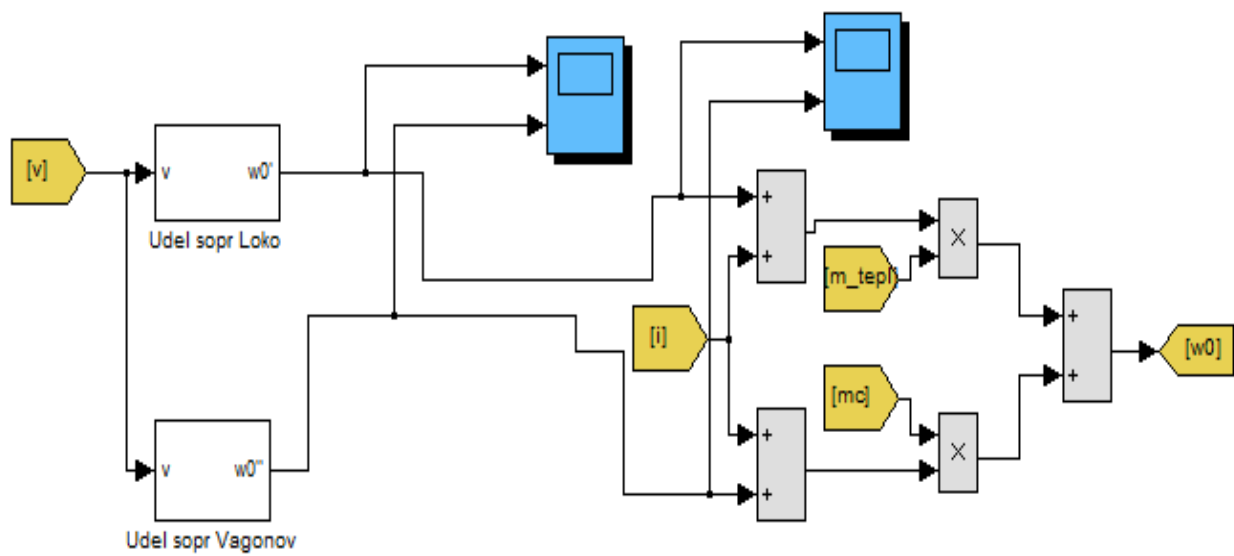


Рисунок 2.11 – Структура блока, що моделює питомий опір потяга

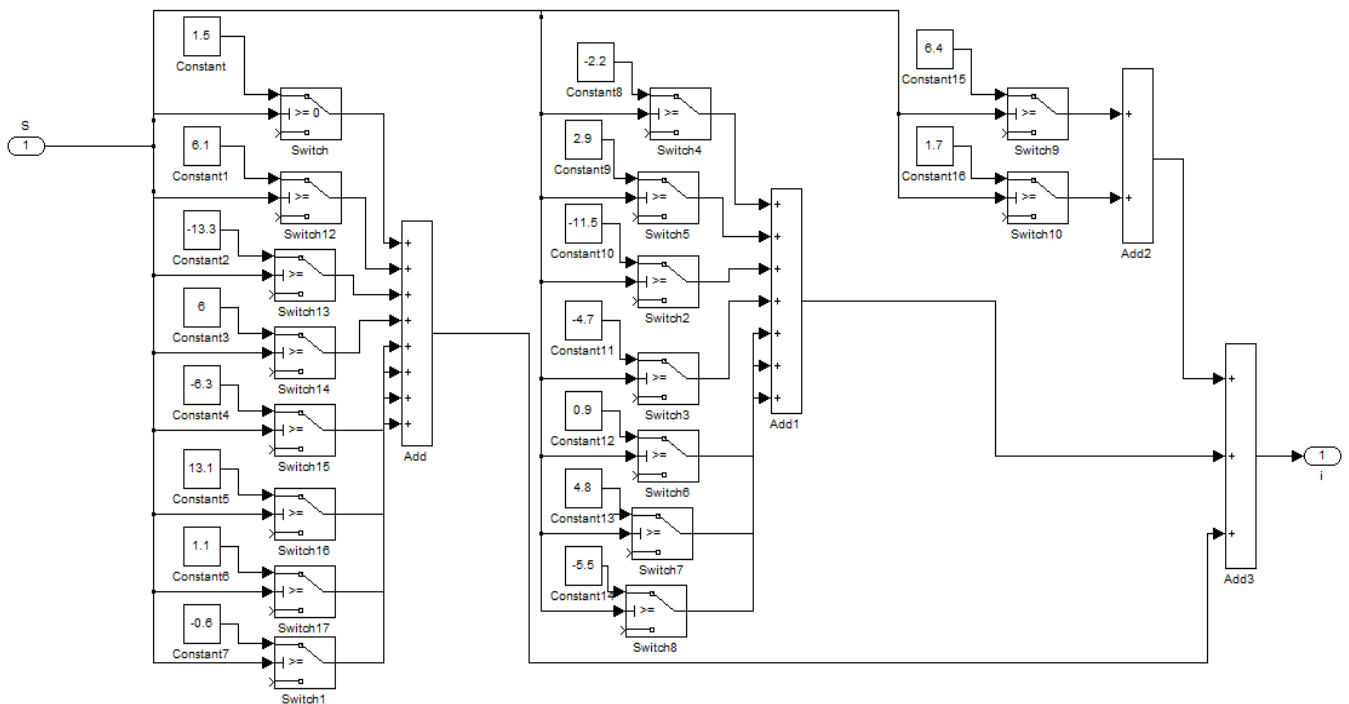


Рисунок 2.12 – Структура підсистеми формування профілю шляху

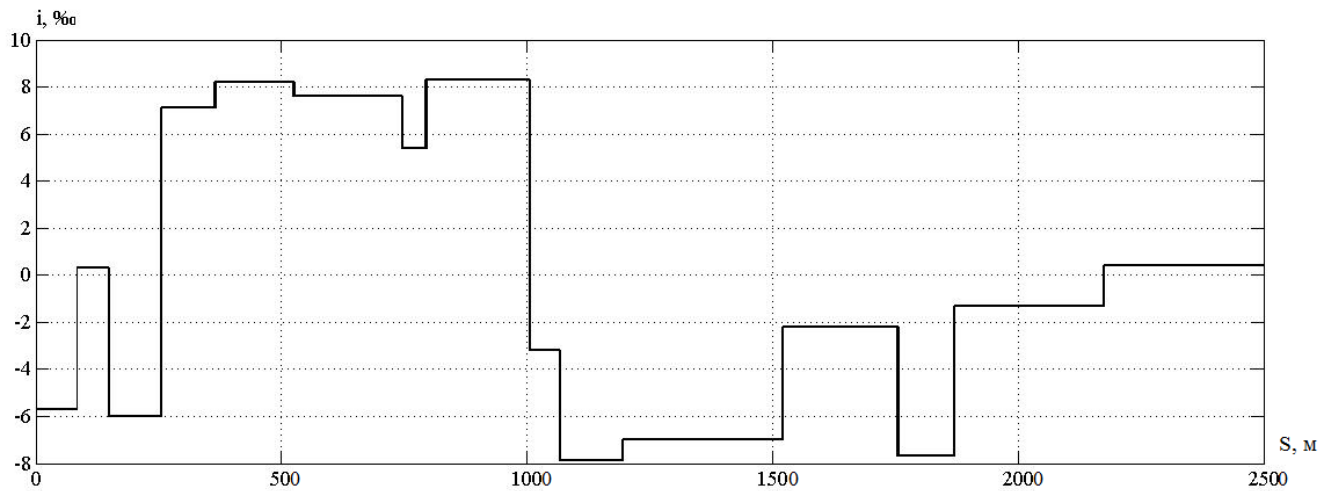


Рисунок 2.12 – Профіль шляху на ділянці Харків – Мерефа

Блок, що обчислює момент опору, реалізується за наступними залежностями:

$$M = \frac{D}{2\mu} \cdot F, \quad (2.46)$$

$$W = \omega_0 m, \quad (2.47)$$

де m – маса поїзда.

Вхідними параметрами даного блоку є питомий опір руху складу і його маса. Логіка виконання залежностей (2.46) і (2.47) наступна: вхідне значення помножується на масу поїзда, а далі помножується на значення $\frac{D}{2\mu}$. Отримане значення моменту опору подається на відповідний вхід тягового двигуна.

Загальний вид моделі, а також осцилограми лінійної швидкості потяга представлені на рисунках 2.13 та 2.14 відповідно.

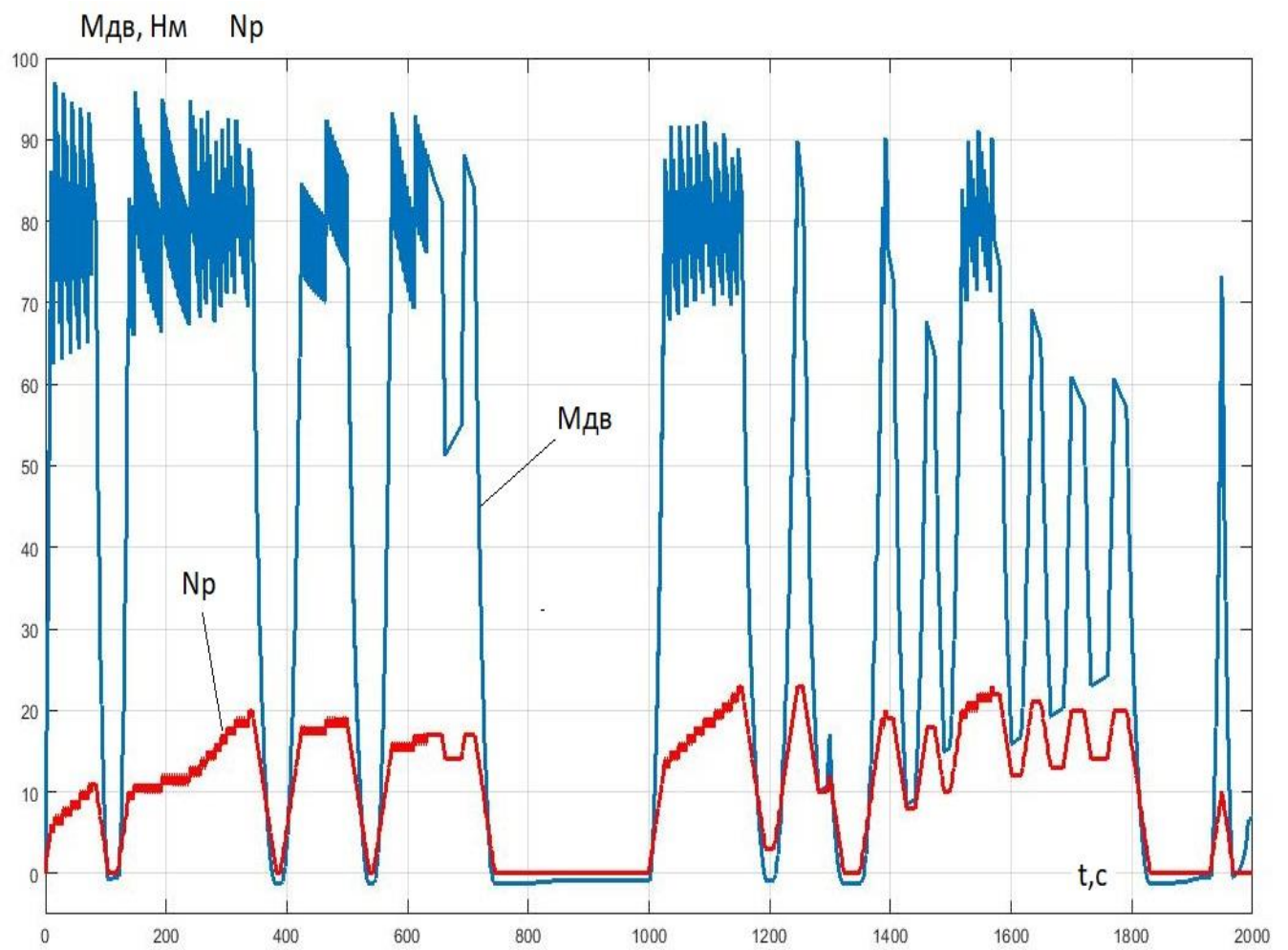


Рисунок 2.15 – Номер позиції контролера машиніста та тяговий електромагнітний момент на валу двигуна

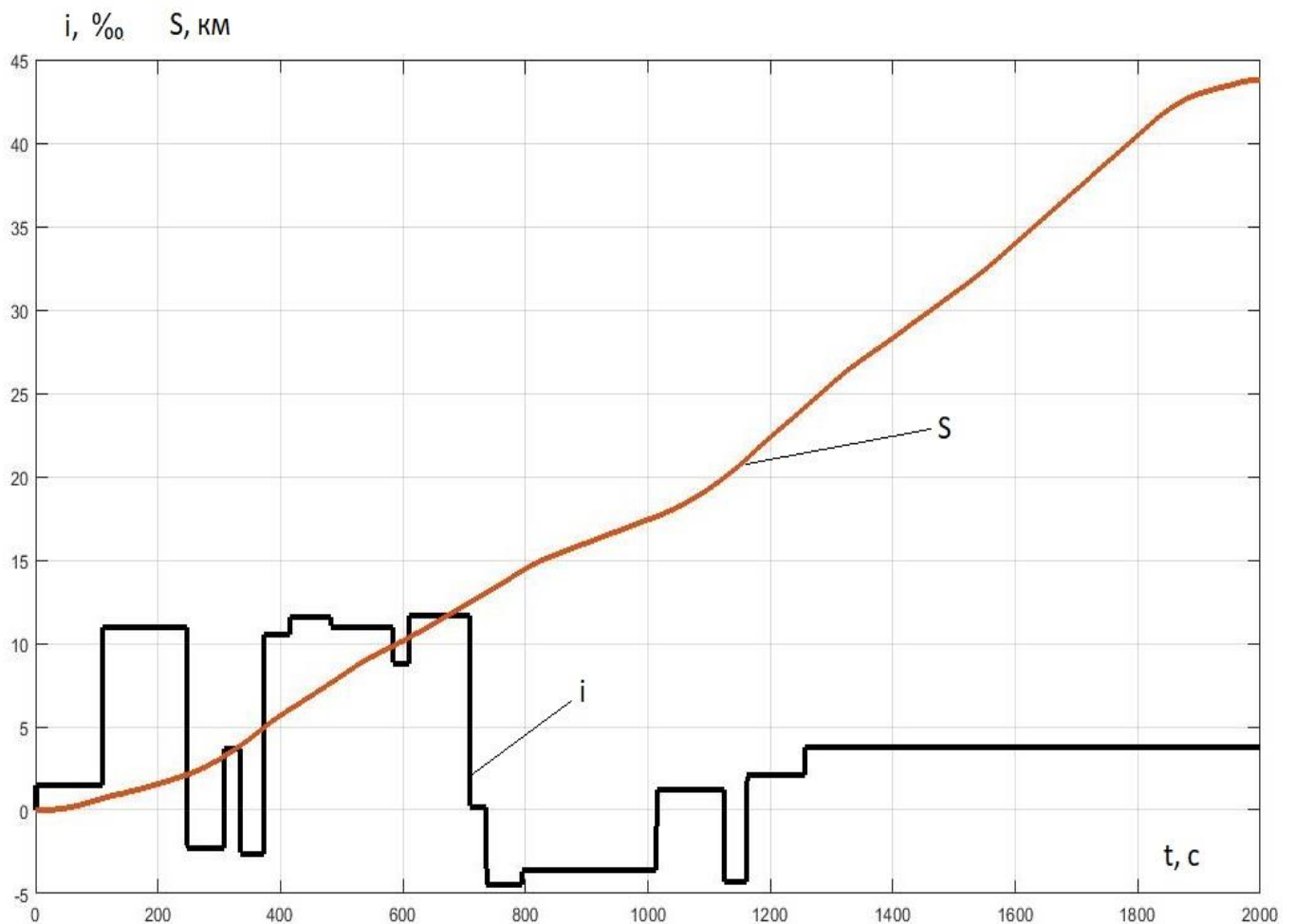


Рисунок 2.16 – Профіль шляху та переміщення потяга

Отримані осцилограми роботи електровоза (а саме присутність коливань швидкості руху та неточність в її підтриманні) демонструють вказують на потребу у створенні сучасної системи керування з можливим застосування рекуперативного гальмування. А тому подальші дослідження будуть спрямовані на розробці асинхронного привода з векторною системою керування та аналіз їх роботи на електровозі ЧС8.3 Асинхронні двигуни та їх математичне моделювання

3.1. Будова та принцип дії асинхронного електродвигуна

Система трифазного змінного струму, що дозволила створити пристрої для отримання магнітного потоку, що обертається, викликала появу найбільш

поширеного зараз електродвигуна, званого асинхронним. Ця назва обумовлена тим, що частина машини, що обертається - ротор - завжди обертається зі швидкістю, не рівній швидкості магнітного потоку, тобто не синхронно з ним.

У асинхронних електродвигунах трифазна обмотка розташовується в пазах внутрішньої циліндрової поверхні нерухомої частини машини — статора (рисунок 3.1).

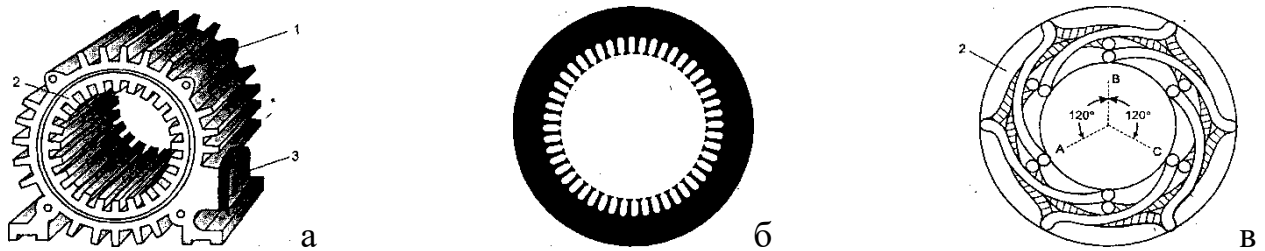


Рисунок 3.1 - Елементи асинхронного двигуна

а - статор асинхронного електродвигуна без обмотки

б - сталевий лист статора, в - розташування обмоток статора в пазах

Статор складається із зовнішнього сталевого корпусу 1, в який запресований сталевий сердечник статора 2, що має пази. Сердечник збирається із сталевих штампованих листів (рисунок 3.1.б) електротехнічної сталі, ізолюваних один від одного з обох боків спеціальним лаком. Корпус статора у показаного електродвигуна із зовнішнього боку обдувається повітрям за допомогою вентилятора, і для збільшення охолоджуваної поверхні вона виконана ребристою.

Оскільки усередині статора повинна поміщатися частина, що обертається, — ротор, то лобові частини обмотки, не лежачі в пазах, повинні укладатися не так на сторонах торців сердечника статора 2 (рисунок 3.1.в). Початки фаз А, В, С зміщені на 120° (рисунок 3.1.в), а виводи від них поміщені в розподільну коробку 3 (рисунок 3.1.а).

3.2 Обмотки ротора

Частина асинхронного двигуна, що обертається, — ротор, так само як і статор, має обмотку. Вона поміщена в пазах сталевого циліндра, набраного, як і сердечник статора, з листів електротехнічної сталі завтовшки 0,5 мм. Після штампування листи збирають в пакет, щільно стискають, насаджують на вал двигуна і закріплюють. У пазах ротора поміщається або короткозамкнена, або фазна обмотка. Обмотка ротора з'єднується в зірку, а виводи підключаються до трьох контактних кілець, насаджених на вал ротора і ізольованих від валу і один від одного. Контактні кільця виготовляються з міді, бронзи, рідко із сталі.

Якщо в пази ротора укладені голі мідні або алюмінієві стрижні, кінці яких замкнуті на коротко кільцями з обох боків то така обмотка називається короткозамкненою. Обмотка утворює клітку, звану білячою. Короткозамкнену обмотку ротора роблять в трьох модифікаціях: з нормальною кліткою, з подвійною кліткою і з глибоким пазом.

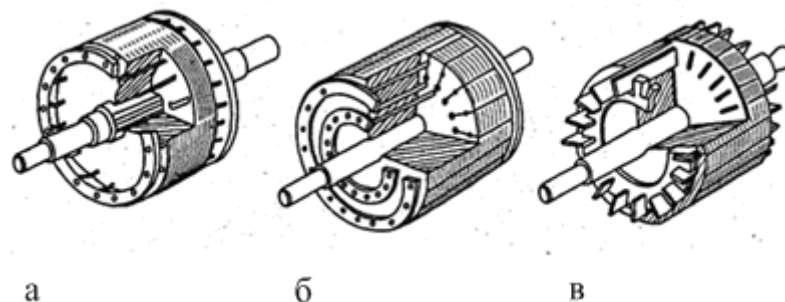


Рисунок 3.2 - Види роторів. Ротори короткозамкнені: а — із звичайною кліткою, б - з подвійною кліткою, в — з глибокою кліткою

Під впливом підведеної до статора напруги мережі в його обмотці протікає струм. Цей струм створює магнітний потік, що обертається, замикається через статор і ротор. Потік створює в двох обмотках е.р.с., як в первинній і вторинній обмотках трансформатора. Таким чином, асинхронний двигун подібний до трифазного трансформатора, в якому е.р.с. створюються магнітним потоком, що обертається.

Під впливом е.р.с. в обмотці ротора протікатиме струм. Взаємодія струму і потоку створює електромагнітні сили, що приводять ротор в обертання, услід за потоком, що обертається. Таким чином, асинхронний двигун є трансформатор з

вторинною обмоткою, що обертається, і здатний перетворювати електричну потужність на механічну.

3.3 Загальні механічні характеристики асинхронних електродвигунів

Як правило, в електроприводі використовуються короткозамкнені трифазні електродвигуни. В порівнянні з фазним такий електродвигун має простішу конструкцію, меншу вартість, велику надійність в експлуатації і простоту в обслуговуванні, декілька вищі експлуатаційні показники (коефіцієнт потужності і коефіцієнт корисної дії), а при автоматичному управлінні вимагає просту апаратуру. Недолік короткозамкнених електродвигунів — великий пусковий струм. При сумарності потужностей трансформаторної підстанції і електродвигуна пуск його супроводжується помітним зниженням напруги мережі, що ускладнює пуск самого двигуна.

Разом з трифазними асинхронними короткозамкненими електродвигунами основного виконання, застосовуються також окремі модифікації цих двигунів: з підвищеним ковзанням, з фазним ротором, з масивним ротором і т.д.

Механічні характеристики асинхронних електродвигунів з коротко замкнутим ротором значною мірою залежать від форми і розмірів пазів ротора, а також від способу виконання роторної обмотки. За цими ознаками розрізняють електродвигуни з нормальним ротором (нормальна біляча клітка), з глибоким пазом і з двома клітками на роторі. Механічні характеристики таких двигунів представлені на рисунку 3.3.

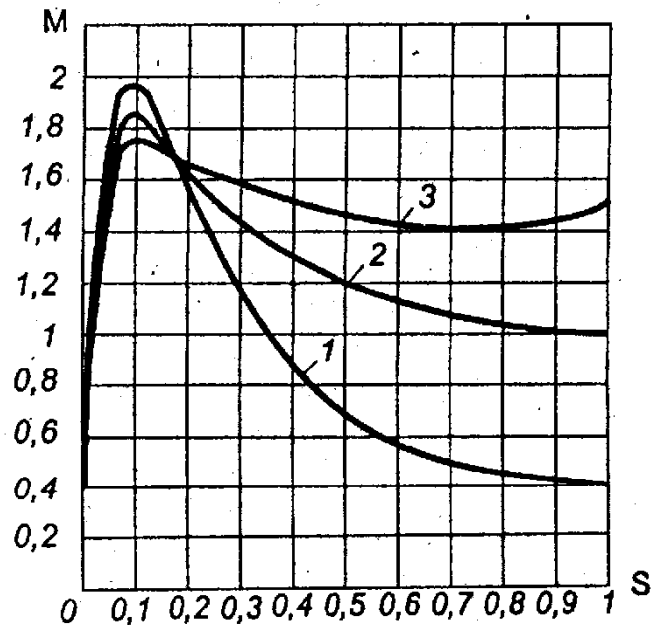


Рисунок 3.3 – Криві моментів $M = f(S)$ асинхронних електродвигунів: 1 — без витіснення струму в обмотці ротора; 2 — з глибоким пазом; 3 — двох клітинний

3.4 Математичне моделювання асинхронного двигуна НБ-607

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

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

$$\begin{cases}
U_{\alpha s} = \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} + r_s \cdot i_{\alpha s} + \psi_{\beta s} \cdot \omega_k \\
U_{\beta s} = \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} + r_s \cdot i_{\beta s} - \psi_{\alpha s} \cdot \omega_k \\
U_{\alpha r}' = \frac{d\psi_{\alpha r}'}{dt} + r_r' \cdot i_{\alpha r}' + \psi_{\beta r} \cdot (\omega_k - \omega) \\
U_{\beta r}' = \frac{d\psi_{\beta r}'}{dt} + r_r' \cdot i_{\beta r}' - \psi_{\alpha r} \cdot (\omega_k - \omega) \\
M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_{\alpha s} \cdot i_{\beta s} - \psi_{\beta s} \cdot i_{\alpha s}) \\
M - M_c = \left(\frac{J}{p}\right) \cdot \frac{d\omega}{dt} \\
i_{\alpha s} = A \cdot (\psi_{\alpha s} \cdot L_r' - \psi_{\alpha r} \cdot L_\mu) \\
i_{\beta s} = A \cdot (\psi_{\beta s} \cdot L_r' - \psi_{\beta r} \cdot L_\mu) \\
i_{\alpha r} = A \cdot (\psi_{\alpha r} \cdot L_r' - \psi_{\alpha s} \cdot L_\mu) \\
i_{\beta r} = A \cdot (\psi_{\beta r} \cdot L_r' - \psi_{\beta s} \cdot L_\mu)
\end{cases} \quad (5.1)$$

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

$$A = \frac{1}{(L_s \cdot L_r - L_\mu^2)} \quad (3.2)$$

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

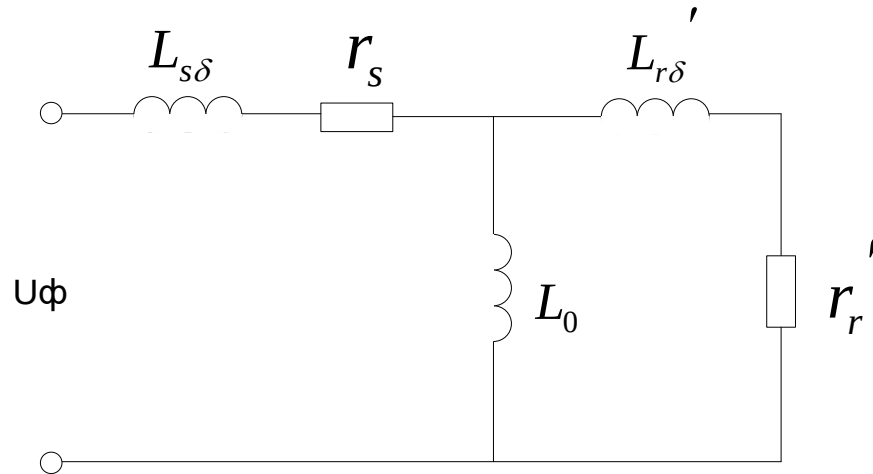


Рисунок 3.4 - Т-образна схема заміщення фази двигуна

$L_{s\delta}$ – 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:

$$L_{\mu} = \frac{3}{2} \cdot L_0. \quad (3.3)$$

Відповідно повна індуктивність статора:

$$L_s = L_{s\delta} + \frac{3}{2} \cdot L_0 \quad (3.4)$$

Повна індуктивність ротора:

$$L_r' = L_{r\delta}' + \frac{3}{2} \cdot L_0. \quad (3.5)$$

Для побудови моделі, як і в попередньому розділі, використаний блоковий метод. Проте тут в підсистемі «Asynchronous machine» як блоки реалізується одне з рівнянь системи (3.1). 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.

$$L = \frac{X}{\omega} \quad (3.6)$$

З причини того, що із зміною частоти живлячої напруги згідно формули 3.6 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.

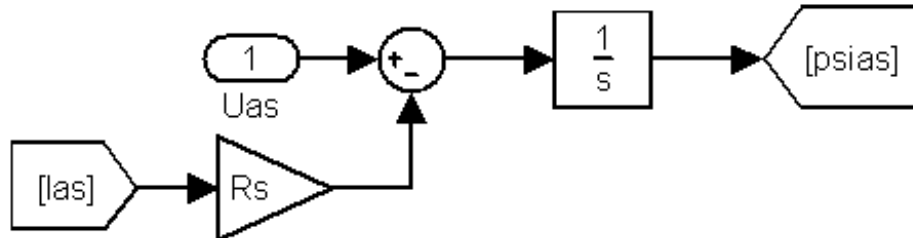


Рисунок 3.5 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення статора на вісь α

У цьому блоці реалізовано перше рівняння системи (3.1):

$$\frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} = U_{\alpha s} - r_s \cdot i_{\alpha s} \quad (3.7)$$

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 3.1 показана на рисунку 3.6.

$$\frac{d\psi_{\beta s}}{dt} = U_{\beta s} - r_s \cdot i_{\beta s} \quad (3.8)$$

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».

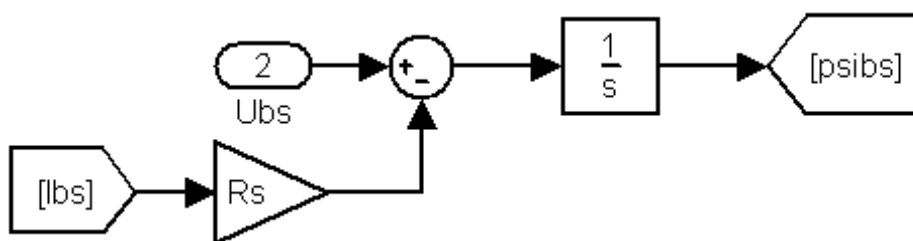


Рисунок 3.6 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення статора на вісь β

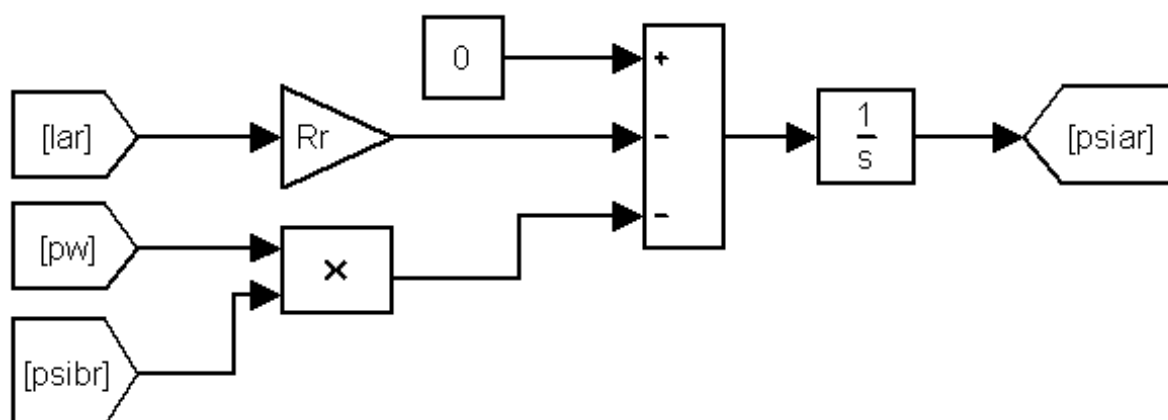


Рисунок 3.7 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення ротора на вісь α

У цьому блоці реалізовано третє рівняння системи 3.1:

$$\frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} = 0 - r_r' \cdot i_{\alpha r}' - \psi_{\beta r} \cdot \omega \quad (3.9)$$

Від значення входу «0» віднімається значення величини проекції струму ротора на вісь α (вхід « $i_{\alpha r}$ »), помножене на активний опір ротора і віднімаються перемножені значення величини проекції потокозчеплення ротора (вхід « $\psi_{\beta r}$ ») на вісь β з кутовою частотою обертання поля (вхід « ω »). Результат інтегрується і подається на вихід « $\psi_{\alpha r}$ ».

Четверте рівняння системи 3.1 реалізується блоком, представленим на рисунку 3.8.

$$\frac{d\psi_{\beta r}}{dt} = 0 - r_r' \cdot i_{\beta r}' - \psi_{\alpha r} \cdot \omega \quad (3.10)$$

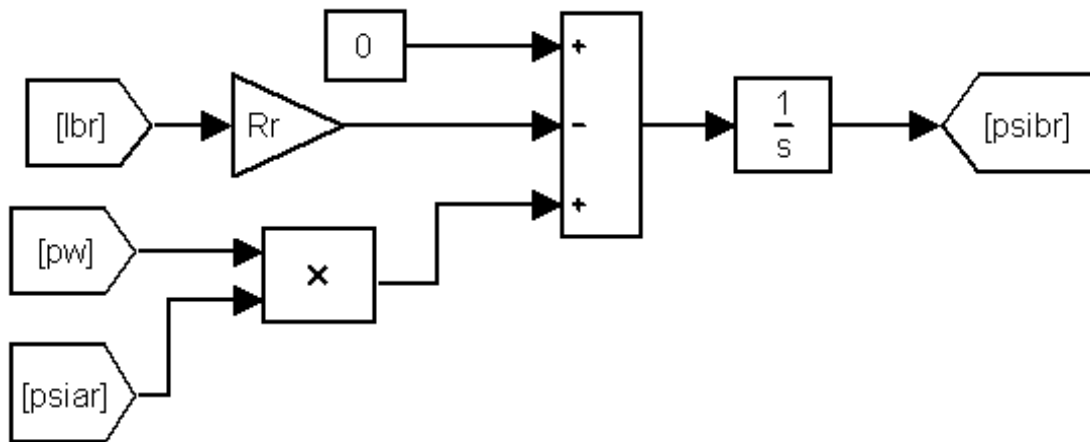


Рисунок 3.8 – Блок, що моделює проекцію вектора потокозчеплення ротора на вісь β

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

На рисунку 4.6 показано обчислення коефіцієнта A згідно формулі (3.12).

$$A = \frac{1}{(L_s \cdot L_r - L_\mu^2)} \quad (3.12)$$

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.

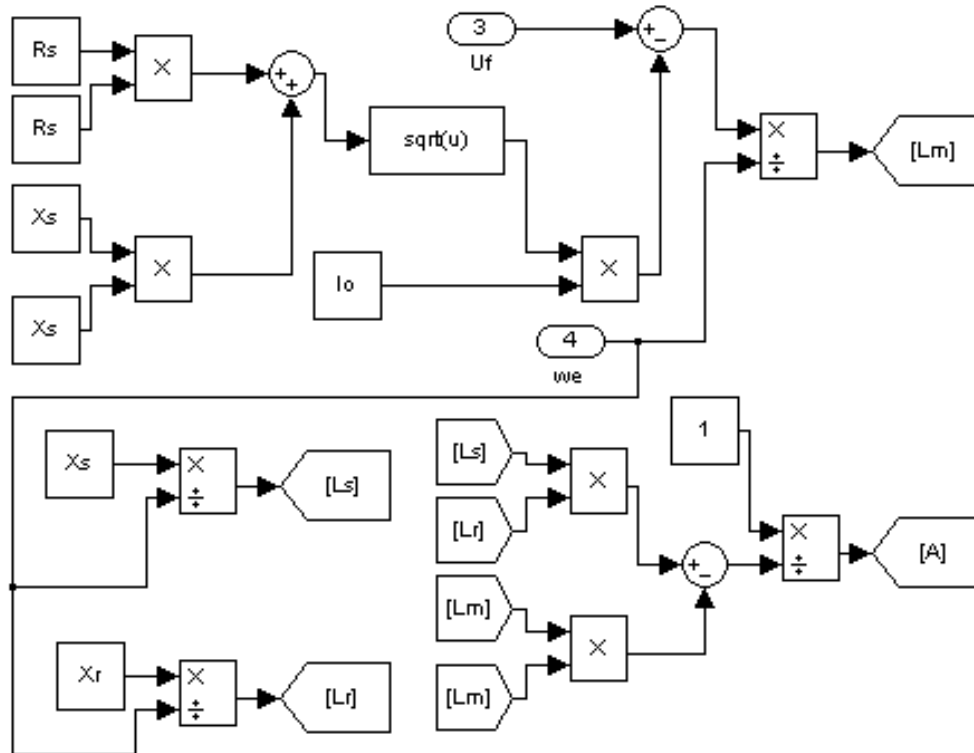


Рисунок 3.9 – Розгортка блоків, що формують індуктивність намагнічуючого контуру та коефіцієнта A.

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

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_s} \quad (3.13)$$

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:

$$X_m = \frac{U_\phi - I_0 \sqrt{R_s^2 + X_s^2}}{I_0}, \quad (3.14)$$

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 3.11 представлена на рисунку 3.10.

$$i_{\alpha s} = A \cdot (\psi_{\alpha s} \cdot L_r' - \psi_{\alpha r} \cdot L_\mu) \quad (3.11)$$

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 А, і результат подається на вихід.

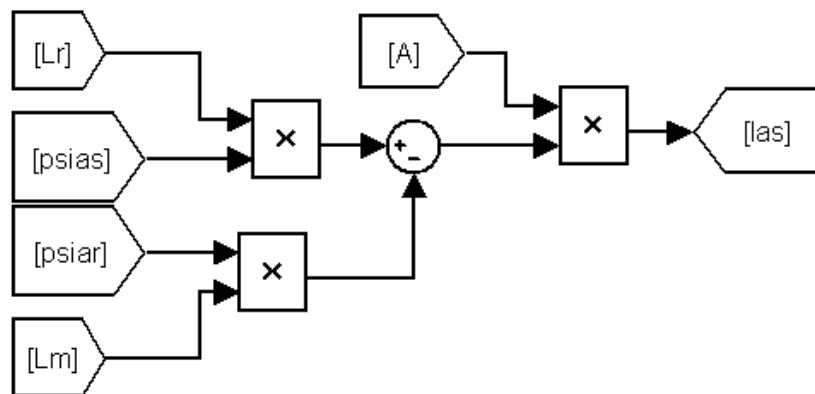


Рисунок 3.10 – Блок, що моделює проекцію вектора струму статора на вісь α

У розгортці блоку (рисунок 3.11) обчислюється значення проекції вектора струму статора на вісь β по формулі восьмого рівняння системи (3.1)

$$i_{\beta s} = A \cdot (\psi_{\beta s} \cdot L_r' - \psi_{\beta r} \cdot L_{\mu}) \quad (3.15)$$

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 А, і результат подається на вихід.

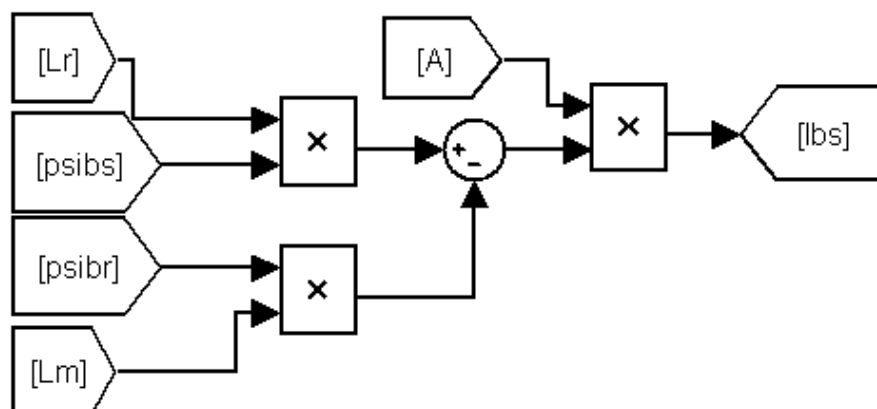


Рисунок 3.11 – Блок, що моделює проекцію вектора струму ротора на вісь β

У блоці на рисунку 3.12 обчислюється значення проекції вектора струму ротора на вісь α по формулі дев'ятого рівняння системи 3.1.

$$i_{\alpha r} = A \cdot (\psi_{\alpha r} \cdot L_r' - \psi_{\alpha s} \cdot L_\mu) \quad (3.16)$$

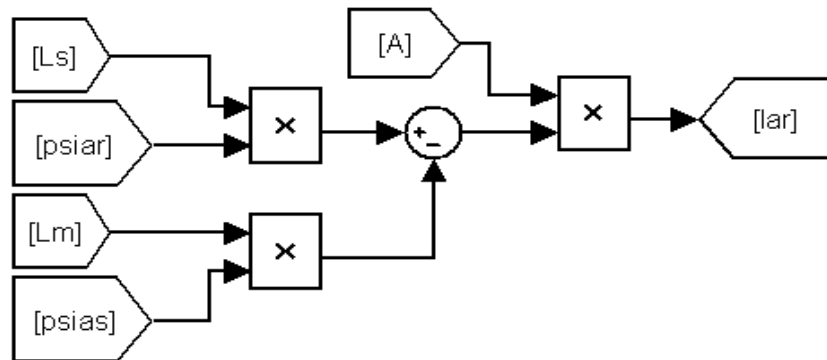


Рисунок 3.12 – Блок, що моделює проекцію вектора струму ротора на вісь α

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.

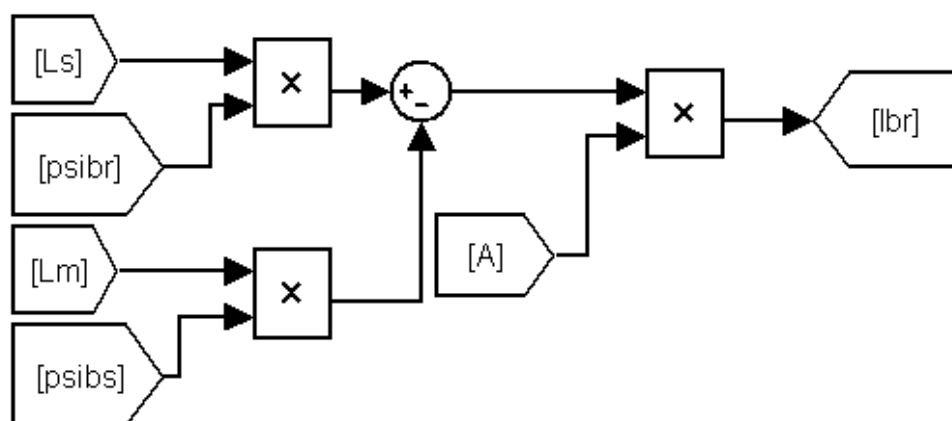


Рисунок 3.13 – Блок, що моделює проекцію вектора струму ротора на вісь β

У цьому блоці обчислюється значення проекції вектора струму ротора на вісь β по формулі десятого рівняння системи (3.1):

$$i_{\beta r} = A \cdot (\psi_{\beta r} \cdot L_r' - \psi_{\beta s} \cdot L_{\mu}) \quad (3.17)$$

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 3.14 обчислюється значення моменту двигуна по формулі п'ятого рівняння системи (3.1), а також частота обертання ротора двигуна по рівнянню 6:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_{\alpha s} \cdot i_{\beta s} - \psi_{\beta s} \cdot i_{\alpha s}) \quad (3.18)$$

$$M - M_c = \left(\frac{J}{p}\right) \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.19)$$

Значення сигналів входів, які перемножуються в блоці «product» – проекція вектора потокозчеплення статора на вісь α і проекція вектора струму статора на вісь β відповідно, а значення сигналів інших двох входів – проекція вектора потокозчеплення статора на вісь β і проекція вектора струму статора на вісь α відповідно. Від добутку перших двох входів віднімаються добуток третього і четвертого, і результат перемножується із значенням блоку «gain», в якому 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».

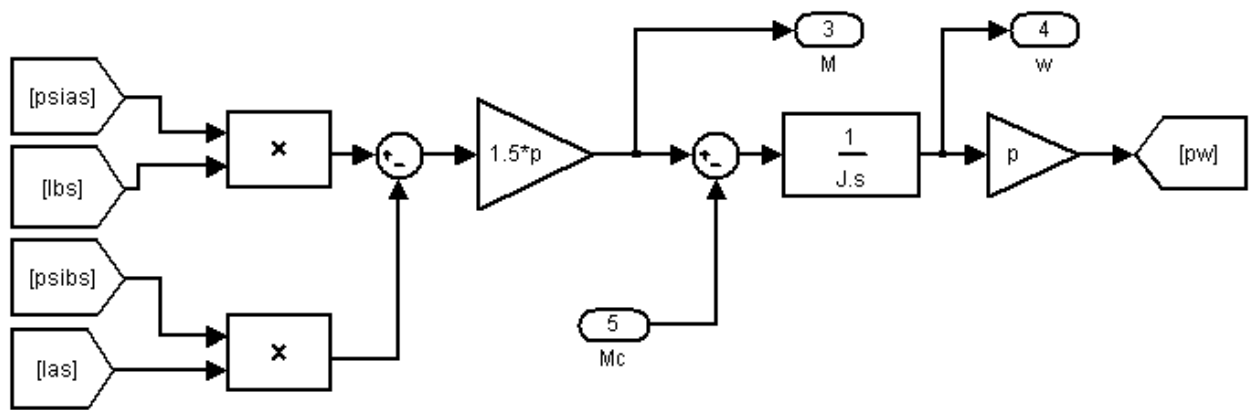


Рисунок 3.14 – Блок, що моделює момент та частоту обертання ротора двигуна

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 3.15 та 3.16 відповідно.

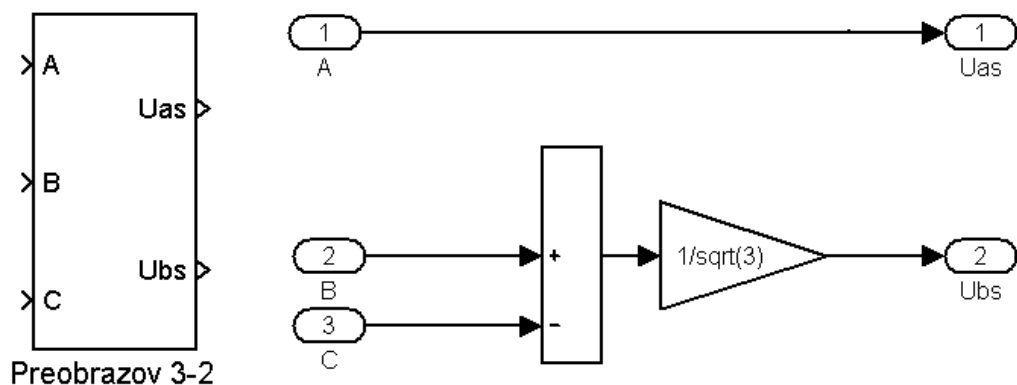


Рисунок 3.15 – Блок, що моделює перерахунок координат системи x, y в систему координат α, β та його розгортка

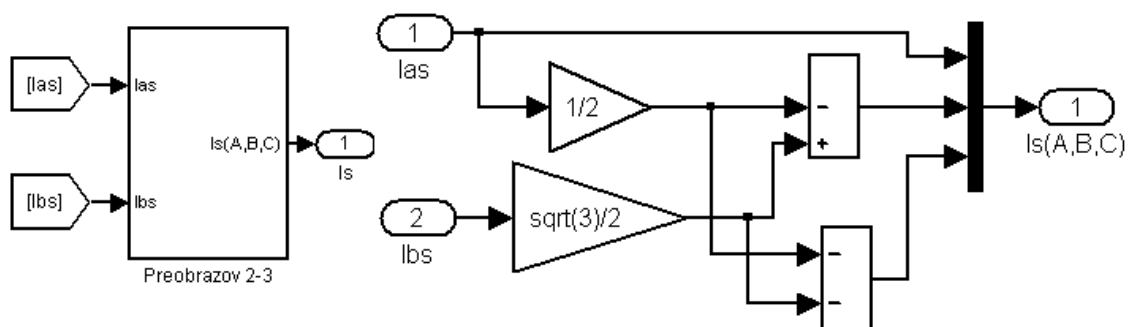


Рисунок 3.16 – Блок, що моделює перерахунок координат системи α, β в систему координат x, y та його розгортка

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 3.17.

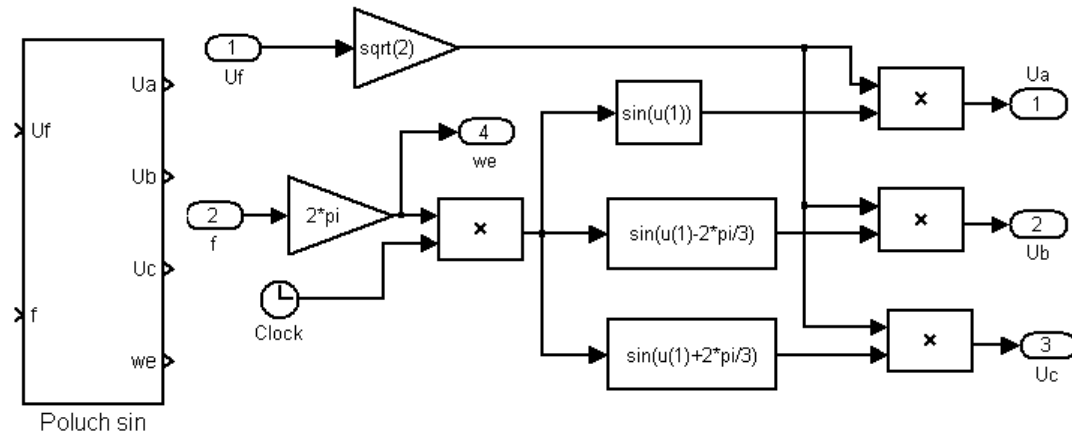


Рисунок 3.17 – Блок, що моделює трифазну напругу та його розгортка

На рисунку 3.17 зображено загальний вид моделі асинхронної машини, де зібрані всі раніше описані блоки. На рисунку 3.19 показана маска підсистеми «Mashina», а на рисунках 3.20 та 3.21 – загальний вид моделі асинхронного приводу та осцилограма його розгону.

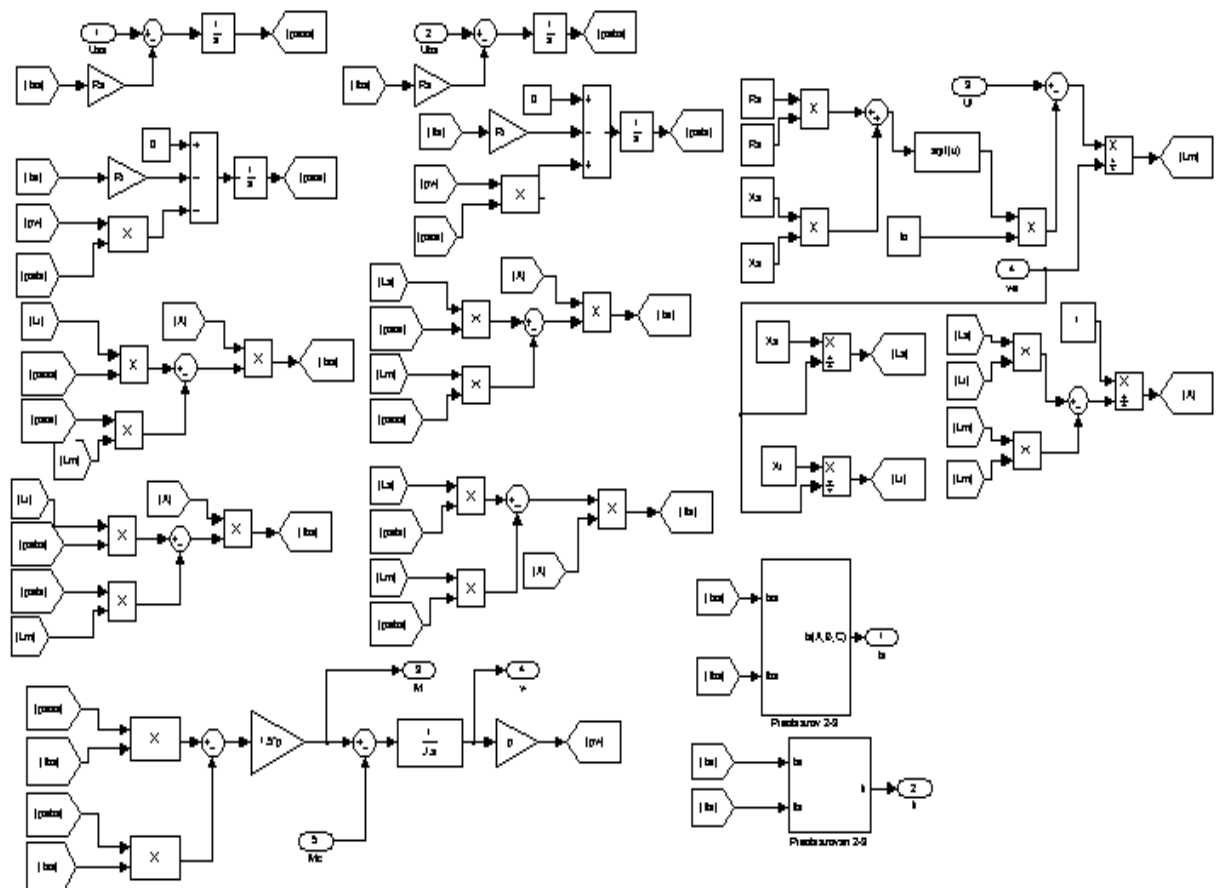
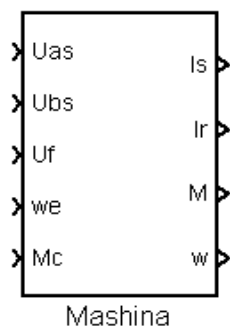


Рисунок 3.18 – Загальний вид моделі асинхронного двигуна



Block Parameters: Asynchronous machine

Subsystem (mask)

Parameters

Rstat

0,016

Rrot

0,016

Xrot

0,188

Xstat

0,11

lo

1,7

mom in

10

p

3

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.19 – Маска моделі асинхронного двигуна

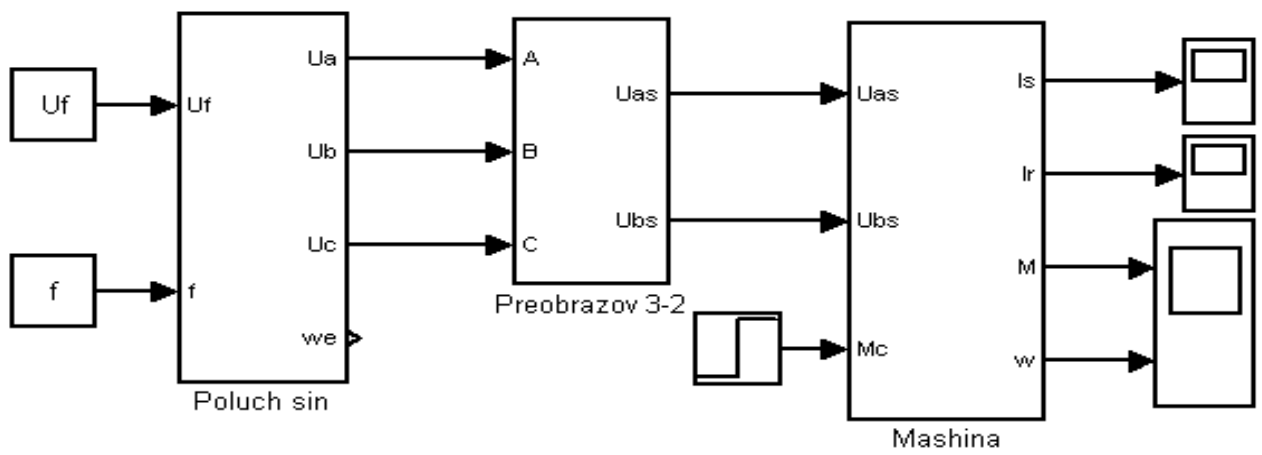


Рисунок 3.20 – Загальний вид моделі асинхронного приводу

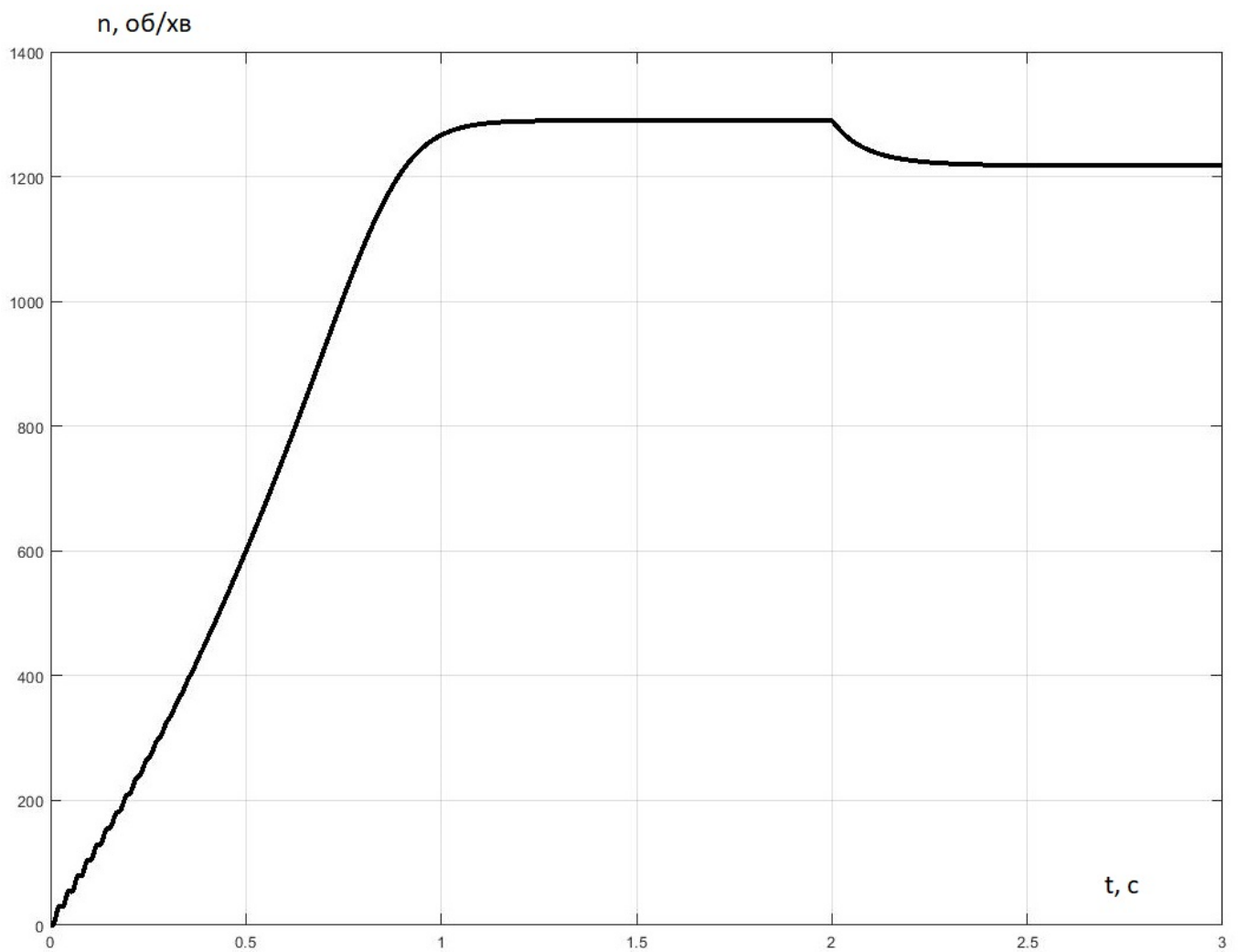


Рисунок 3.21 – Осцилограма розгону двигуна НБ-607

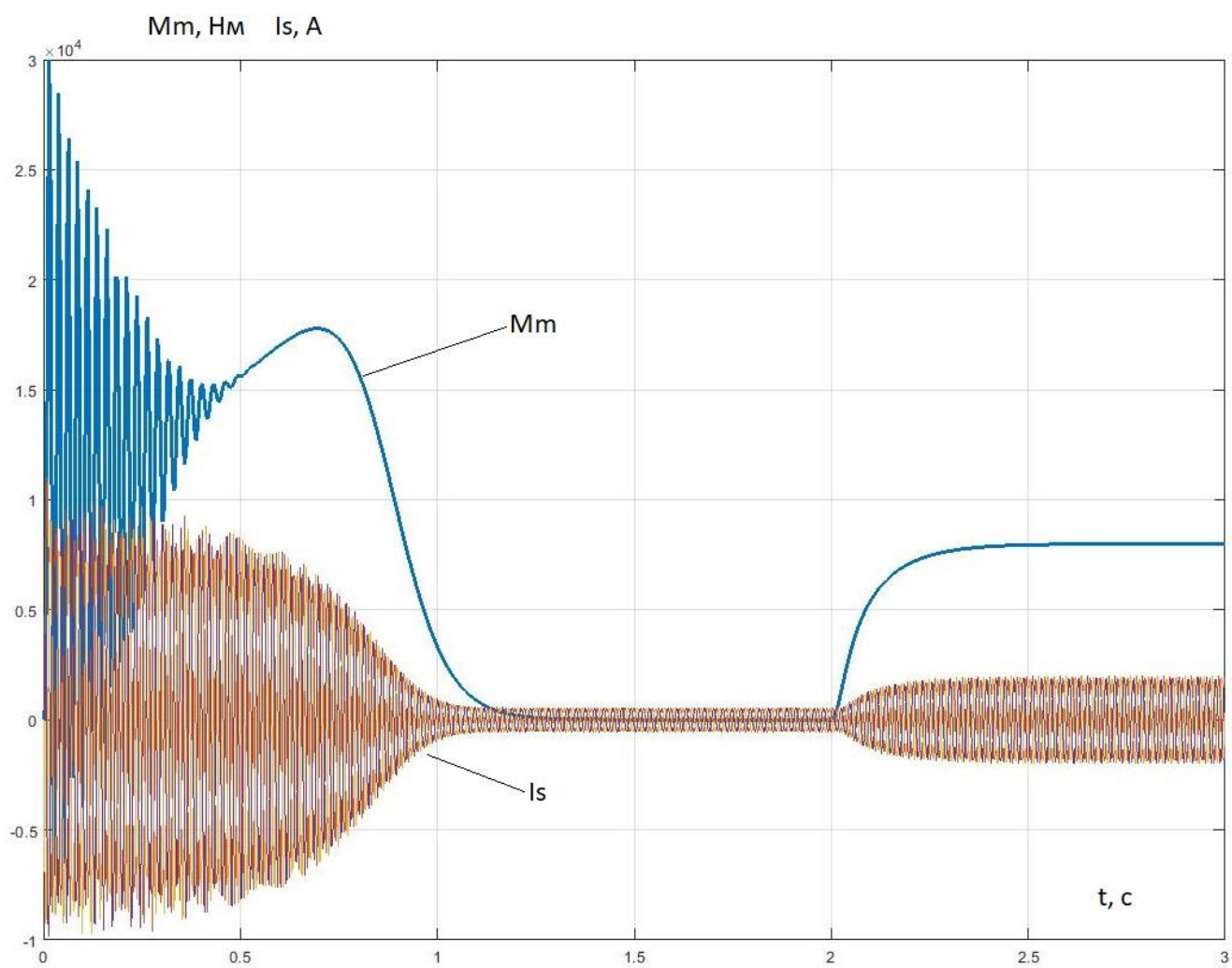


Рисунок 3.21 – Осцилограма електромагнітного моменту та струму статора
двигуна НБ-607

4 Вибір та моделювання роботи частотного перетворювача

4.1 Вибір та обґрунтування силової схеми тягового електропривода

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

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

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

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

В якості вхідного перетворювача ЕРС, експлуатованого на ділянках змінного струму, може бути використаний тяговий трансформатор, а в якості вихідного - дворівневий автономний інвертор напруги. При живленні ЕРС від однофазної мережі змінного струму система перетворення електроенергії в ланцюзі асинхронних тягових двигунів виконується з ланкою постійного струму. У цьому дипломному проєкті ми застосуємо чотириквadrантний перетворювач, який встановлений у

електровозі ДС-3, цей перетворювач повністю задовольняє параметрам та вимогам модернізації електровозу ЧС-8.

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

На сучасних локомотивах з електричною передачею в якості джерела електроенергії використовується тяговий трансформатор, напруга на виході з якого перетворюється у постійну напругу величина якої може стабілізовано змінюватися за необхідним законом.

Отже, вибираємо силову схему - чотириквADRантний перетворювач та дворівневий трифазний мостовий інвертор, який живить три паралельно ввімкнені асинхронні тягові двигуни (рисунки 4.1).

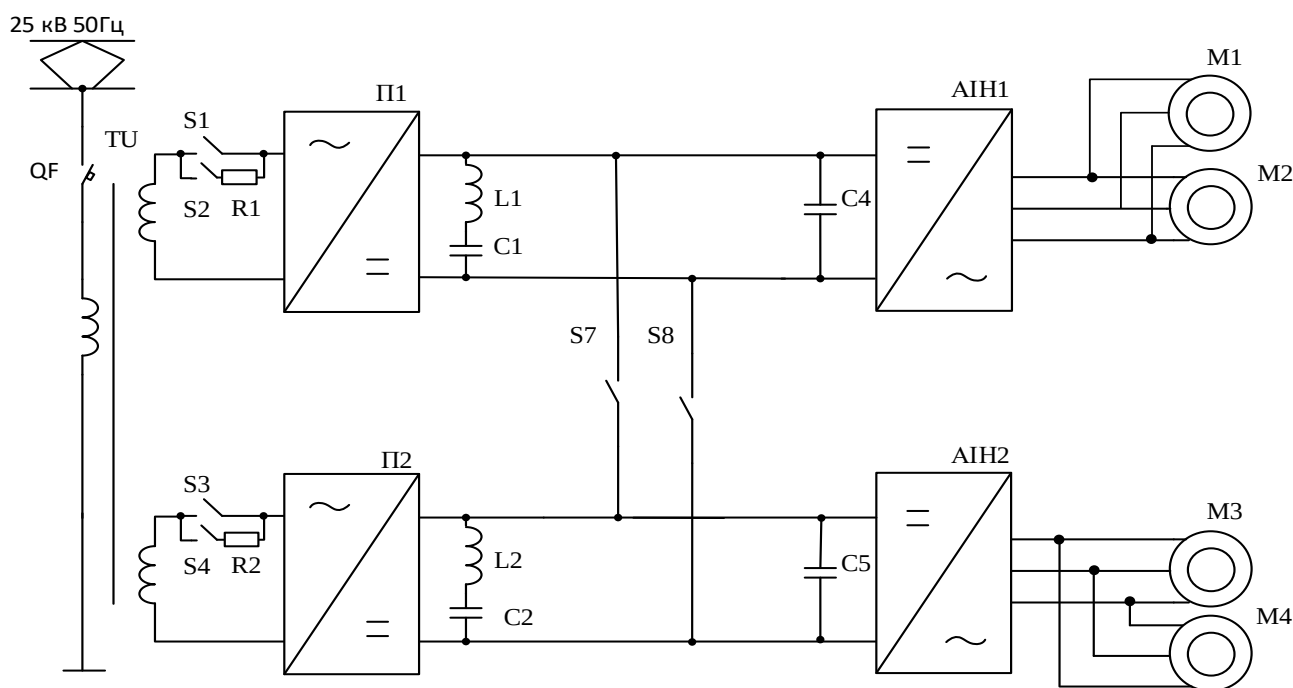


Рисунок 4.1 – Структурна схема тягового електропривода

4.2 Вибір та обґрунтування схеми автономного інвертора напруги

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

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

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

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

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

АІН має характеристиками джерела напруги, його вихідним регульованим параметром є напруга на затискачах АД. Сучасні АІН виконуються на основі повністю керованих силових напівпровідникових приладів біполярних IGBT-

транзисторів з ізолюваним затвором. Розглянемо 3-х фазну мостову схему. Класифікаційні ознаки схеми - наявність ємнісного входного фільтра та включених зустрічно-паралельно керованим ключам діодів зворотного струму. За рахунок почергового переключення вентилів, постійне входна напруга перетворюється в змінну прямокутно-імпульсне вихідна напруга.

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

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

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

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

Слід відмітити, що у інверторному електроприводі загальне розповсюдження отримав традиційний трьохфазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, і зусилля розроблювачів були направлені, в основному, на відпрацювання схемотехніки і режимів перетворювачів частоти при їхній сумісній роботі з трьохфазною машиною, на вдосконалення конструкції трьохфазного електродвигуна

з ціллю зниження впливу високих гармонік струму, викликаних несинусоїдальністю живлячих напруг.

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

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

В наш час для живлення асинхронних двигунів від контактної мережі 25 кВ змінного струму найбільше розповсюдження отримала схема дворівневого автономного інвертора напруги (рисунок 4.2). Виготовлення високовольтних IGBT - модулів дозволяє використовувати дворівневі інвертори для контактної мережі 25 кВ змінного струму, що дає можливість значно спростити силові схеми перетворювачів, знизити затрати на їх виготовлення та експлуатацію. До того ж, на відміну від трирівневих інверторів, вони мають менші габаритні розміри, а також підвищену надійність за рахунок меншої кількості компонентів.

На транспорті автономні інвертори використовують для створення тягових приводів з двигунами змінного струму, у першу чергу асинхронними. Крім того, вони застосовуються також для живлення бортових систем електропостачання транспортних засобів.

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

Схема дворівневого трифазного мостового інвертора отримується простим об'єднанням за загальним джерелом вхідної напруги трьох полу мостових

однофазних інверторів, в цьому випадку при з'єднанні фаз трифазного навантаження в зірку або трикутник не потрібна наявність середньої точки вхідної напруги.

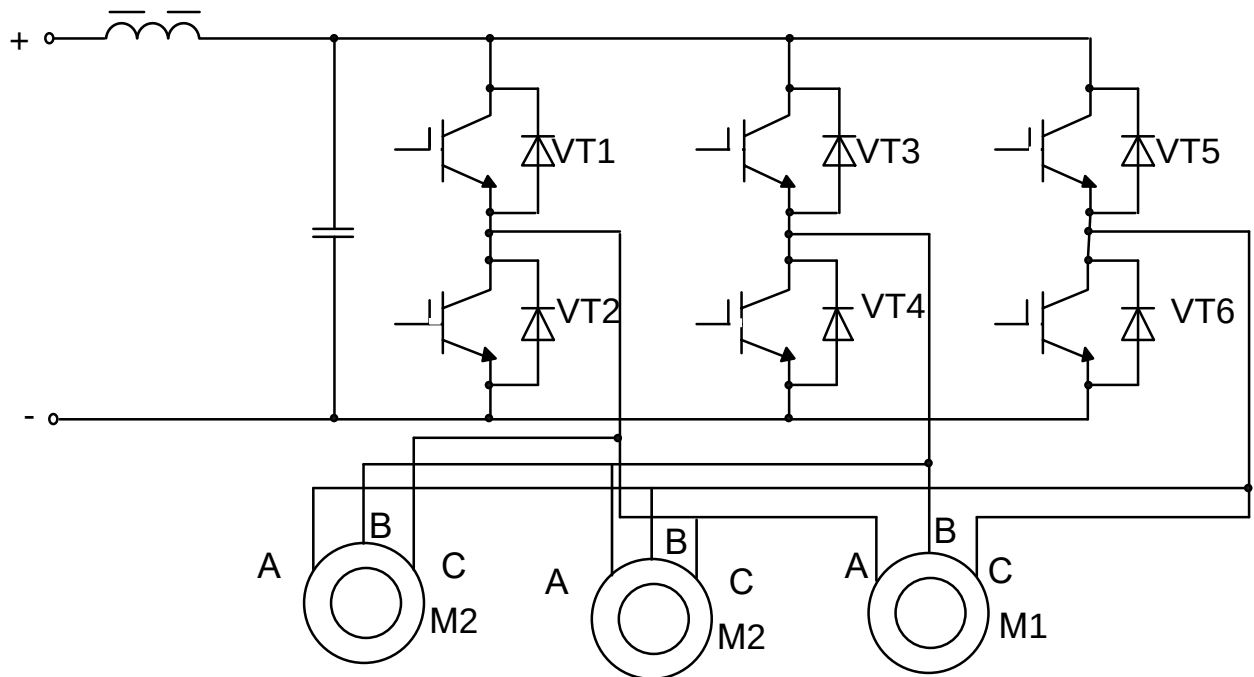


Рисунок 4.2 – Трифазний дворівневий мостовий інвертор напруги

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

4.3.1 Розрахунок та вибір елементної бази чотирьохквadrантного перетворювача

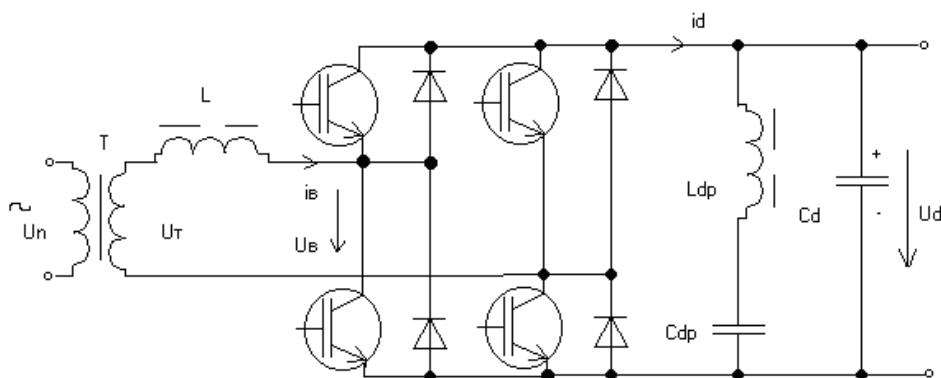


Рисунок 4.3 – Чотирьохквadrантний перетворювач

Перша гармоніка вхідної напруги

$$U_{\epsilon 1} = \frac{C_p}{\sqrt{2}} \cdot u_{d0}, \quad (4.1)$$

де C_p – глибина регулювання

u_{d0} – напруга в проміжній ланці постійного струму

З 4.1 знаходимо максимальне значення першої гармоніки, відповідне максимальному $C_{pm} = 0,85 - 0,9$ і максимальному значенню напруги живлення.

$$U_{\epsilon 1} = \frac{0,85}{\sqrt{2}} \cdot 3000 = 1770 \text{ В}$$

Постійна складова вихідного струму

$$i_{d0} = \frac{P_d}{u_{d0}}. \quad (4.2)$$

де P_d – активна потужність перетворювача, яка може співпадати з потужністю навантаження або рівна її частині, якщо навантаження живиться від декількох паралельно працюючих вхідних перетворювачів, оскільки в нашому випадку для кожного двигуна передбачається свій перетворювач, то потужність перетворювача і навантаження співпадає;

$$i_{d0} = \frac{960000}{3000} = 320 \text{ А}$$

Найбільше значення першої гармоніки вхідного струму:

$$I_{\epsilon 1} = \frac{P_d}{U_{\epsilon 1}} \cdot K_u, \quad (4.3)$$

$$K_u = \frac{u_{n\max}}{u_{n\min}}. \quad (4.4)$$

де $u_{n\max}$ та $u_{n\min}$ – найбільше і найменше значення напруги контактної мережі.

$$K_u = \frac{29000}{19000} = 1,52$$

$$I_{\epsilon 1} = \frac{960000}{1770} \cdot 1,52 = 1030,5 \text{ A}$$

Номінальний середній струм керованого ключа і діода:

$$I_V = I_D = \frac{I_{\epsilon 1}}{\sqrt{2}\pi} + \frac{id_0}{4} \quad (4.5)$$

$$I_V = I_D = \frac{1030,5}{\sqrt{2} \cdot 3,14} + \frac{320}{4} = 332 \text{ A}$$

Амплітудний струм ключа рівний $\sqrt{2} \cdot I_{\epsilon 1}$, амплітуда напруги і комутована напруга u_k рівна u_{d0} , середній струм ключа рівний I_V , середній комутований струм:

$$i_k = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{\epsilon 1} \quad (4.6)$$

$$i_k = \frac{\sqrt{2}}{\pi} 1030,5 = 464,12 \text{ A}$$

Гармоніка з частотою ШІМ у вхідній напрузі U_ϵ :

$$U_\epsilon = 0,312\sqrt{2} U_{\epsilon 1} \quad (4.7)$$

$$U_{\varepsilon} = 0,312\sqrt{2} \cdot 1770 = 7952 \text{ В}$$

Допустима відносна величина неактивних складових вхідного струму:

$$I_{\varepsilon}^* = \sqrt{1 - K_{\text{м}}^2}, \quad (4.8)$$

$$I_{\varepsilon} = I_{\varepsilon}^* \cdot I_{\varepsilon 1}, \quad (4.9)$$

де $K_{\text{м}} = 0,98$ – рекомендоване значення коефіцієнта потужності живлячої мережі змінного струму.

$$I_{\varepsilon}^* = \sqrt{1 - 0,98^2} = 0,19$$

$$I_{\varepsilon} = 0,19 \cdot 1030,5 = 195,79 \text{ А}$$

Необхідна величина опору вхідного фільтру:

$$X = 2\pi f_n L = \frac{U_{\varepsilon}}{I_{\varepsilon}}. \quad (4.10)$$

$$X = \frac{7952}{19579} = 4,061 \text{ Ом}$$

Доцільно використовувати як вхідний фільтр індуктивність розсіяння тягового трансформатора:

$$L_s = \frac{U_{\varepsilon 1}}{I_{\varepsilon 1}} \cdot \frac{X_s^*}{2\pi f_0} \quad (4.11)$$

де f_0 – основна частота (50 Гц);

$\chi_s^* = 0,1$ – відносний індуктивний опір розсіювання.

$$L_s = \frac{1770}{10305} \cdot \frac{0,1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 5,93 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

Підставляючи L_s з (5.11) в (5.10), знаходимо необхідну частоту ШІМ:

$$f_n = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot L_s} \quad (4.12)$$

$$f_n = \frac{4,061}{2 \cdot \pi \cdot 5,93 \cdot 10^{-4}} = 109048 \text{ Гц}$$

Амплітуда вихідного струму другої гармоніки (гармоніки з подвоєною частотою мережі):

$$I_{d2m} = i_{d0} \quad (4.13)$$

Задаючись допустимим коефіцієнтом пульсації напруги на обкладках конденсатора в межах 0,2 – 0,4, визначаємо величини ємності і індуктивності вихідного фільтру:

$$C_{dp} = \frac{I_{d2m}}{2\pi f_2 k_{nu} u_{d0}}, \quad (4.14)$$

де $f_2 = 100$ Гц – частота другої гармоніки.

$$C_{dp} = \frac{400}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 0,3 \cdot 3000} = 7,07 \cdot 10^{-4} \text{ Ф},$$

$$L_{dp} = \frac{1}{2\pi f_2 \cdot k_{nu} u_{d0} \cdot C_{dp}} \quad (4.15)$$

$$L_{dp} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 0,3 \cdot 3000 \cdot 0,000707} = 0,0025 \text{ Гн}$$

Значення вихідного струму гармоніки, що діє з частотою ШІМ:

$$I_z = 0,6 \cdot \frac{\dot{i}_{d0}}{C_{pm}} \quad (4.16)$$

$$I_z = 0,6 \cdot \frac{400}{0,85} = 28235 \text{ А}$$

Згідно розрахованих параметрів чотириквadrантного перетворювача вибираємо силові елементи, які використовуватимуться в реальних схемах. По каталогах фірми «Consept» як силовий ключ вибрані IGBT транзистори виробництва «Mitsubishi», які розраховані на напругу 3300 В і струм 1200 А, що задовольняє розрахованим раніше величинам. Силові діоди вибрані вітчизняного виробництва; тип – Д143-800, розрахованих на напругу 1000-4000В та струм – 2380А.

4.3.2 Розрахунок та вибір елементної бази трифазного мостового інвертора

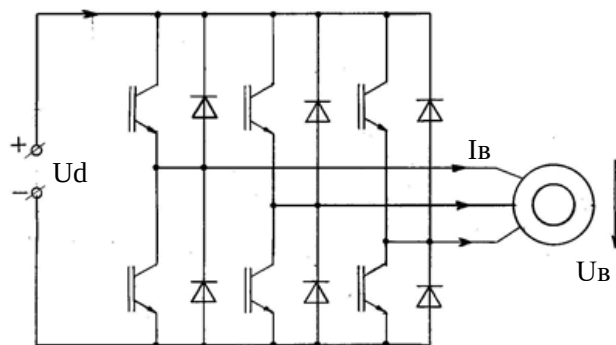


Рисунок 4.4 – Трифазний мостовий інвертор

Номінальне значення першої гармоніки вихідної напруги фази, що діє:

$$U_{B1} = \frac{u_{IN}}{2\sqrt{2}} \cdot K_M . \quad (4.17)$$

де u_{IN} – номінальна напруга живлення;

K_M – коефіцієнт перемодуляції, який рівний 1,15.

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

Значення першої гармоніки вихідного струму фази:

$$I_{B1} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{B1} \cdot \cos \varphi_{B1}} . \quad (4.18)$$

де $\cos \varphi_{B1}$ - 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:

$$i_{do} = \frac{3 \cdot K_M}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot I_{B1} \cdot \cos \varphi_{B1} . \quad (4.19)$$

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

Номінальний середній струм керованого ключа і діода:

$$I_V = I_D = \frac{I_{B1}}{\sqrt{2} \cdot \pi} + \frac{i_{do}}{6} \quad (4.20)$$

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

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

4.3.3 Розрахунок фільтрів

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

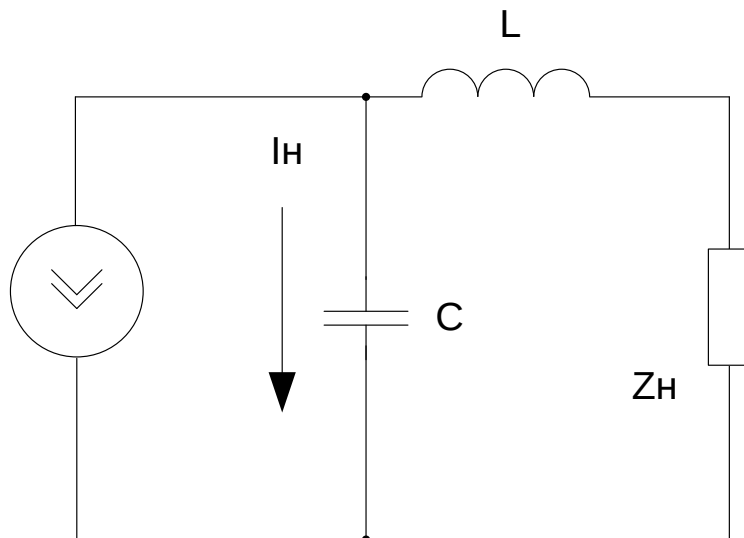


Рисунок 4.5 – Схема фільтра

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

$$\omega C = \frac{I_{\varepsilon}}{U_{\varepsilon}}. \quad (4.21)$$

де ω – частота фільтрованої гармоніки.

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

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

Оскільки опір навантаження фільтру малий, то його необхідно підвищити введенням в схему фільтру послідовного дроселя L (рисунок 4.5). Вважаючи, що вся напруга прикладена до дроселя, отримуємо необхідну індуктивність з умови:

$$\omega L = \frac{U_{\varepsilon}}{I_{н2}} \quad (4.22)$$

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

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

$$\sqrt{2} I_{н2} = K_{ni} I_{в1} \quad (4.23)$$

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

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

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

Для фільтру (рисунк4.3) 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_{Π} 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.

4.4 Математичне моделювання перетворювача частоти

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

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.24)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (4.25)$$

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 «Fsp». 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 «Fsp» задаємо необхідний зсув по фазі 120° та 240° . Модель формування синусоїди представлена на рисунку 4.6.

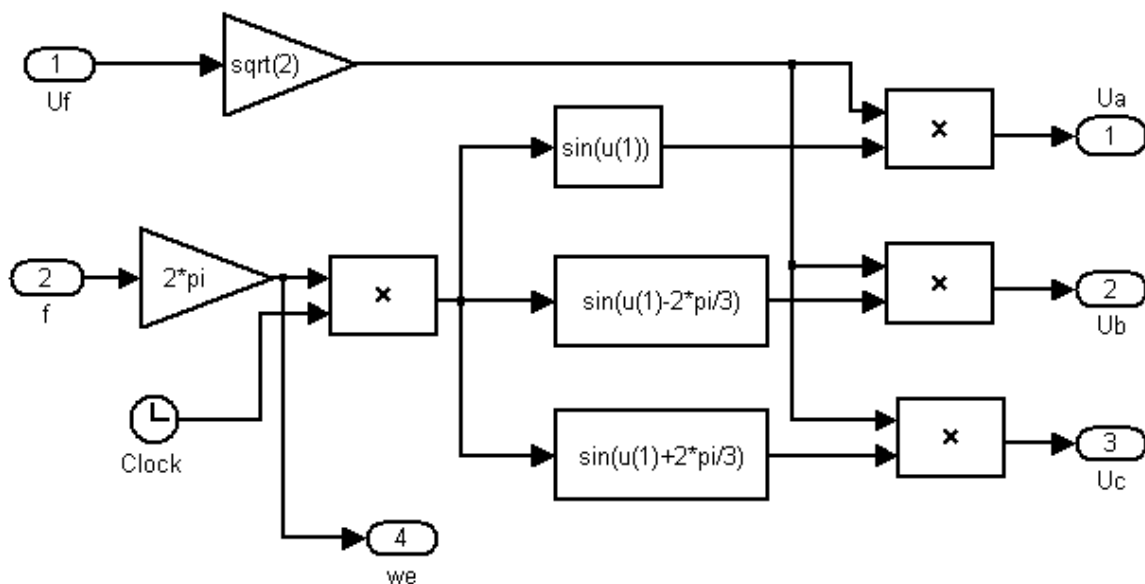


Рисунок 4.6. Формування фази А в частотному перетворювачі

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

$$\frac{U}{f} = \text{const} \quad (4.26)$$

Такий принцип був змодельований в блоках “former.napr.” та “former.chast.” завдяки блокам “step”. Повністю перетворювач частоти представлений на рисунку 4.7. Сформована у відповідності з максимальним пусковим струмом напруга, а також частота перемножуються з блоками Uz та fz і отриманий результат за частотним законом керування двигуном подається на блок формування синусоїди по фазам.

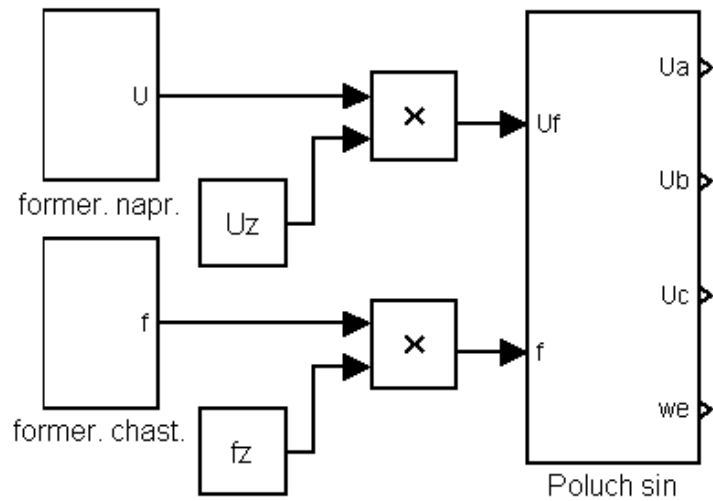


Рисунок 4.7 Модель частотного перетворювача

На рисунку 4.8 показана математична модель асинхронного двигуна (отримана в попередньому пункті) разом з частотним перетворювачем, а на рисунках 4.9 та 4.10 – осцилограми розгону та моменту двигуна при максимальній частоті живлення 50Гц та 100Гц.

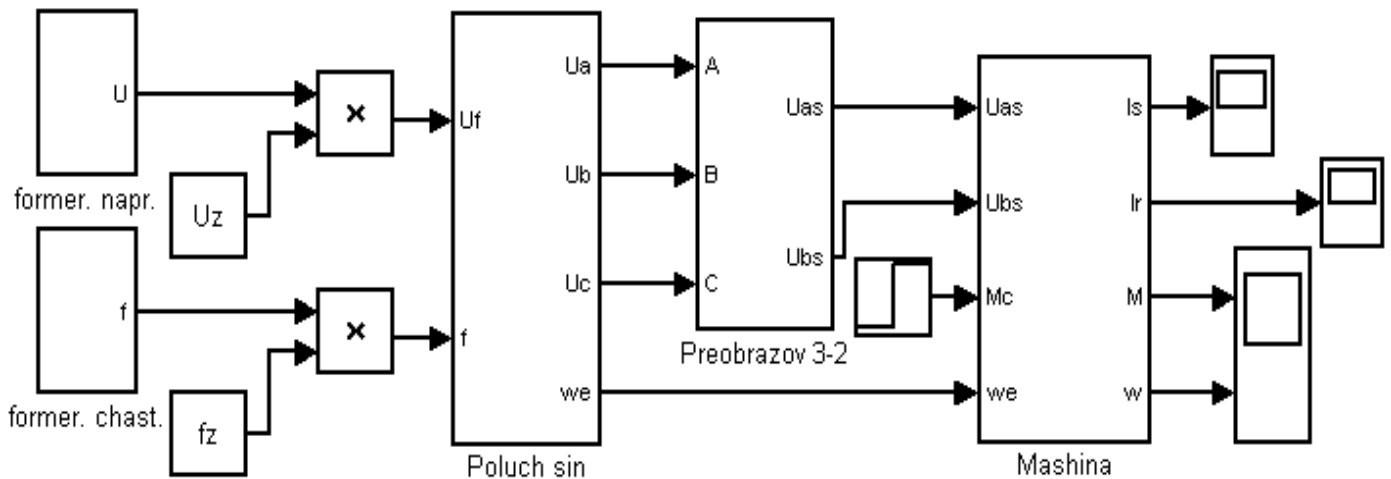


Рисунок 4.8 – Модель асинхронного двигуна разом з частотним перетворювачем

5 Математичне моделювання роботи потяга з модернізованим електровозом ЧС-8.

Прийнято розрізняти два основних способи керування електроприводами змінного струму, які використовують в якості перетворювачів енергії напівпровідникові перетворювачі частоти: частотне і векторне.

При частотному управлінні в ЕП реалізується один зі статичних законів частотного управління. На виході системи управління формується завдання по частоті і амплітуді вихідної напруги ПЧ. Область застосування таких систем: асинхронний електропривод, до якого не пред'являється підвищених статичних і динамічних вимог, вентилятори, насоси та інші загальнопромислові механізми.

При векторному керуванні управління здійснюється за миттєвим значенням змінних. У цифрових векторних системах може виконуватися управління по еквівалентним (усередненим на інтервалі дискретності управління) змінним. У 1971 році Блашке запропонував принцип побудови системи управління асинхронним двигуном, в якому використовувалася векторна модель АД з орієнтацією системи координат по потокозчепленню ротора. Цей принцип називається також прямим управлінням моментом.

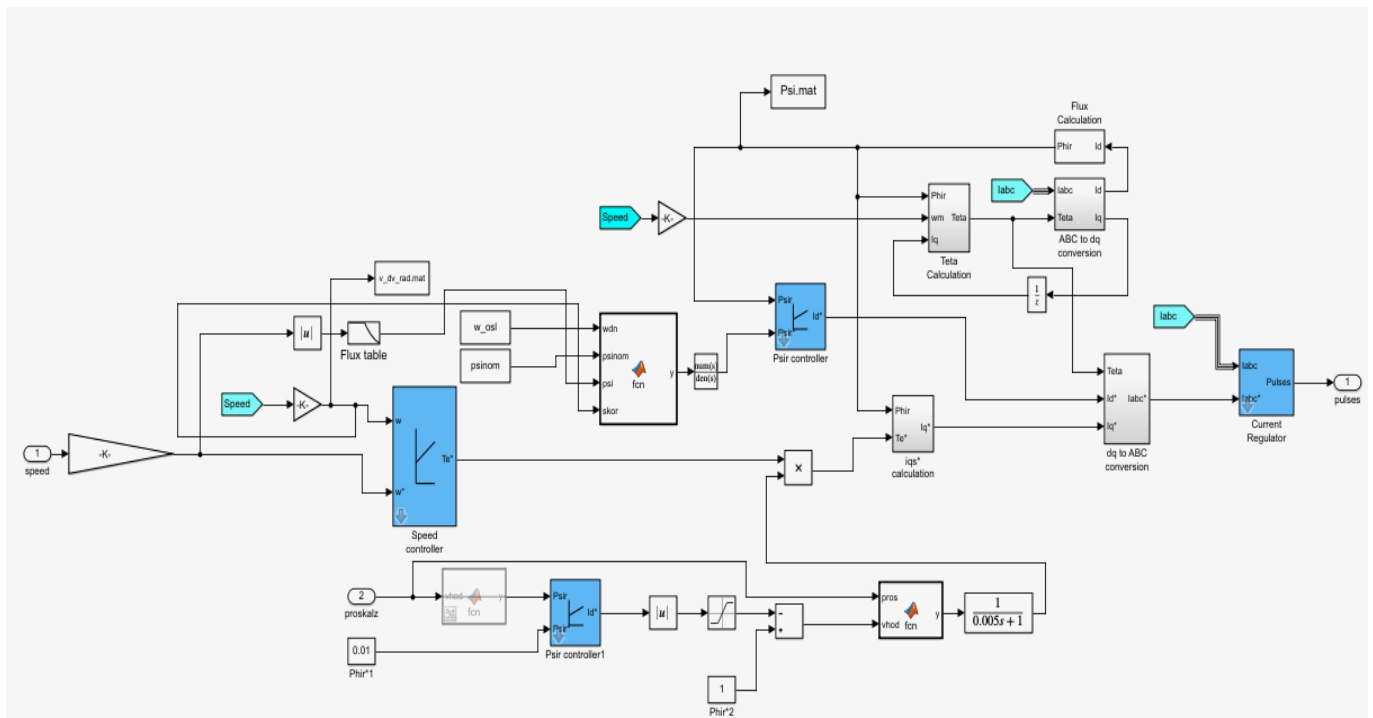
Векторне управління дозволяє істотно збільшити діапазон управління, точність регулювання, підвищити швидкодію електроприводу. Цей метод забезпечує безпосереднє управління обертає двигуна. Момент, що обертається, визначається струмом статора, який створює збуджуюче магнітне поле. При безпосередньому управлінні моментом необхідно змінювати, крім амплітуди, і фазу статорного струму, тобто вектор струму.

Для управління вектором струму, а, отже, положенням магнітного потоку статора щодо обертового ротора потрібно знати точне положення ротора в будь-який момент часу. Завдання вирішується або за допомогою виносного датчика положення ротора, або визначенням положення ротора шляхом обчислень за іншими параметрами двигуна. В якості цих параметрів використовуються струми і напруги статорних обмоток.

[illegible]

81

З метою перевірки працездатності системи була побудована математична модель, на основі якої проводився аналіз режимів роботи. Моделювання системи проводилося для керування електроприводом в 1-й зоні з завданням регулювання швидкості.



Налаштування векторної системи керування відбувалось по принципу налаштування двухконтурної системи підлеглого керування з контурами регулювання швидкості та струму на основі ПІ-регуляторів.

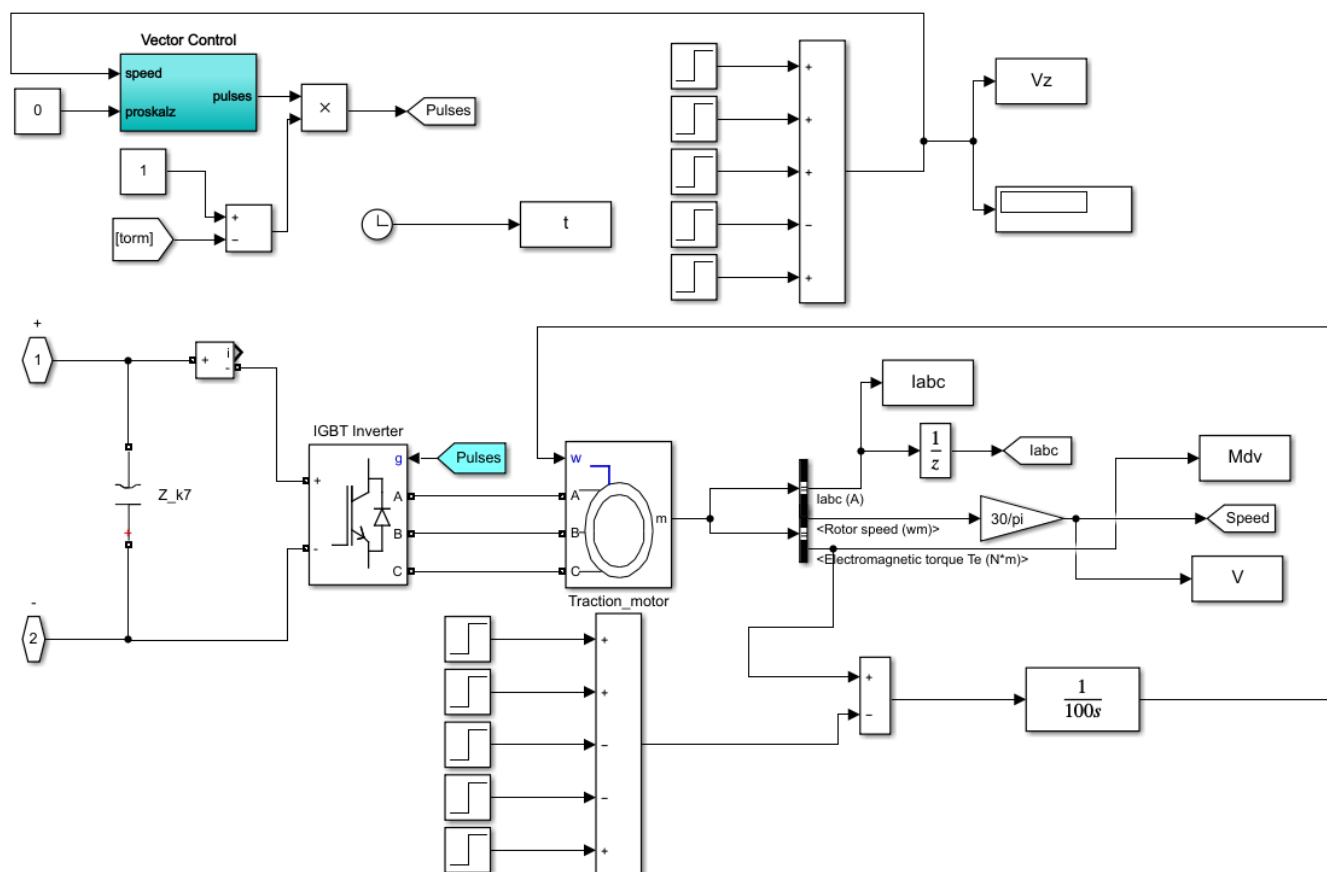


Рисунок 5.3 – Модель асинхронного двигуна разом з частотним перетворювачем та векторною системою керування

Така математична модель дозволила отримати результати роботи асинхронного приводу. На рисунках 4.4 та 4.5 показані осцилограми розгону та моменту двигуна при різних статичних моментах опору, а також різних швидкостях завдання.

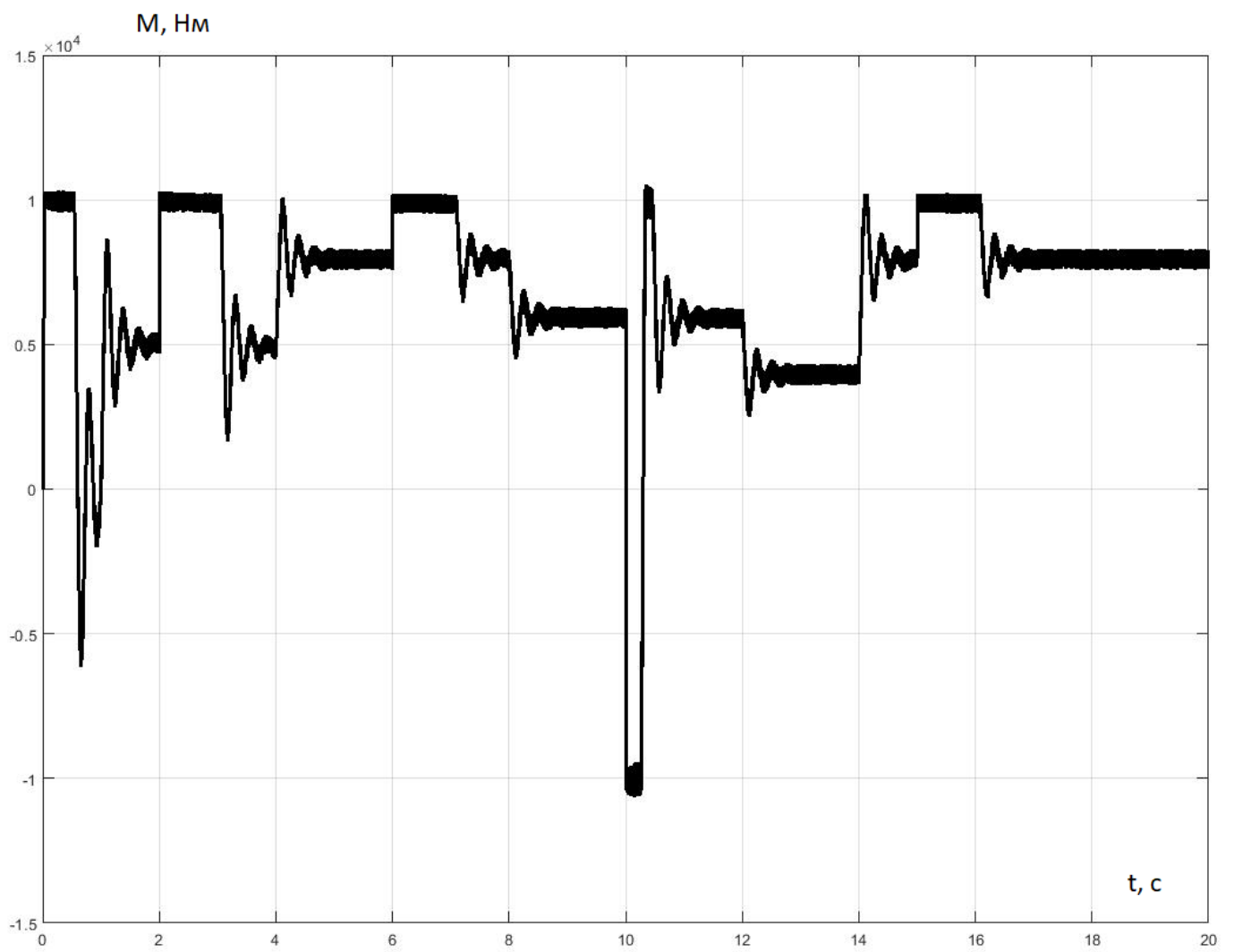


Рисунок 5.4 – Осцилограма моменту асинхронного двигуна при векторному керуванні

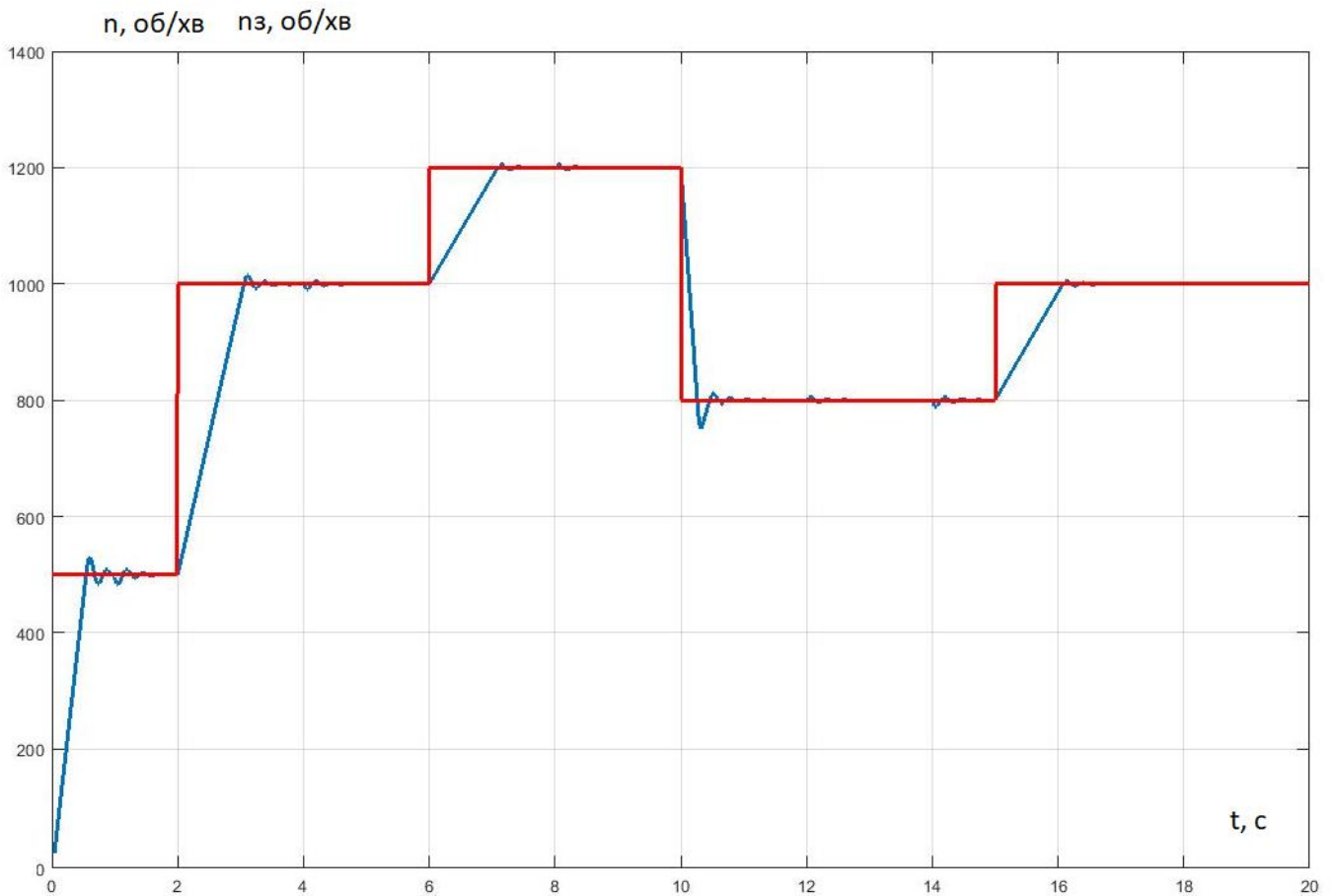


Рисунок 5.5 – Осцилограма швидкості асинхронного двигуна при векторному керуванні та швидкості завдання

Принцип моделювання потяга представлено відбувалось на основі тягових розрахунків [12]. Для того щоб отримати потрібні тягові характеристики електровоза необхідно задавати оптимальну величину абсолютного ковзання тягових двигунів. Для цього в САР прийняте трьох зонне регулювання:

$$\begin{aligned}
 \Phi &= K_1 I_1 \quad - \text{при } I_1 = \text{const}, (\text{перша зона регулювання}), \\
 \Phi &= K_1 I_1 \quad - \text{при } P_1 = \text{const}, (\text{друга зона регулювання}) \\
 U_1 &= K_2 I_1 \quad - \text{при } P_1 = \text{const}, (\text{третя зона регулювання}).
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

де I_1 – діюче значення першої гармонічної фазного струму;

Φ – магнітний потік;

K_1 – перша константа регулювання;

K_2 – друга константа регулювання;

P_1 – активна потужність, підведена до ТАД;

U_{d1} – напруга на виході випрямляча.

При розрахунку тягових та регулювальних характеристик тягового асинхронного електроприводу, в замкненій системі автоматичного регулювання, для сталих режимів, прийняті наступні допущення:

- розрахунок режимів ТАД ведеться по першим гармонічним фазного струму і напруги;

- асинхронна машина симетрична, повітряний зазор постійний, індукція в повітряному зазорі впродовж по розточці статора розподілена по синусоїдальному закону;

- насичення магнітного кола враховуємо тільки в продовжній вісі машини, індуктивності розсіяння статора та ротора прийняти постійними і незалежними від ступеня насичення, а також статизмом регуляторів можна знехтувати.

На основі попередніх викладок була створена математична модель роботи потяга з модернізованим електровозом ЧС-8. Така модель потяга включає в себе окремі блоки, що моделюють роботу трансформатора, випрямляча, автономного інвертора напруги, асинхронного двигуна НБ-607 з векторною системою керування та роботу механічної частини з реалізацією тяги електровоза, профілю шляху та гальмівного зусилля. На рисунку 5.6 показана модель потяга з асинхронним приводом, а на рисунках 5.7-5.9 – осцилограма його розгону на ділянці з профілем шляху Харків-Мерефа та з вагою потяга 1610 т., що відповідає масі електровоза та потяга з 24 вагонами.

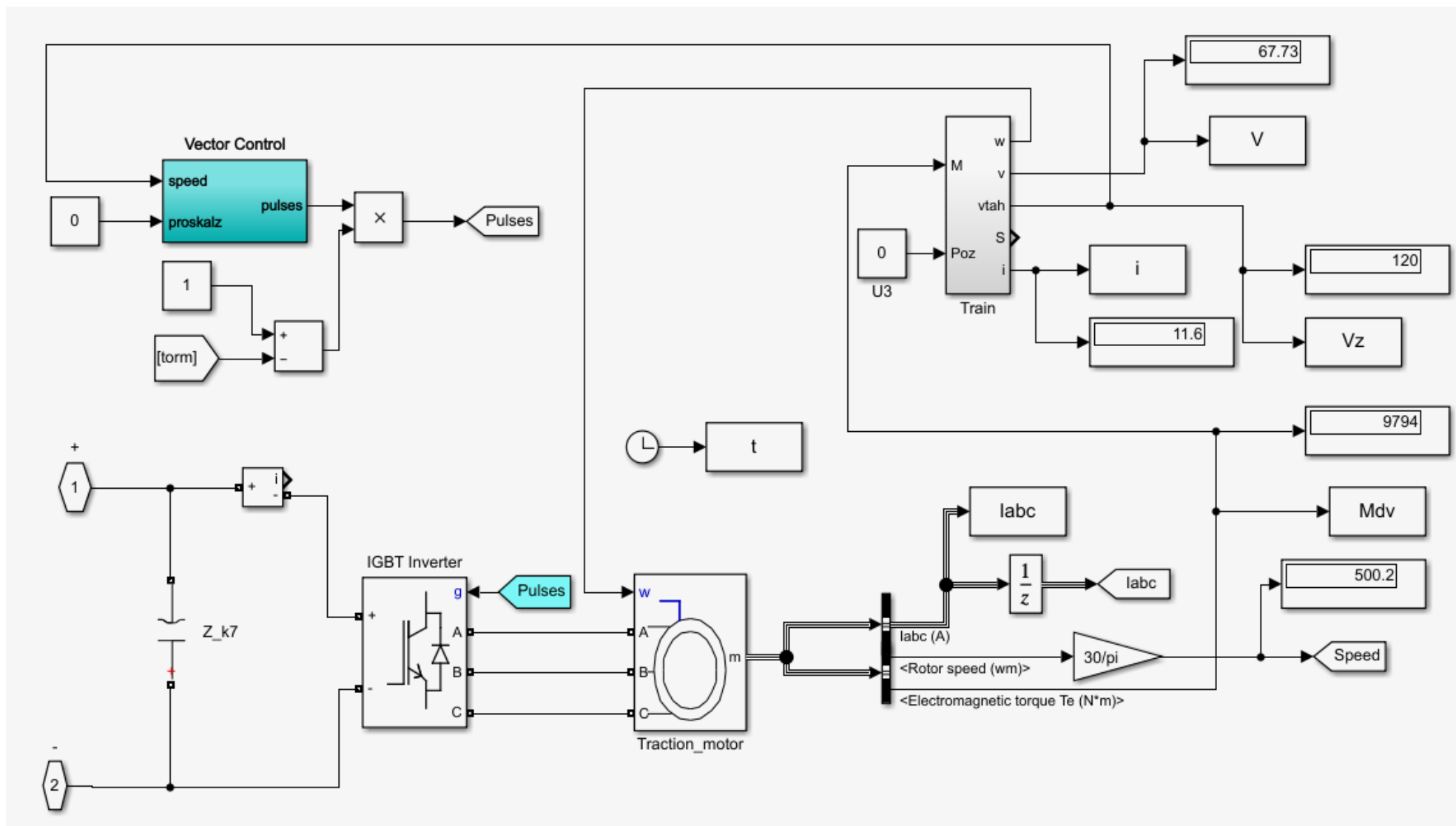


Рисунок 5.6 – Модель потяга з асинхронним приводом

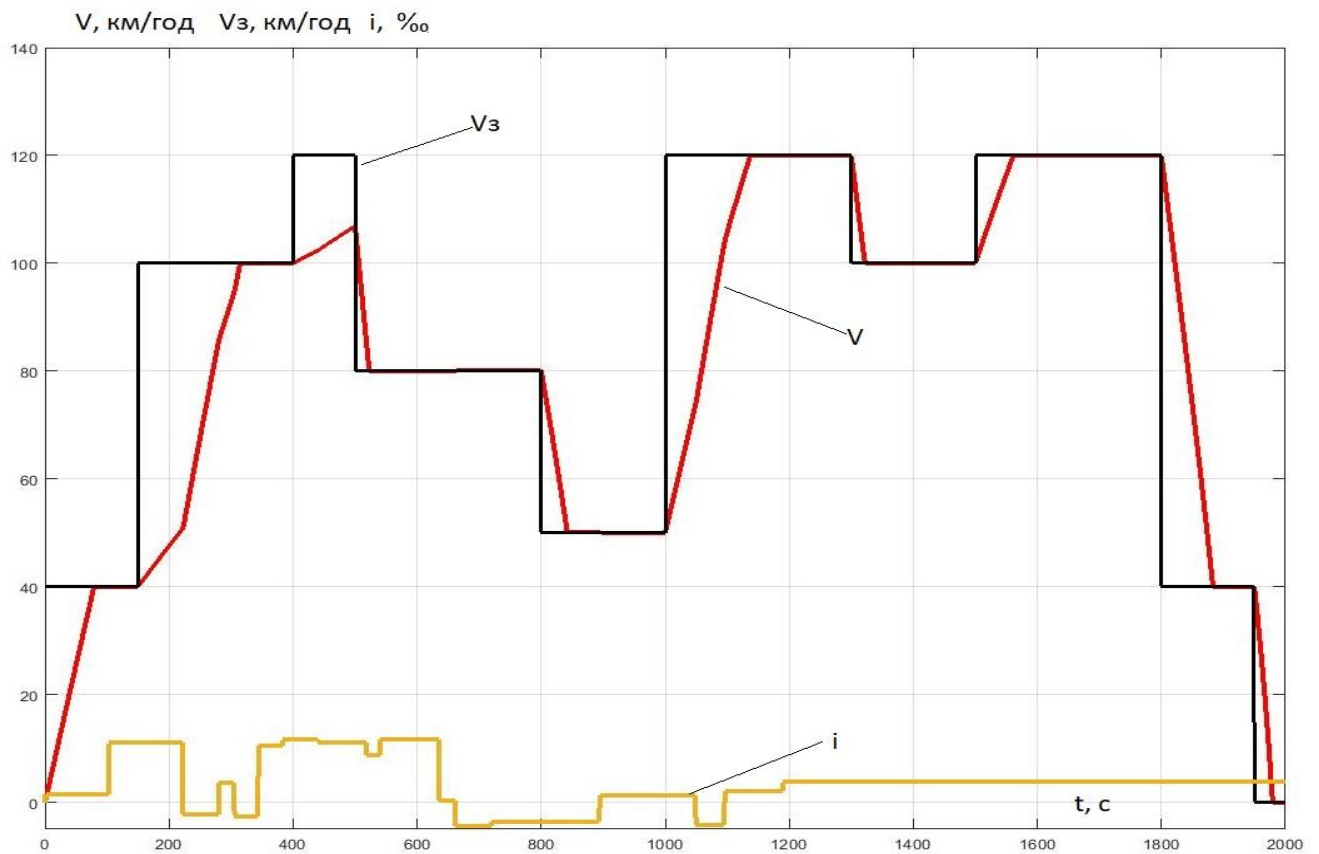


Рисунок 5.7 – Фактична швидкість руху потяга з асинхронним приводом та швидкість завдання

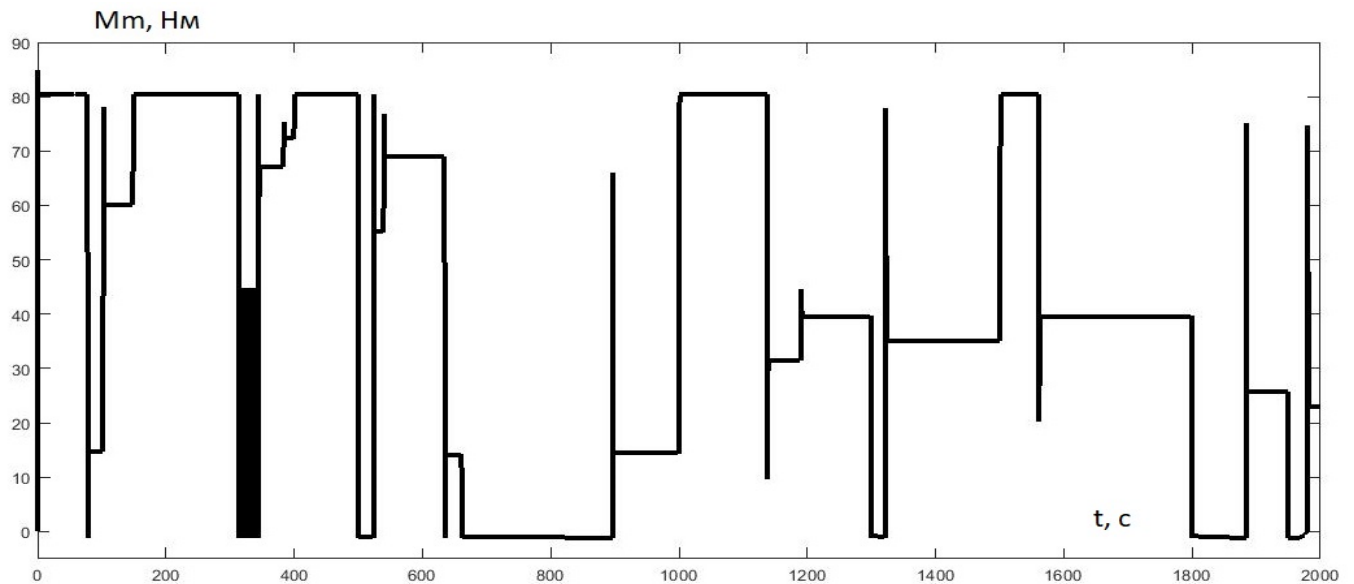


Рисунок 5.8 – Момент двигуна при русі потяга

Як видно з рисунку 5.7 запровадження асинхронного тягового електроприводу із векторним керуванням дає змогу отримати сталу швидкість руху поїзда незалежно

від змін профілю шляху та швидкості завдання.6 Визначення економічного ефекту від запровадження асинхронних двигунів на електровозі змінного струму

6.1 Коротка характеристика запропонованого рішення

Електровози ЧС-8 призначені для роботи з пасажирськими поїздами на залізницях, електрифікованих на змінному струмі (25 000 В, 50 Гц). Все устаткування електровоза розраховане на надійну роботу при напрузі в контактній мережі від 19 000 до 29 000 В, а також при зміні температури навколишнього повітря поза кузовом електровоза від -50 до +40°C.

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

При модернізації буде демонтовано 6 двигунів постійного струму AL-4442nP, та реостатно-контакторну систему керування ними, яка складається з 6 резисторів та 18 контакторів. Замість цього буде встановлено 3 перетворювача частоти, які складаються з випрямляча та інвертора напруги та 6 тягових асинхронних двигунів АД-914. Порівняльна характеристика базових та нових двигунів наведена у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Порівняльна характеристика базового та нового двигунів

Параметр	Значення	
	AL-4442nP	АД-914
Напруга живлення, В	800	1870
Струм, А	1140	450
Потужність, кВт	850	920
ККД, %	93,1	95,5
Маса, кг	2950	2190

6.2 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 ($\mathcal{E}_T$) визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів за розрахунковий період (P_T) над вартісною оцінкою сукупних витрат за розрахунковий період (3_T).

$$\mathcal{E}_T = P_T - 3_T \quad (6.1)$$

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

$$\alpha_t = (1 + E_n)^{t_p - t}, \quad (6.2)$$

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 статичного перетворювача 926800 грн. Для модернізації необхідно дві одиниці, тому загальна вартість 1853600 грн. Вартість тягового двигуна 195000 грн. (Siemens). Для модернізації необхідно шість одиниць, тому загальна вартість 1170000 грн. Загальна вартість обладнання 3023600 грн.

Таблиця 6.2 – Капітальні вкладення на придбання обладнання

Назва обладнання	Кількість, шт.	Вартість одиниці, грн	Усього, грн
Випрямляч	2	945000	1890000
Інвертор напруги	2	1001280	2002560
Тяговий двигун АД-914	8	409500	3276000
Разом			7168560

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 6.3, де розрахована основна і додаткова заробітна плата слюсарів п'ятого розряду по видам виконаних робіт, а також загальна сума трудових витрат.

Витрати складуть, грн.

$$B_{\text{МОНТ}} = Z_M \cdot m, \quad (6.3)$$

де m - кількість обладнання, од.;

Z_M - витрати на монтаж обладнання, грн

Трудові витрати на демонтаж складають

$$B_{\text{ДЕМОНТ}} = Z_M \cdot m, \quad (6.4)$$

де m - кількість обладнання, од.;

Z_D - витрати на демонтаж обладнання, грн

Таблиця 6.3 – 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	5	50,46	1	252,3	25,23	55,506	333,4
Демонтаж контактора	5	5	50,46	0,5	126,15	12,615	27,753	166,51
Демонтаж базового двигуна	5	5	50,46	3	756,9	75,69	166,518	999,11
Монтаж випрямляча	5	3	50,46	3	454,14	45,414	99,9108	599,46
Монтаж інвертора	5	5	50,46	5	1261,5	126,15	277,53	1665,2
Монтаж асинхрон. двигуна	5	5	50,46	3	756,9	75,69	166,518	999,11

Підставляємо значення та отримуємо:

$$B_{\text{ДЕМОНТ.Р}} = 333,4 \cdot 8 = 2667,2 \text{ грн}$$

$$B_{\text{ДЕМОНТ.К}} = 166,51 \cdot 18 = 2997,18 \text{ грн}$$

$$B_{\text{ДЕМОНТ.Д}} = 999,11 \cdot 8 = 7992,88 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ.В}} = 599,46 \cdot 2 = 1198,92 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ.ІН}} = 1665,2 \cdot 2 = 3330,4 \text{ грн}$$

$$B_{\text{МОНТ.Д}} = 999,11 \cdot 8 = 7992,88 \text{ грн}$$

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

$$\Delta K = \Sigma B_{\text{ПО}} + B_{\text{МОНТ}} + B_{\text{ДЕМОНТ}}, \quad (6.5)$$

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

$$\Delta K = 7168560 + 2667,2 + 2997,18 + 7992,88 + 1198,92 + 3330,4 + 7992,88 = 7194739,58$$

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:

$$A = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{1000 \cdot 60}, \quad (6.6)$$

де U – напруга на струмоприймачу електровоза, В;

I – величина активного струму, А;

Δt – час дії струму, хв.

На рисунку 6.1 показано рівень спожитої електричної енергії електровозом з різними типами приводів.

Виходячи з рисунку 6.1, отримуємо споживання електровозом із базовими двигунами при русі по маршруту Київ – Житомир 1929,2 кВт·год, при русі у зворотному напрямку – 2124,2 кВт·год. Для модернізованого варіанту виходячи з правил тягових розрахунків споживання склало 1401,5 та 1650,5 кВт·год відповідно. З вище сказаного визначимо різницю споживання електроенергії за оберт за розрахованим графіком:

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

Середньодобовий пробіг електровоза визначається за формулою

$$L_c = \frac{24}{T_l} \cdot 2 \cdot L = \frac{48L}{T_l}, \quad (6.7)$$

де L – відстань ділянки обертання локомотива ($L = 162 \text{ км}$);

T_l – повний обіг локомотива, год.

Час оберту електровозу:

$$T_l = \frac{2L}{V_{\text{дїл}}} + t_{\text{об}} + t_{\text{ос}} \quad (6.8)$$

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

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

$t_{\text{ос}}$ - час простою в основному депо, $t_{\text{ос}} = 10,5 \text{ год}$;

L – довжина ділянки, $L = 162 \text{ км}$.

$$T_l = \frac{2 \cdot 162}{72} + 7 + 10,5 = 24 \text{ год}$$

Для електровоза повний обіг включає час на про слідування шляху та час на навантажувально-розвантажувальні операції. Повний обіг локомотива складає 24 год.

$$L_c = \frac{48 \cdot 162}{24} = 324 \text{ км}$$

Визначимо пробіг локомотива за рік

$$L_{\text{рік}} = 365 \times L_c \quad (6.9)$$

де L_c - пробіг середньосуточний, км

$$L_{\text{рік}} = 365 \times 324 = 118260 \text{ км}$$

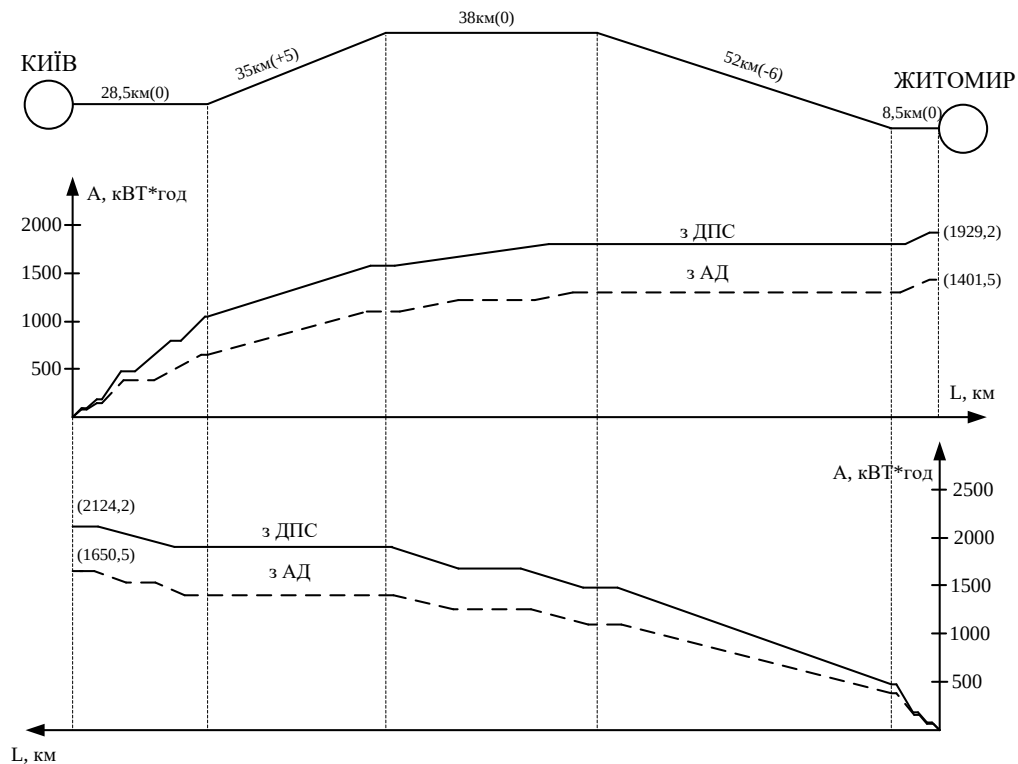


Рисунок 6.1 – Графік залежності використання електроенергії на ділянці

162 км

Визначимо річну економію електроенергії на новому електровозі за формулою:

$$\Delta E_{річ} = \Delta P \times K_{об} \times e, \quad (6.10)$$

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

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

$$K_{об} = \frac{365 \cdot 24 - \sum T_{KP2} - \sum T_{KP1} - \sum T_{TP1} - \sum T_{TP2} - \sum T_{TP3} - \sum T_{mo3}}{T_l}, \quad (6.11)$$

де T_l - час обертання локомотива, год;

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

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

$\sum T_{mo}$ - простій на ТО, год.

Простій на ремонті за рік

$$\sum T = \sum M \cdot t_{рем}. \quad (6.12)$$

Кількість ремонтів і-го виду за рік

$$\sum M_i = \frac{L_{річ}}{n_{рем_i}}, \quad (6.13)$$

де $n_{рем_i}$ – міжремонтний пробіг і-го виду ремонту, км;

Таблиця 6.4 – Міжремонтні пробіги для електровозу ЧС-8

Вид ремонту	ТО-3	ПР-1	ПР-2	ПР-3	КР-1	КР-2
Пробіг, км	12500	25000	150000	300000	600000	1800000

$$\sum M_{KP2} = \frac{118260}{1800000} = 0,0657$$

$$\sum M_{KP1} = \frac{118260}{600000} - 0,0657 = 0,131$$

$$\sum M_{mp3} = \frac{118260}{300000} - 0,0657 - 0,131 = 0,198$$

$$\sum M_{mp2} = \frac{118260}{150000} - 0,0657 - 0,131 - 0,198 = 0,394$$

$$\sum M_{mp1} = \frac{118260}{25000} - 0,0657 - 0,131 - 0,198 - 0,394 = 3,94$$

$$\sum M_{mo3} = \frac{118260}{12500} - 0,0657 - 0,131 - 0,198 - 0,394 - 3,94 = 4,73$$

$$\sum T_{KP2} = 0,0657 \cdot 336 = 22,08 \text{ год}$$

$$\sum T_{KP1} = 0,131 \cdot 240 = 31,44 \text{ год}$$

$$\sum T_{mp3} = 0,198 \cdot 91 = 18,02 \text{ год}$$

$$\sum T_{mp2} = 0,394 \cdot 36 = 14,18 \text{ год}$$

$$\sum T_{mp1} = 3,94 \cdot 15 = 59,1 \text{ год}$$

$$\sum T_{mo3} = 4,73 \cdot 6 = 28,38 \text{ год}$$

$$K_{об} = \frac{365 \cdot 24 - 22,08 - 31,44 - 18,02 - 14,18 - 59,1 - 28,38}{24} = 358$$

Отже, загальна економія електричної енергії за рік одним електровозом:

$$\Delta E_{ел.річ} = 1001,4 \cdot 358 \cdot 6,9 = 2473658 \text{ грн}$$

При виконанні електровозу ТО-2 завжди проводять огляд двигуна постійного струму (ДПС). При заміні ДПС на асинхронний двигун огляд двигуна виконувати не потрібно (через відсутність щіточко-колекторного вузла). В цьому випадку зменшується час виконання ТО-2.

Розрахуємо кількість ТО-2 за рік:

$$\sum M_{ТО-2} = \frac{365}{2} - \sum M_{КР2} - \sum M_{КР1} - \sum M_{мр3} - \sum M_{мр2} - \sum M_{мр1} - \sum M_{мо3}$$

$$\sum M_{ТО-2} = \frac{365}{2} - 0,0657 - 0,131 - 0,198 - 0,394 - 3,94 - 4,73 = 173,04$$

Час на обслуговування ДПС при виконанні ТО-2 0,5год., а тому економію коштів на виконання ТО-2 можна розрахувати за наступною формулою:

$$\Delta E_{ТО-2,річ} = 173,04 \cdot 50,46 \cdot 0,5 = 4365,8 \text{ грн}$$

Отже, загальна економія коштів за рік наступна:

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

$$\Delta E_{річ} = 2473658 + 4365,8 = 2478024,8 \text{ грн.}$$

Розрахунок економічного ефекту здійснюємо за формулами 6.1. і 6.2 та заносимо до таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Розрахунок економічного ефекту за роками експлуатації

Показник	Розрахунковий період (роки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Капітальні вкладення K_t , тис.грн.	7195									
Економія поточних витрат Δu_t , тис. грн	2478	2478	2478	2478	2478	2478	2478	2478	2478	2478
Економічний ефект E_t , тис.грн.	-2359,5	2478	2478	2478	2478	2478	2478	2478	2478	2478
Коефіцієнт приведення α_t	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621	0,564	0,513	0,467	0,424	0,386
Економічний ефект з урахуванням приведення $E_t \cdot \alpha_t$	-4288,2	2047,9	1861,8	1692,5	1538,6	1398	1271	1156	1050	955,4
Економічний ефект наростаючим підсумком $E_1 + E_2 + \dots + E_k$ тис.грн.	-4288,2	-2240,2	-378,5	1314,0	2852,7	4251	5523	6679	7730	8685

З таблиці 6.5 видно, що за життєвий цикл обладнання у 10 років економічний ефект складе 8685000 грн., що вказує на доцільність запропонованої модернізації тягового електроприводу електровозу ЧС-8. Час повернення коштів, що пішли на капітальні затрати – 4 роки.

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. Недивлячись 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 змінного струму ЧС-8. 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, модальне керування, система зі спостерігачем стану. В якості навантаження був змодельований профіль шляху з різними величинами ухилів. На базі отриманої моделі були зняті осцилограми швидкості руху потягу та тягові характеристики електровозу.

Список використаних джерел

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

Додаток А
Ілюстраційний матеріал

Дослідження роботи електровозу ЧС8 з асинхронним приводом

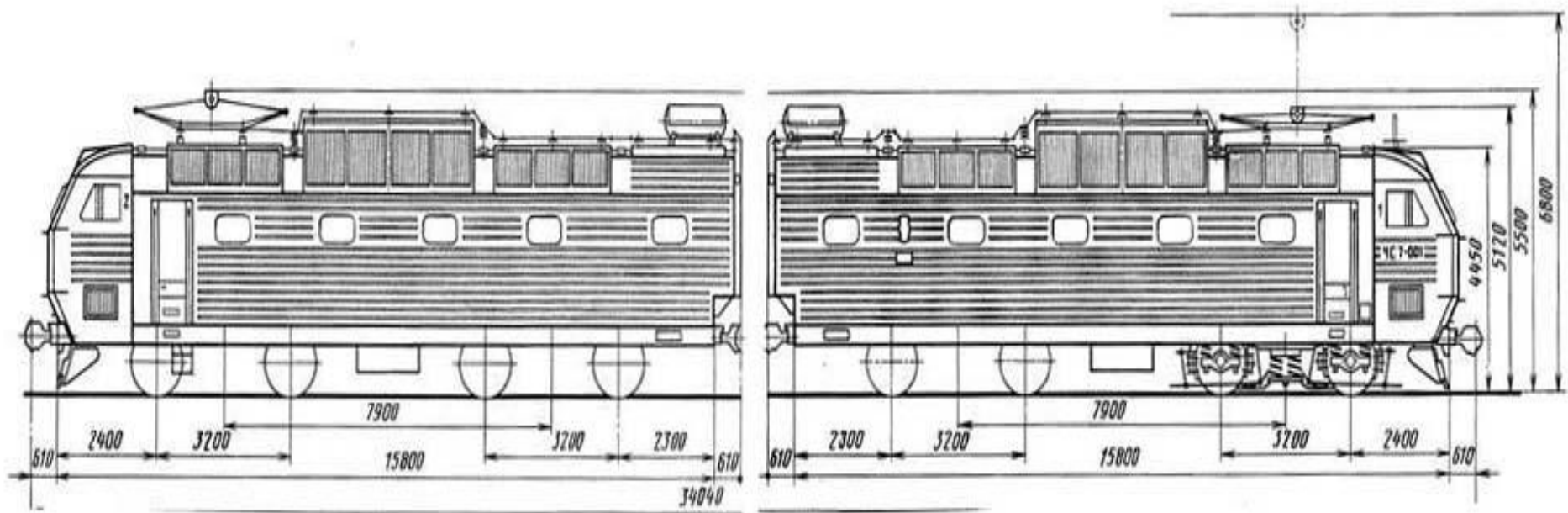


Розробив:
студент групи 133-ЕЕП-321
Сергій ЧОБІТЬКО
Керівник:
к.т.н., доц. Артем МАСЛІЙ

- Розробка імітаційної моделі електровоза ЧС8 з приводом постійного струму для дослідження його роботи під час руху;
- Пошук засобів підвищення енергоефективності локомотива;
- Розробка імітаційної моделі тягового асинхронного двигуна НБ-607;
- Розробка імітаційної моделі системи «частотний перетворювач – асинхронний двигун»;
- Розробка імітаційної моделі руху потяга з асинхронним приводом та векторною системою керування;
- Економічне обґрунтування доцільності модернізації електровозу.

Загальний вид та основні технічні характеристики електровозу ЧС-8

3



- Електровоз змінного струму напругою 25 кВ, 50 Гц;
- Тягові двигуни постійного струму послідовного збудження;
- Конструкційна швидкість 160 км/год;
- Вага електровоза 123 т;
- Сила тяги тривалому режимі 248,1 кН;

Математичне моделювання електропривода постійного струму 4

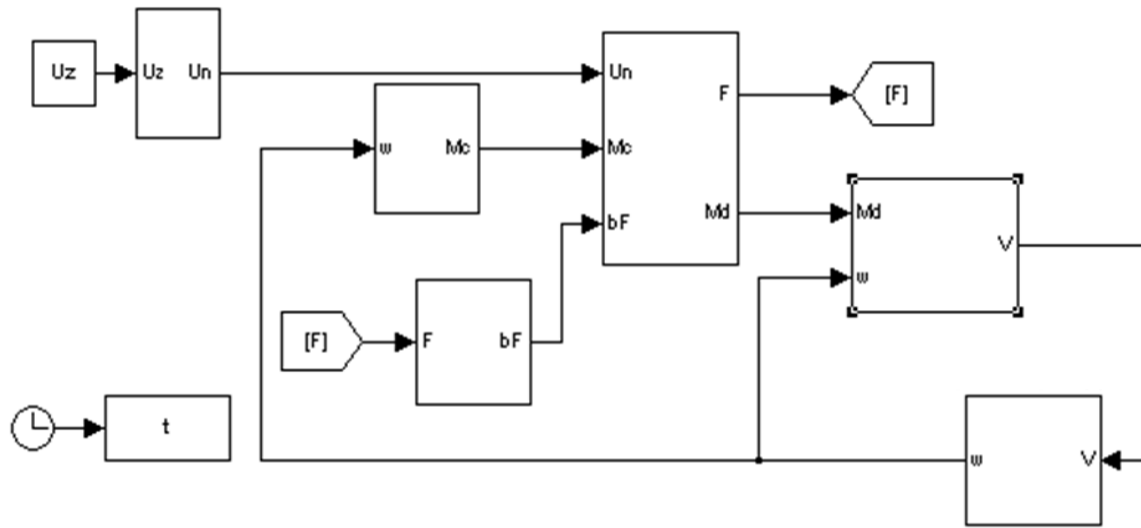


Рисунок 1 – Математична модель привода постійного струму

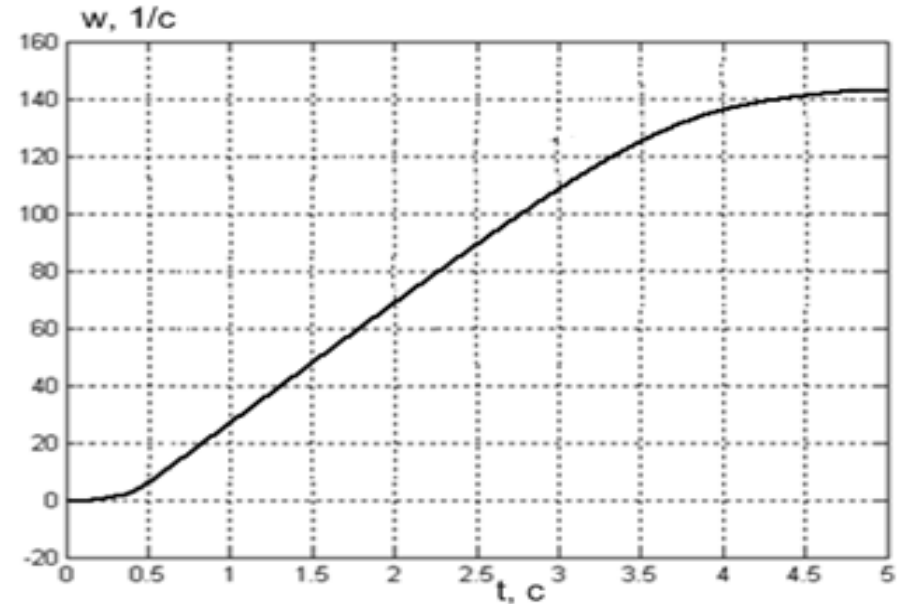
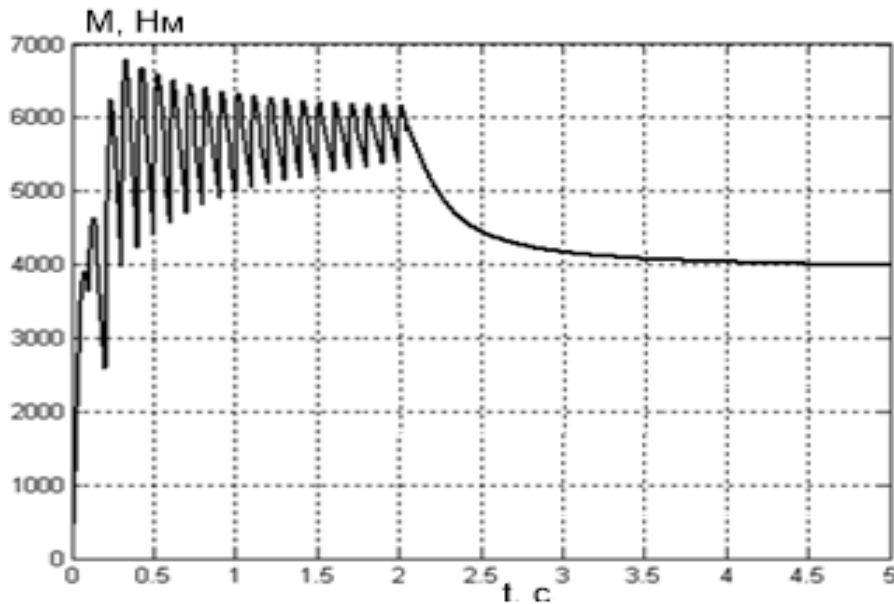


Рисунок 2 – Результати математичного моделювання роботи привода постійного струму

Математична модель поїзда та результати моделювання 5

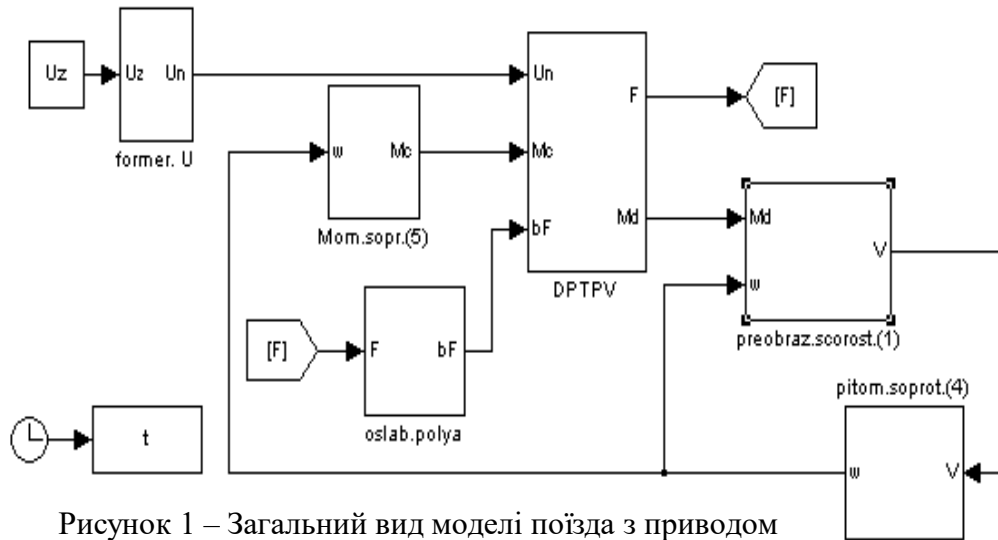


Рисунок 1 – Загальний вид моделі поїзда з приводом постійного струму

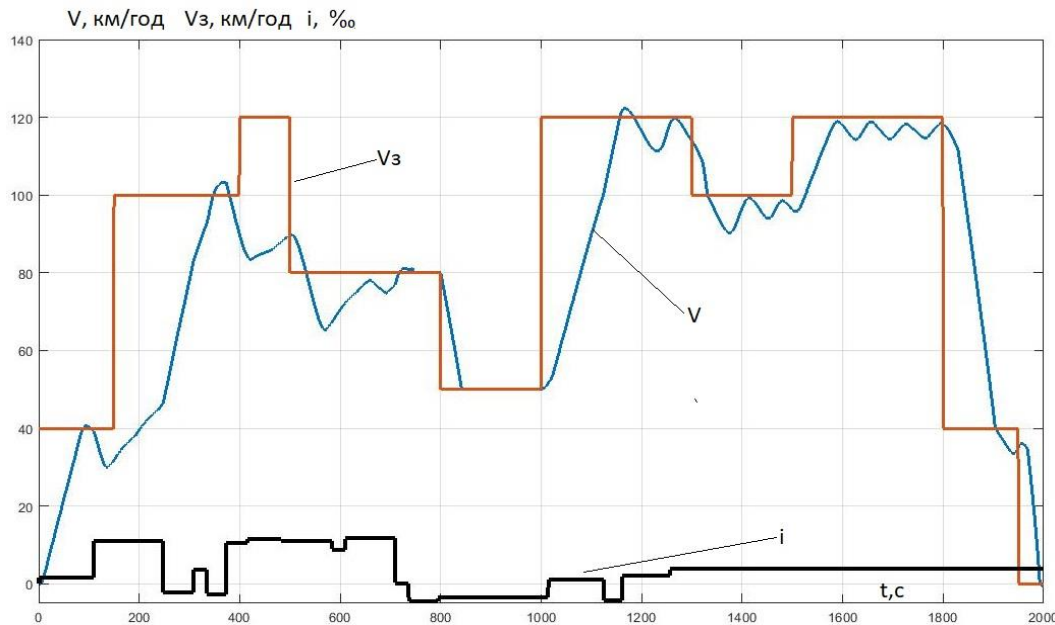


Рисунок 3 – Задана та фактична швидкості руху поїзда та заданий профіль шляху

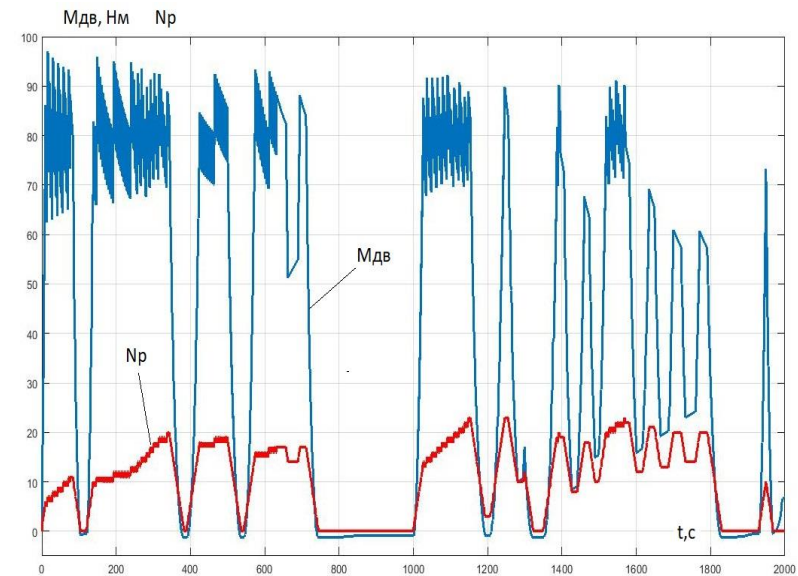


Рисунок 2 – Номер позиції контролера машиніста та тяговий електромагнітний момент на валу двигуна

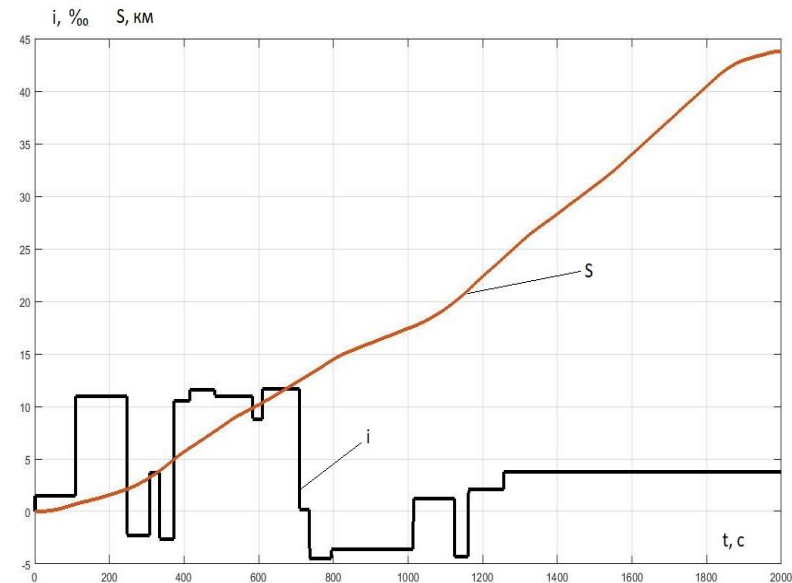


Рисунок 4 – Профіль шляху та переміщення потяга

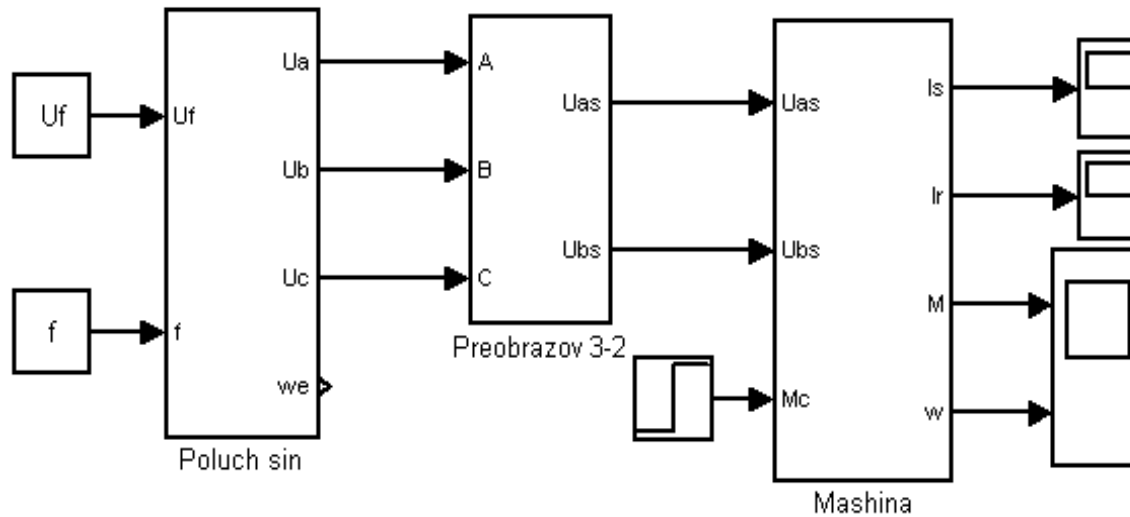


Рисунок 1 – Математична модель асинхронного двигуна

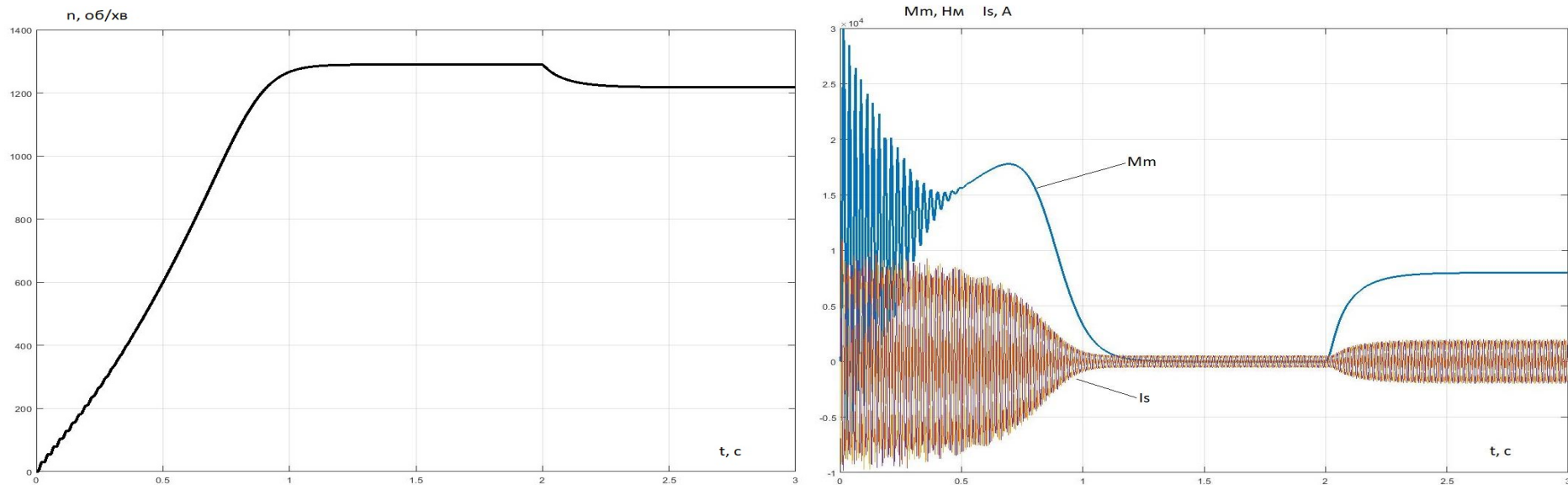
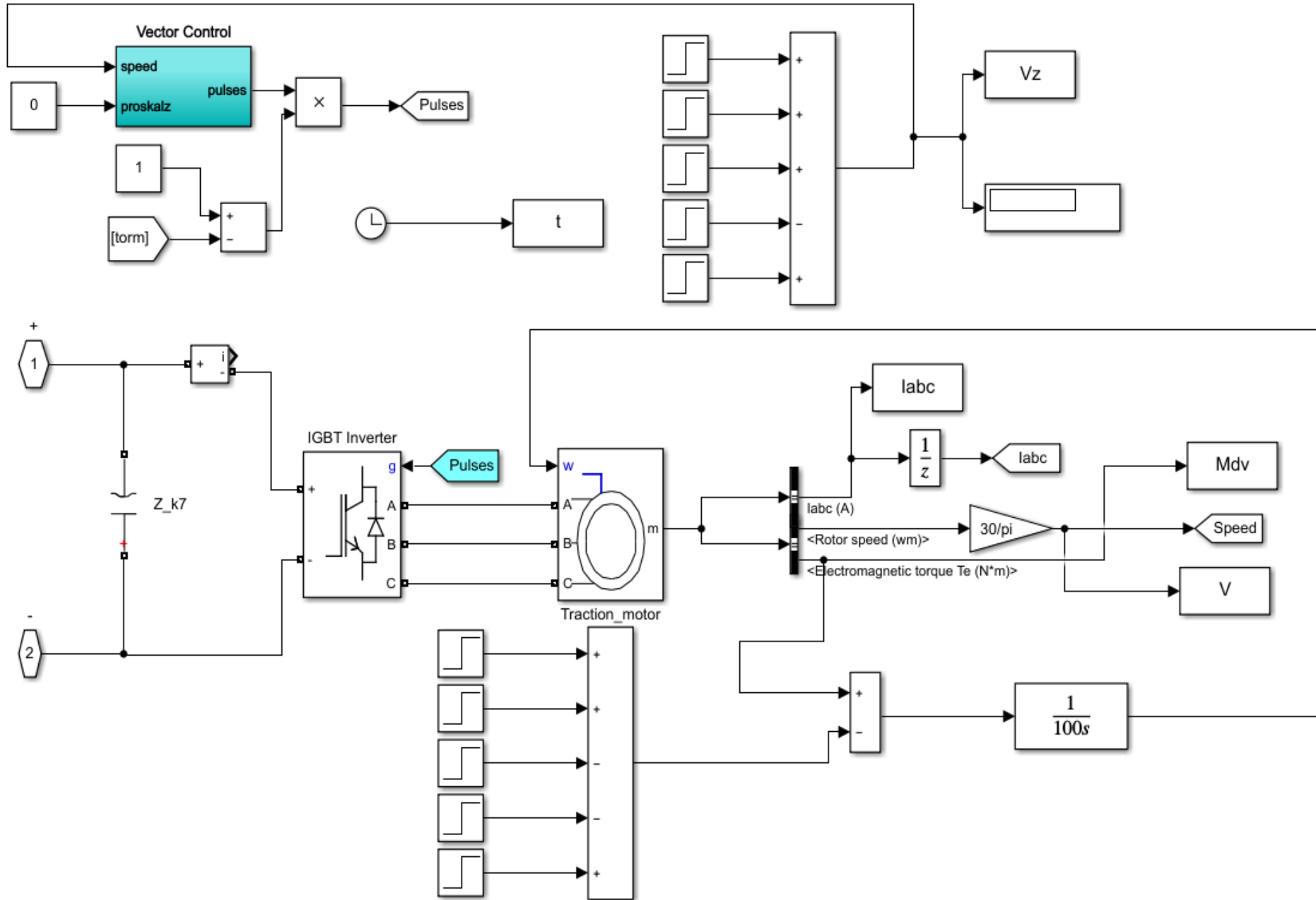


Рисунок 2 – Результати математичного моделювання роботи асинхронного двигуна

Моделювання асинхронного привода з векторним керуванням 7



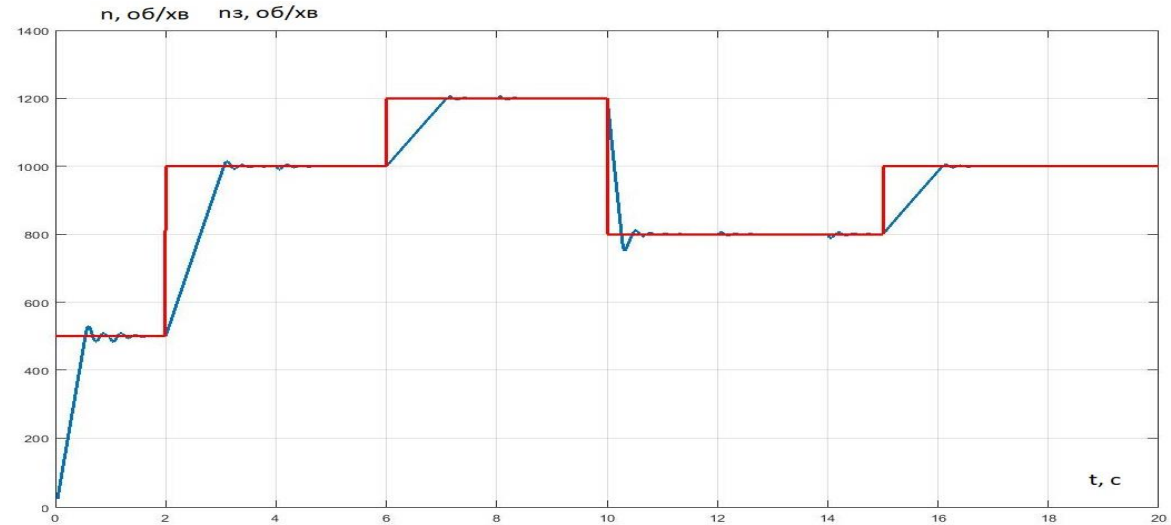


Рисунок 1 – Осцилограма швидкості асинхронного двигуна при векторному керуванні

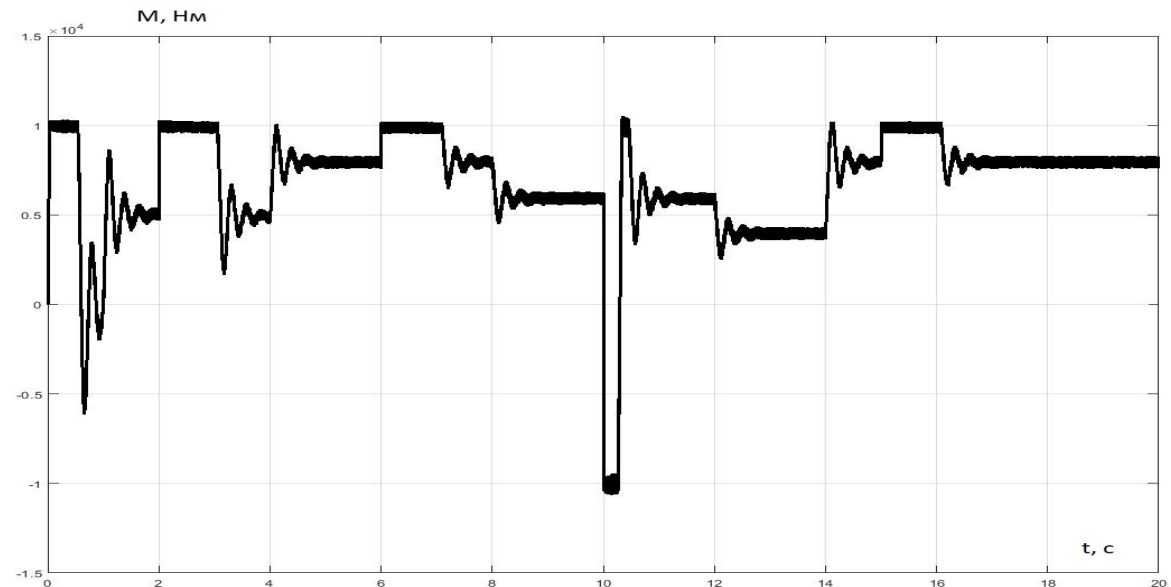
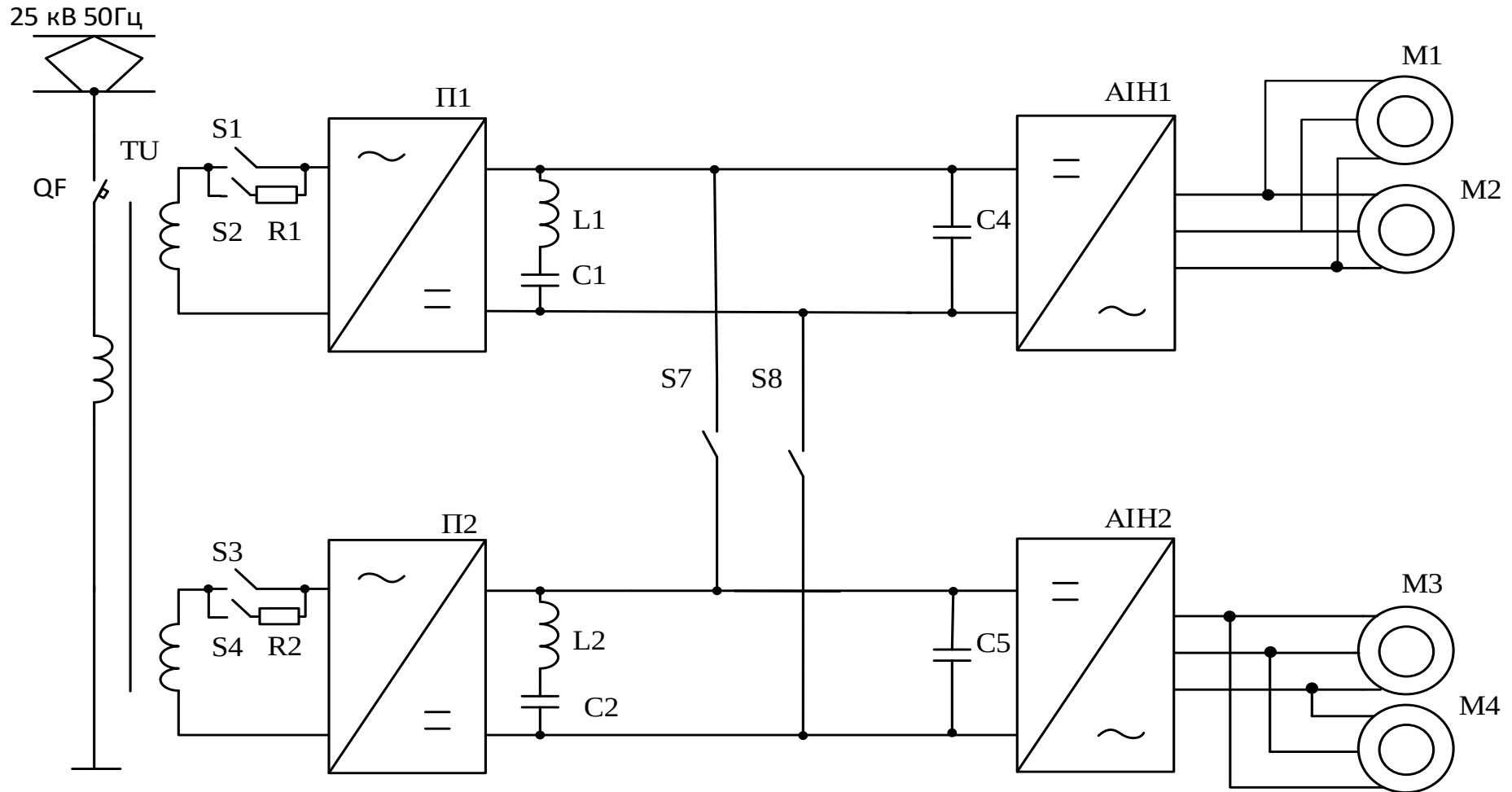


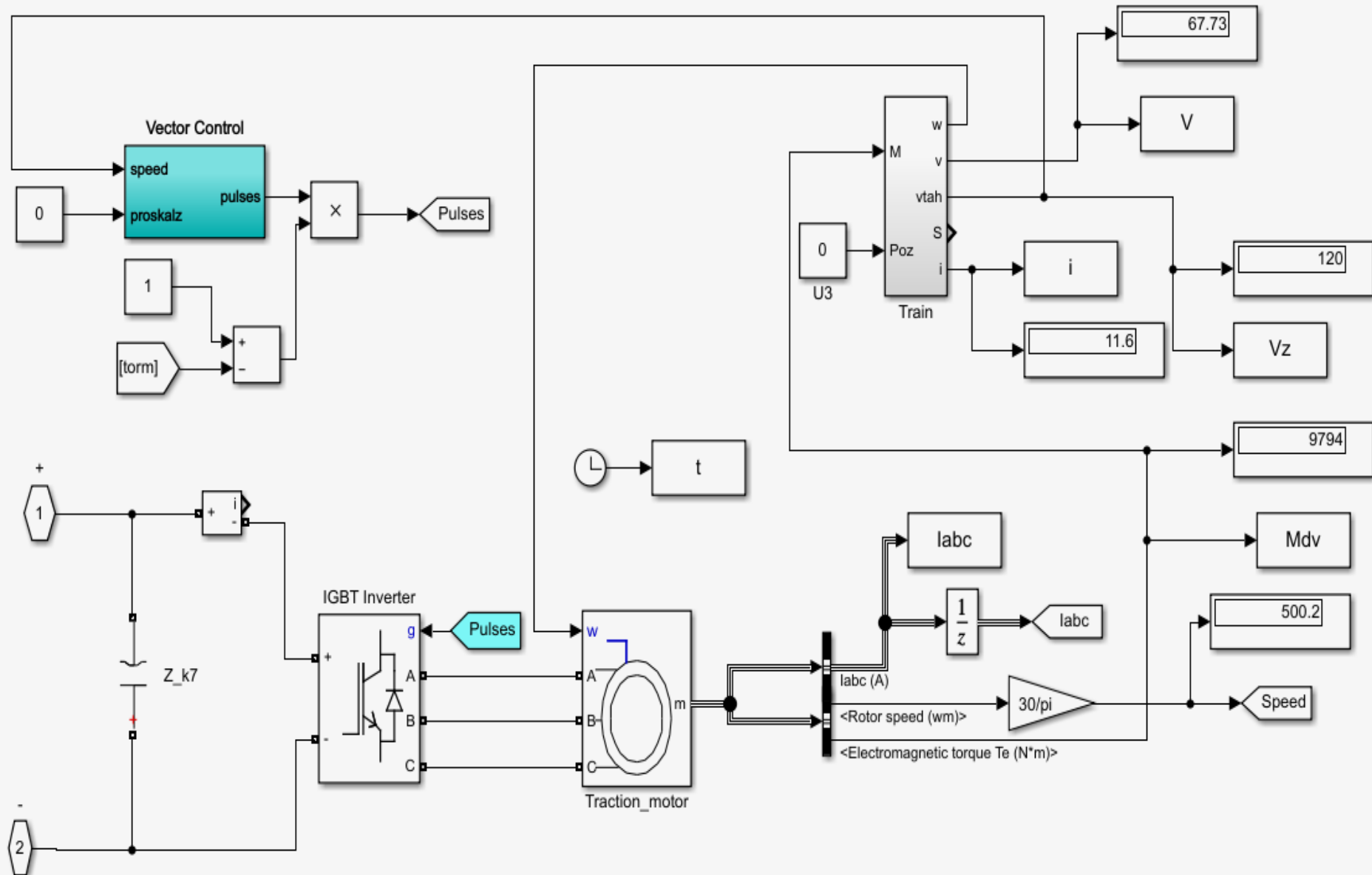
Рисунок 2 – Осцилограма моменту асинхронного двигуна при векторному керуванні

9



Математична модель роботи модернізованого електровоза з поїздом

10



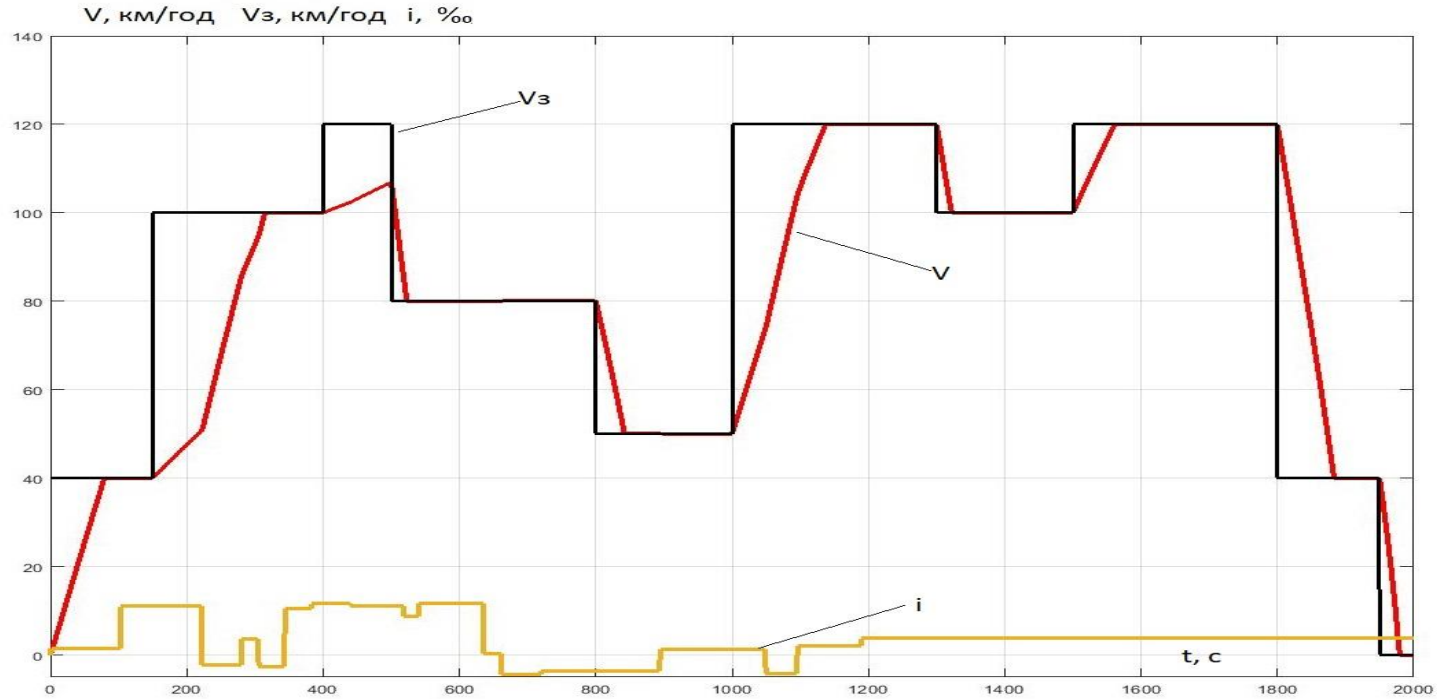


Рисунок 1 – Швидкість потяга з асинхронним приводом при векторному керуванні

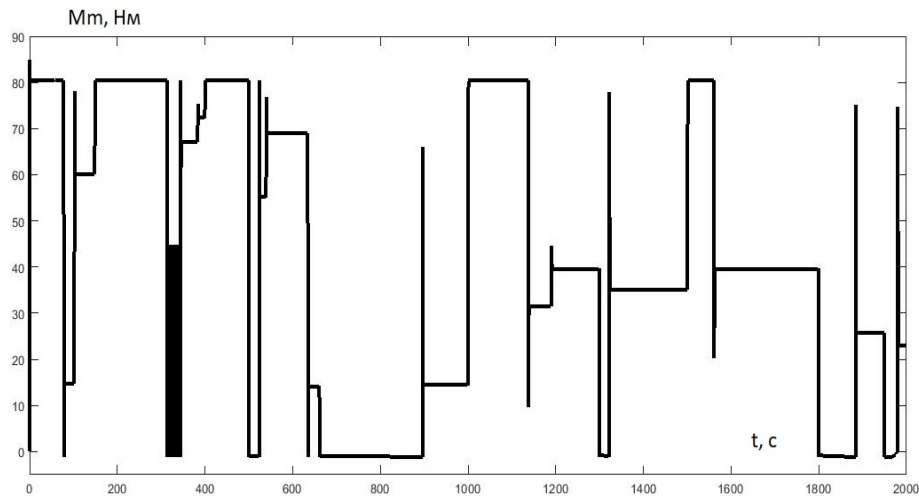


Рисунок 2 – Момент двигуна при русі потяга

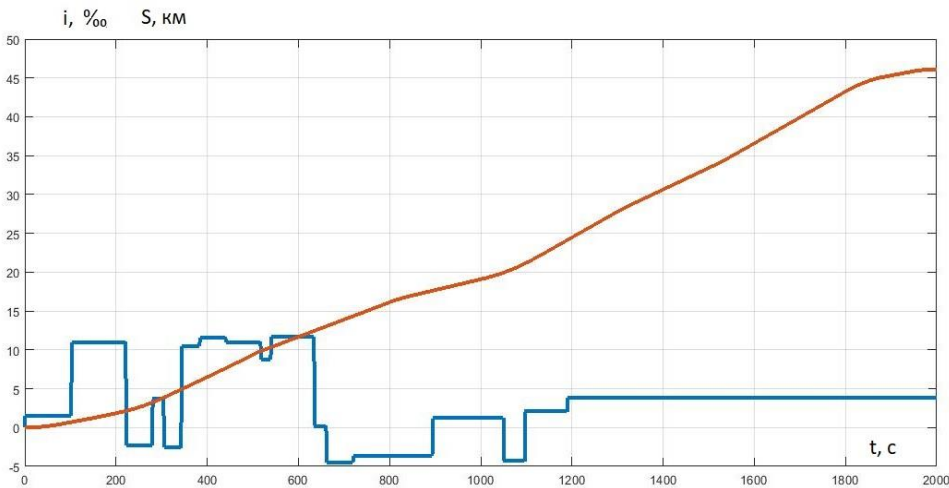


Рисунок 2 – Переміщення потяга та профіль шляху

- Було створено імітаційну модель потяга та проведено дослідження системи керування тяговим електроприводом постійного струму електровоза ЧС8;
- Прийнято варіант модернізації електровоза ЧС8 зі встановленням тягової електричної передачі змінного струму;
- Створено імітаційну модель тягового асинхронного двигуна НБ407 та систему векторного керування, отримано осцилограми їх спільної роботи;
- Розроблено математичну модель руху потяга з використанням асинхронного приводу на електровозі ЧС8 та проведено аналіз його роботи на базі отриманих осцилограм, які підтверджують доцільність запропонованої модернізації.