

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

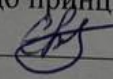
ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МОДЕРНІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ ВЛ11

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи

КРМ.273.8.02.24.01 ПЗ

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

(роботу виконано самостійно, відповідно
до принципів академічної доброчесності)

 Євген РУБАНСЬКИЙ

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

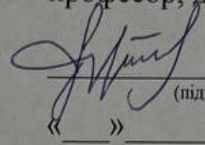
Другий (магістерський) рівень вищої освіти

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**

Рубанського Євгена Дмитровича

- 1 Тема «Дослідження роботи модернізованого електровозу ВЛ11», 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 ВЛ11, двигун постійного струму ТЛ-2К1, вентильно-індукторний двигун.
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки
 - 1) Короткий опис електровоза ВЛ11
 - 2) Дослідження роботи тягового приводу постійного струму на математичній моделі потяга
 - 3) Математичне моделювання системи підлеглого керування двигунами постійного струму на електровозі ВЛ11
 - 4) Математичне моделювання роботи вентильно-індукторного двигуна
 - 5) Дослідження роботи тягового вентильно-індукторного приводу на електровозі ВЛ11 з модальним управлінням.
 - 6) Розрахунок економічного ефекту
- 5 Перелік графічного матеріалу
 - 1) Загальний вигляд електровозу ВЛ11 – один слайд (формат А4).
 - 2) Способи з'єднань тягових двигунів електровозу ВЛ-11 – один слайд (формат А4).

3) Математичне моделювання тягового електродвигуна ТЛ-2К1 – один слайд (формат А4).

4) Математична модель поїзда з реостатно контакторною системою керування – два слайди (формат А4).

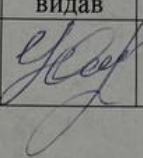
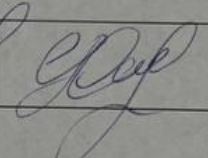
5) Моделювання системи підлеглого керування – два слайди (формат А4).

6) Математичне моделювання руху поїзда із системою підлеглого керування – один слайд (формат А4).

7) Математична модель вентильно-індукторного двигуна – один слайд (формат А4).

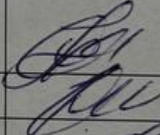
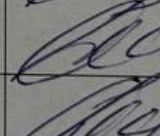
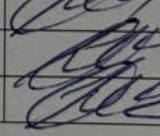
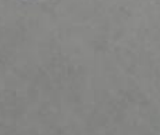
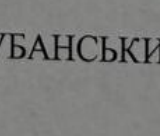
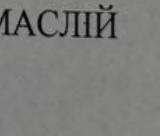
8) Математична модель поїзда з вентильно-індукторним двигуном та модальним керуванням – два слайди (формат А4).

6 Консультанти окремих розділів

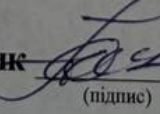
Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Уткіна Ю.М., доцент, канд. екон. наук		

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  (підпис) Євген РУБАНСЬКИЙ

Керівник  (підпис) Артем МАСЛІЙ

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 101 аркуш пояснювальної записки формату А4, у тому числі 53 рисунки, 5 таблиць, 12 літературних джерел.

Ключові слова: електровоз, система керування, тяговий вентильно-індукторний двигун, модальний регулятор

Об'єктом дослідження є модернізований тяговий електропривод електровозу ВЛ11.

Метою дослідження є пошук засобів для підвищення енергоефективності електровозу за рахунок застосування вентильно-індукторного тягового приводу.

У кваліфікаційній роботі розглянуто можливість модернізації електровозу постійного струму ВЛ11 з тяговим електроприводом постійного струму. Для підвищення надійності системи запропоновано замінити двигуни постійного струму на безколекторні вентильно-індукторні. Для вентильно-індукторного тягового електроприводу була обрана система керування на основі модального регулятора. У останньому розділі був розрахований економічний ефект від впровадження запропонованої системи.

ABSTRACT

This qualification paper includes 101 sheets of A4 explanatory note, including 53 pictures, 5 tables, 12 literary sources.

Keywords: electric locomotive, control system, traction engines, modal regulator

The object of research is modernized traction electric drive of the electric locomotive VL11.

The aim of research is search for means for increasing the energy efficiency of electric locomotive due to the use of a valve inductive traction actuator.

The qualification work considered the possibility of modernization of the electric locomotive VL11 with traction electric actuator DC. In order to increase the reliability of the system, it is proposed to replace the DC motors with non-collector valve-inductors. A control system based on a modal controller was selected for the inductor traction actuator. In the last section, the economic impact of implementing the proposed system was calculated.

Зміст

Вступ	7
1 Короткий опис електровоза ВЛ11	8
1.1 Призначення та технічна характеристика електровозу	8
1.2 Формування електровоза з секцій	14
1.3 Управління електровозом	15
1.4 Тяговий електродвигун ТЛ-2К1	18
2 Дослідження роботи тягового приводу постійного струму на математичній моделі потяга	25
2.1 Статистичні характеристики двигуна з послідовним збудженням	25
2.2 Розрахунки та побудова математичної моделі двигуна постійного струму	29
2.3 Реалізація виконання рівняння руху потяга з двигунами постійного струму послідовного збудження	36
3 Математичне моделювання системи підлеглого керування двигунами постійного струму на електровозі ВЛ11	50
3.1 Принципи побудови та оптимізації системи підлеглого регулювання	50
3.2 Розрахунок та побудова системи підлеглого керування	57
4 Математичне моделювання роботи вентильно-індукторного двигуна	64
4.1 Будова та принцип дії вентильно-індукторного двигуна	64
4.2 Розрахунок магнітного поля методом кінцевих елементів	68
5 Дослідження роботи тягового вентильно-індукторного приводу на електровозі ВЛ11 з модальним управлінням	79
6 Визначення економічного ефекту від запровадження асинхронних двигунів на електровозі змінного струму	89
Висновки	99
Список використаних джерел	100
Додаток	101

					КРМ.273.8.02.24.01 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Рубанський			Дослідження роботи модернізованого електровозу ВЛ11	Літ.	Арк.
Перевір.		Маслій					Аркуші
Рецензент		Обозний					6
Н. Контр.		Маслій					101
Затверд.		Бабаєв				УкрДУЗТ кафедра ЕТЕМ	

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 короткочасна затримка виконання заявки на перевезення завдає збитку нормальній роботі підприємств, підриває довірчі 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 Росії, 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, Росії 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 будівництва 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 Короткий опис електровоза ВЛ10

1.1 Основні технічні дані електровоза ВЛ10

Рік побудови	1975 р.
Рід служби	вантажний
Рід струму	постійний
Число двигунів	8
Ширина колії	1524 мм
Осьова формула	2(2 _о -2 _о)
Зчіпна вага	184 т±2%
Навантаження на рейки від колісної пари	225 кН±2%
Годинний режим	
Потужність на валах ТЕД	5360 кВт
Сила тяги	387кН
Швидкість руху	48.7 км/год
Струм	4 х 466 А
Тривалий режим	
Потужність на валах ТЕД	4600 кВт
Сила тяги	314 кН
Швидкість руху	51.2 км/год
Струм	4 х 410 А
Конструкційна швидкість	100 км/год
Конструкційна швидкість по ходовій частині	110 км/год
Електричне гальмування	рекуперативне
Число економічних швидкостей на повному полі	3
Число ступенів послаблення поля	4
Максимальне ослаблення поля	64 %
Передача	косозуба

Передатне відношення зубчастої передачі	3.826
Діаметр коліс	1250 мм
Тверда база візка	3000 мм
Довжина локомотива по осях автозчепів	32880 мм
Ширина кузова	3160 мм
К.К.Д. електровоза	0.93

1.2 Загальний огляд магістрального електровоза ВЛ10

Вантажний восьмивісний електровоз ВЛ10 (рисунок 2.1) призначений для експлуатації на електрифікованих ділянках залізниць із шириною колії 1520 мм при напрузі в контактній мережі 3000 В постійного струму.

Електровоз ВЛ10 – потужний локомотив, що забезпечує водіння вантажних поїздів у будь-яких кліматичних умовах. Він обладнаний рекуперативним гальмуванням, що значно скорочує гальмівний шлях і створює більшу економію електроенергії й металевих гальмівних колодок.



Рисунок 1.1- Електровоз ВЛ10

Електровози ВЛ10 та ВЛ10у складаються з двох зчленованих між собою автозчепленням СА-3 секцій. На електровозах ВЛ10 випуску до 1975 р. кожна секція спиралася на два двовісні незчленовані візки через пружні опори. На електровозах ВЛ10у і Л 10 випуску з 1975 р. секції кузова на візках спираються за допомогою люлечного підвішування, яке значною мірою покращує горизонтальну динаміку електровоза.

Зварні рами візків мають підвищену надійність, у процесі виготовлення їх піддають ретельному контролю із застосуванням сучасної апаратури. Візки обладнані безщелепними буксами із роликівими підшипниками підвищеної довговічності. Переміщення букс щодо рами відбувається за рахунок деформації зсуву гумометалевих блоків. Ресорне підвішування забезпечує ефективне пом'якшення вертикальних поштовхів під час проходження електровозом нерівностей шляху.

На електровозах ВЛ10 та ВЛ10у встановлено по вісім тягових двигунів. Тягові електродвигуни мають послідовне збудження, опорно-осьове підвішування, примусову вентиляцію та потужність при годинному режимі по 670 кВт. Електродвигуни мають надійність і високу к. п. д. Обертальний момент від тягового двигуна на колісні пари передається двосторонньою одноступінчастою циліндричною косозубою передачею. При такій передачі підшипники двигуна не отримують додаткових навантажень за аксіальним напрямком.

Підвішування електродвигуна опорно-осьове. З одного боку він спирається моторно-осьовими підшипниками на вісь колісної пари електровоза, а з іншого - на раму візка через шарнірну підвіску та гумові шайби. Тяговий електродвигун має високий коефіцієнт використання потужності (0,74) за максимальної швидкості електровоза.

Система вентиляції незалежна, аксіальна, з подачею вентиляючого повітря зверху в колекторну камеру та викидом вгору з протилежного боку вздовж осі двигуна.

Електродвигун постійного струму ТЛ-110М служить приводом відцентрового вентилятора Ц13-50 та генератора управління НБ-110 (або ДК-405К).

Електродвигун встановлений у машинному відділенні кожної секції перпендикулярно до поздовжньої осі електровоза.

У середній частині кожної секції електровозів ВЛ10 і ВЛ10у розташована високовольтна камера з електроапаратурою, що має сітчасті огороження. Двері камер мають блокування, що забезпечують їх відкриття тільки при опущеному струмоприймачі. Електрична апаратура має необхідну надійність і має блочне розташування, що значно полегшує її обслуговування та ремонт. Вузли апаратури, що піддаються в процесі роботи інтенсивному нагріванню, мають примусове охолодження. Повітря для їх охолодження подається по повітропроводу від відцентрового вентилятора. Розташування обладнання всередині кузова забезпечує вільний прохід та доступ для огляду електричної апаратури.

Легка зварна суцільнометалева конструкція кузова з несучою рамою має велику міцність та жорсткість. По кінцях кузова розташовані зручні кабіни керування відокремлені від машинних приміщень перегородками. Обшивка кабіни управління має покращене теплозвукоізоляційне. огорожу з полімерних матеріалів. У кабіні управління знижений рівень шуму та вібрації. Створено покращені гігієнічні умови праці для локомотивної бригади.

Усередині кабіни встановлені пульти управління, пристрої для підігріву повітря, вентилятори, радіостанція, локомотивна сигналізація та інше обладнання, що створює зручність обслуговування електровоза. Широке скло кабіни з пневматичними склоочисниками, забезпечують хорошу видимість шляху і контактної мережі.

Для регулювання частоти обертання тягових двигунів передбачені три види їх з'єднання: послідовне (С) (Рис.1.2а), послідовно-паралельне (СП) (Рис.1.3б) та паралельне (П) (Рис.1.3). Крім того, на всіх цих з'єднаннях передбачено роботу тягових електродвигунів при ослабленому збудженні з коефіцієнтом збудження 0,75; 0,55; 0,43; 0,36. Електричні ланцюги електровоза отримують живлення від контактного дроту через струмоприймачі, що забезпечують надійний струмознімання при будь-яких швидкостях руху електровоза.

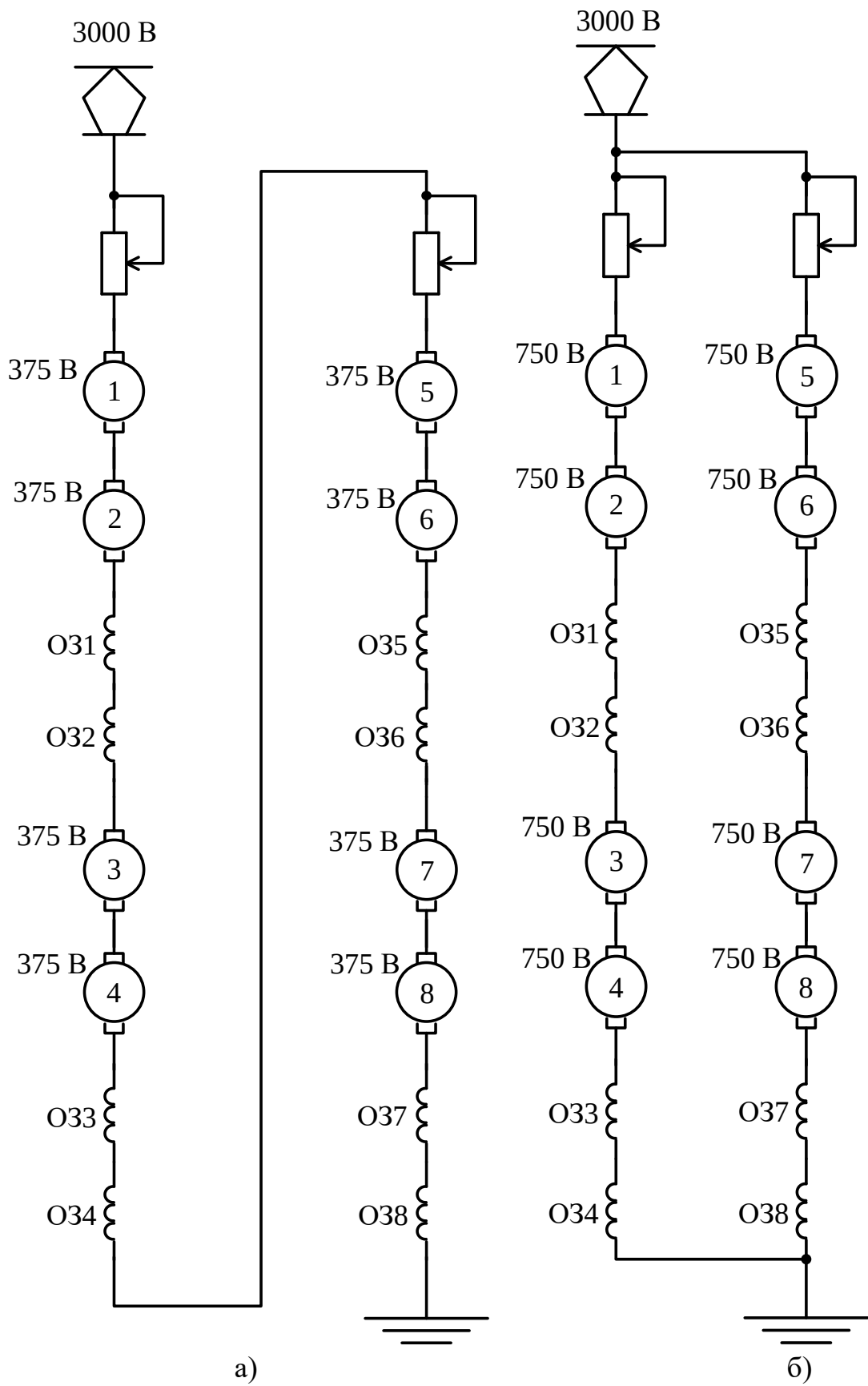


Рисунок 1.3 – Принципові схеми з'єднання тягових двигунів С (а) та СП (б)
електровоза ВЛ10

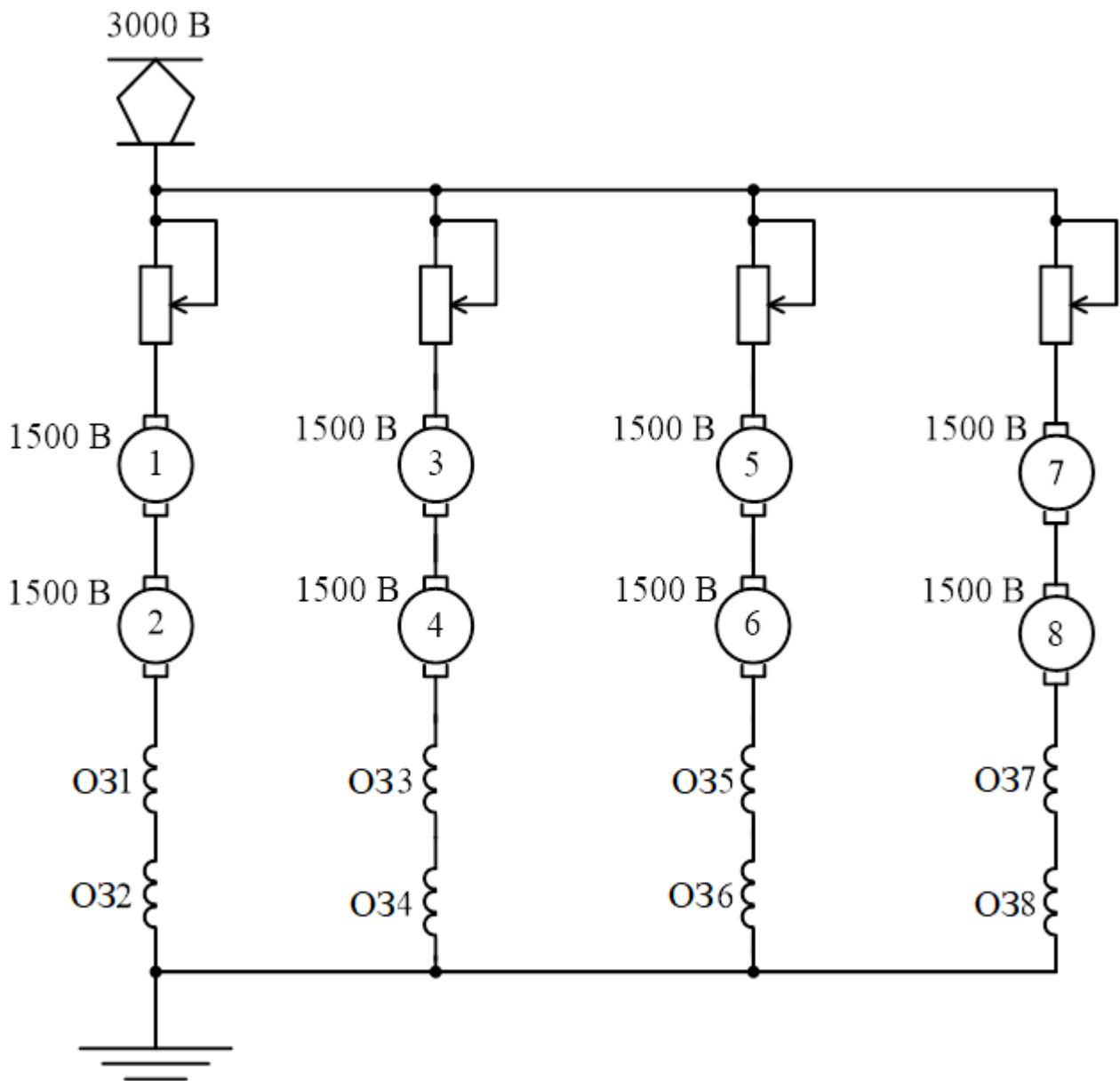


Рисунок 1.3 – Принципова схема П-з'єднання тягових двигунів електровоза ВЛ10

Нормальним тяговим режимом приймають послідовно-паралельне та паралельне з'єднання тягових електродвигунів. Послідовне з'єднання тягових електродвигунів приймають тільки при обмеженнях швидкостей і маневрових роботах. Діапазон регулювання швидкості розширен завдяки застосуванню на ходових позиціях послаблення збудження тягових електродвигунів (75, 55, 43, 36%).

Резистори КФ поділяють на пускові, ослаблення збудження, стабілізуючі, перехідні та демпферні. Пускові резистори КФП-10А служать для обмеження струму тягових двигунів як пуску електровоза. Вони розміщені у 22 ящиках. Резистори ослаблення збудження включені паралельно до обмотки збудження

тягового двигуна для ослаблення магнітного потоку з метою збільшення швидкості руху електровоза. Усі резистори ослаблення збудження, а також стабілізуючі резистори (в режимі рекуперації стабілізують струм якоря тягових двигунів) входять до комплексу пускових резисторів.

Перетворювач НБ-436В призначений для живлення обмоток збудження електродвигунів тягових при рекуперативному гальмуванні. Перетворювач встановлений у машинному відділенні кожної секції електровоза. Перетворювач НБ-436В складається з шестиполюсного низьковольтного генератора постійного струму і чотириполюсного високовольтного електродвигуна, змонтованих на одному валу і є однокорпусним двомашинним агрегатом.

Як вже було сказано раніше, електричними схемами електровоза передбачені три з'єднання тягових двигунів: послідовне (С), послідовно-паралельне (СП) і паралельне (П). На кожному з цих з'єднань можливість працювати як при повному збудженні (ПП), так і на чотирьох ступенях ослаблення збудження (ВП) двигунів. Рекуперативне гальмування можливе також трьох з'єднаннях. Робота за системою багатьох одиниць схемою електровоза не передбачено. У тяговому режимі допустима робота всіх трьох з'єднаннях з вимкненими пошкодженими двигунами.

2 Математичне моделювання двигуна постійного струму

2.1 Основні положення.

Математичне моделювання двигунів, як правило, розпочинають зі зображення їх електричних схем. На рисунку 2.1 представлена електрична схема обмоток тягового двигуна.

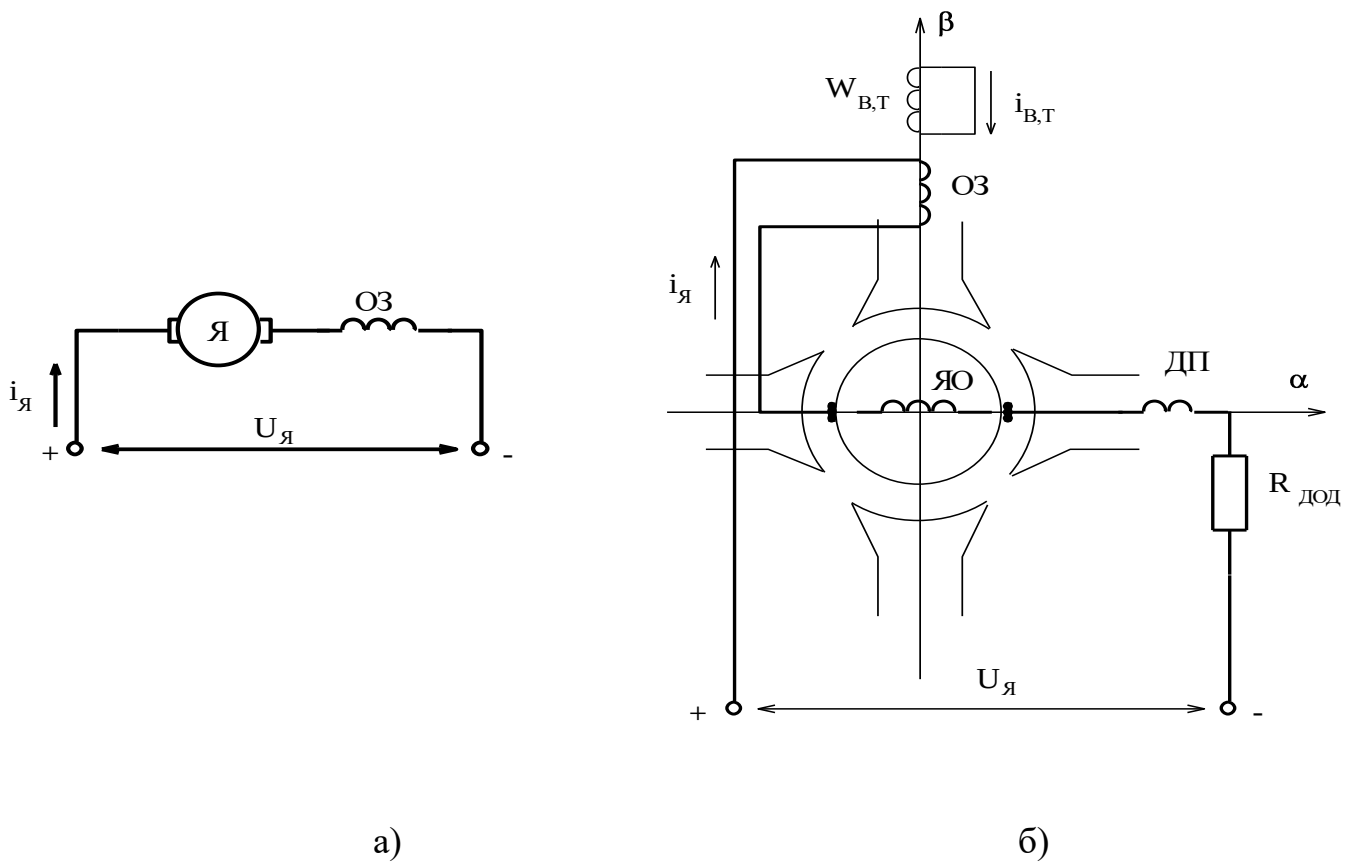


Рисунок 2.1 – Схема двигуна постійного струму з послідовним збудженням (а) та з'єднання обмоток узагальненої машини для отримання моделі (б)

При прийнятій апроксимації кривої намагнічування (рисунок 2.2) механічна та електромеханічна характеристики буде описана наступними рівняннями:

- механічна:

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

- електромеханічна:

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

Ці характеристики при різних струмах якоря мають різні вирази. При $I_{\text{Я}} > I_{\text{ГР}}$ $\kappa \Phi = \text{const}$ ці рівняння перетворюються до вигляду

$$\omega = \frac{U_{\text{Я}}}{\sqrt{\kappa} \kappa \Phi} - \frac{R_{\text{Я}\Sigma}}{\kappa \kappa \Phi}; \quad (2.3)$$

$$\omega = \frac{U_{\text{Я}}}{\kappa \kappa_{\Phi} I_{\text{Я}}} - \frac{R_{\text{Я}\Sigma}}{\kappa \kappa \Phi}. \quad (2.4)$$

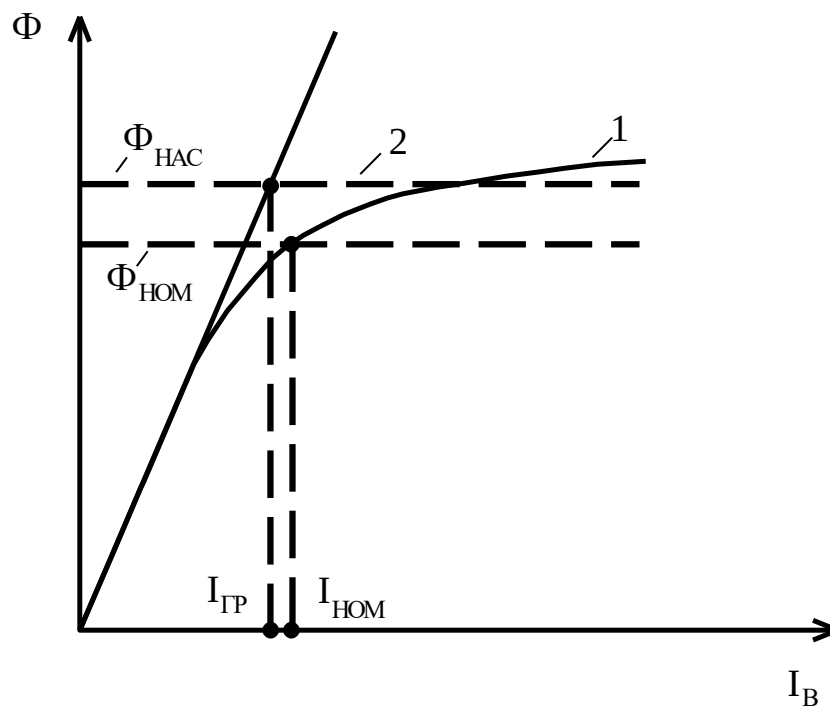


Рисунок 2.2 – Характеристика намагнічування $\Phi(I_B)$

При $I_{\text{я}} > I_{\text{гр}}$ $\Phi = \Phi_{\text{нас}} = \text{const}$ і ті ж рівняння записуються так:

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

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

Рівняння (2.3) та (2.4) свідчать про те, що в області навантаження, меншого номінального, статичні характеристики двигуна послідовного збудження мають гіперболічний характер і при $M \rightarrow 0$ та $I_{\text{я}} \rightarrow 0$ 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, виконання умови,

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

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 $\omega_0 = U_{\text{я}} / \Phi_{\text{зал}}$. Однак $\Phi_{\text{зал}}$ настільки малий, та значення ω_0 набагато перевищує допустиме для двигуна за умовами механічної тривкості. 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 тривкості.

При $I_{\text{я}} > I_{\text{гр}}$ магнітне коло машини насичується і при прийнятому припущенні $\Phi = \Phi_{\text{нас}} = \text{const}$. В цій області характеристики двигуна практично лінійні, подібно аналогічним характеристикам двигуна з незалежним збудженням.

Природні характеристики двигуна з послідовним збудженням показані на рисунку 2.3а та 2.3б. Сильний позитивний зв'язок за струмом, який створюється послідовною обмоткою збудження двигуна, практично ліквідує вплив розмагнічуючої дії реакції якоря та призводить в області допустимого перевантаження до зростання потоку більше номінального значення на 10–15%. Тому при цьому коефіцієнті допустимого перевантаження за струмом $\lambda_1 = 2 - 2.5$ перевантажувальна спроможність за моментом у двигунів з послідовним збудженням вище, ніж при незалежному збудженні, і лежить в межах $\lambda = 2.5 - 3$.

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.

В зв'язку з нелінійністю кривої намагнічування розрахувати природні характеристики двигуна з послідовним збудженням тільки за його номінальними даними неможливо, тому при проектуванні слід користуватися природними характеристиками $\omega = f(I_a)$ і $M = f(I_a)$, що наведені в каталогах

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

$$\beta = \kappa^2 \phi_{нас}^2 / R_{я\Sigma} . \quad (2.8)$$

Відповідно введення додаткового опору зменшує жорсткість механічних характеристик. Реостатні механічні та електромеханічні характеристики показані на рисунках 2.3а та 2.3б разом з природними характеристиками, відповідаючи ми $R_{дод}=0$, на якому бачимо, що введення додаткового опору в коло якоря дозволяє обмежити момент та струм короткого замикання двигуна.

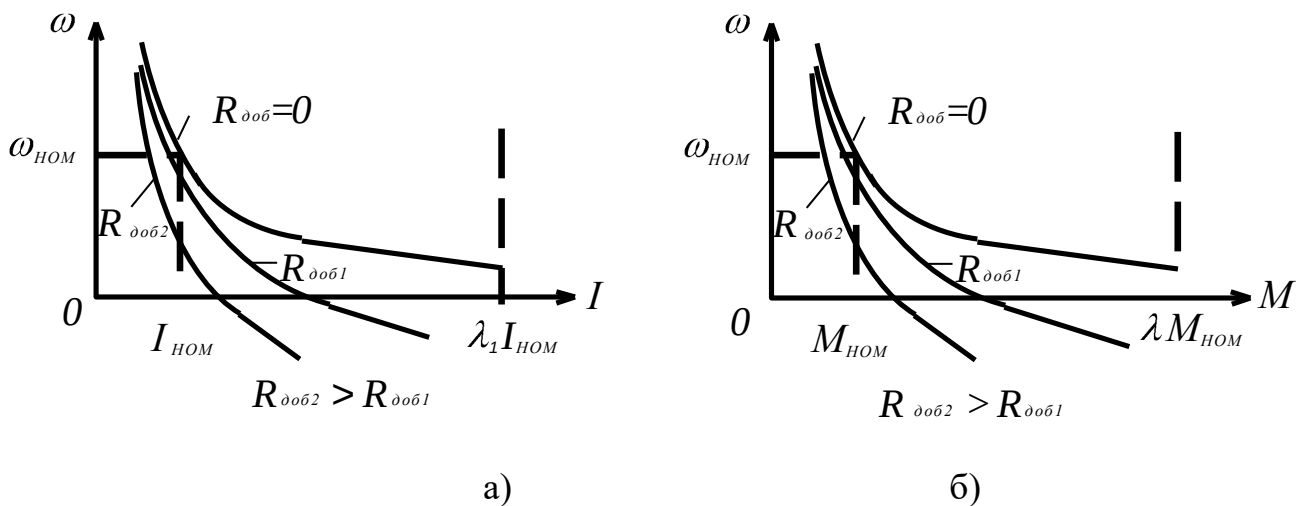


Рисунок 2.3 – Механічні (а) та електромеханічні (б) статичні характеристики двигуна з послідовним збудженням

2.2 Динамічні властивості двигуна з послідовним збудженням.

Математичний опис динамічного процесу перетворення енергії в двигуни з послідовним збудженням (з урахуванням умовної обмотки вихрових струмів) можна записати у наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = i_{B,T} R_{B,T} + w_{B,T} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}; \\ u_{Я} = \kappa \Phi \omega + i_{Я} R_{Я\Sigma} + L_{Я\Sigma} \frac{\Delta i_{Я}}{\Delta t} + w_B \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}; \\ M = \kappa \Phi i_{Я}, \end{array} \right\}, \quad (2.9)$$

де $R_{Я\Sigma} = R_{Я} + R_{ДП} + R_B$.

Цей математичний опис процесів електромеханічного перетворення енергії в двигуні з послідовним збудженням містить добутки змінних, тому використовувати його для аналізу динамічних властивостей перетворювача можливо тільки за допомогою ЕОМ. Але загальні закономірності, основні динамічні властивості електромеханічного перетворювача з послідовним збудженням можуть бути виявлені аналітичним шляхом, якщо виконати лінеаризацію рівнянь механічної характеристики поблизу точки статичної рівноваги.

В зв'язку з тим, що лінеаризація здійснюється поблизу точки статичної рівноваги, криву намагнічування слід апроксимізувати торканою в точці $I_{\text{Я}}^0 \Phi^0$, як показано на рисунку 5.4, при цьому $\Phi = \Phi_0 + \kappa'_{\Phi} (i_{\text{Я}} + i_{\text{В,Т}})$ і перші два рівняння системи (3.9) можуть бути приведені до виду

$$(\Phi - \Phi_0) R_{\text{Я}\Sigma} + \kappa'_{\Phi} \Phi \omega + \kappa'_{\Phi} R_{\text{Я}\Sigma} T_{\text{Я}} \frac{\partial i_{\text{Я}}}{\partial t} + R_{\text{Я}\Sigma} T_{\text{В}\Sigma} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \kappa'_{\Phi} u_{\text{Я}};$$

$$\kappa'_{\Phi} R_{\text{Я}\Sigma} i_{\text{Я}} + \kappa'_{\Phi} \Phi \omega + \kappa'_{\Phi} R_{\text{Я}\Sigma} T_{\text{Я}} \frac{\partial i_{\text{Я}}}{\partial t} + R_{\text{Я}\Sigma} T_{\text{В}\Sigma} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \kappa'_{\Phi} u_{\text{Я}},$$

$$\text{де } T_{\text{В}\Sigma} = \kappa'_{\Phi} W_{\text{В,Т}} / R_{\text{В,Т}} + \kappa'_{\Phi} W_{\text{В}} / R_{\text{Я}\Sigma} = T_{\text{В,Т}} + T_{\text{В}} \approx (1,1 \div 1,2) T_{\text{В}};$$

$T_{\text{В,Т}}$ и $T_{\text{В}}$ – сталі часу відповідно еквівалентного контуру вихрових струмів та обмотки збудження. Віднявши кожний член другого рівняння з першого рівняння, отримаємо більш зручний для розв'язання вид системи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi - \Phi_0 - \kappa'_{\Phi} i_{\text{я}} + T_{\text{в,т}} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \\ \kappa \kappa'_{\Phi} \Phi \omega + \kappa'_{\Phi} R_{\text{я}\Sigma} T_{\text{я}} \frac{\partial i_{\text{я}}}{\partial t} + R_{\text{я}\Sigma} T_{\text{в}\Sigma} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \kappa'_{\Phi} R_{\text{я}\Sigma} i_{\text{я}} = \kappa'_{\Phi} u_{\text{я}}; \\ M = \kappa \Phi i_{\text{я}}. \end{array} \right\}. \quad (2.10)$$

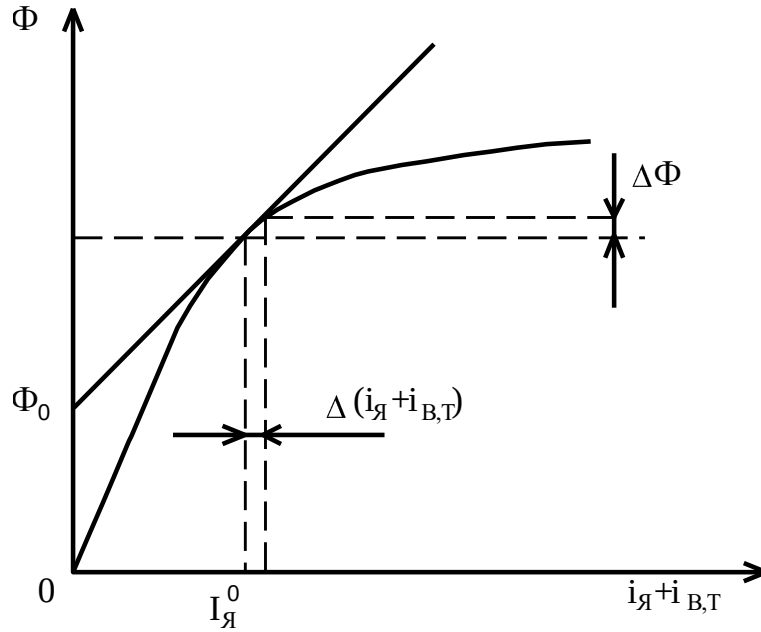


Рисунок 2.4 – Лінеаризація кривої намагнічування

Лінеарізуємо систему (2.9) шляхом розкладання в ряд Тейлора поблизу точки статичної рівноваги, позначивши $\partial/\partial t = \rho$, отримаємо

$$\left\{ \begin{array}{l} (1 + T_{\text{в,т}} \rho) \Delta \Phi - \kappa'_{\Phi} \Delta i_{\text{я}} = 0; \\ (\kappa \kappa'_{\Phi} \omega^0 + R_{\text{я}\Sigma} T_{\text{в}} \rho) \Delta \Phi + \kappa'_{\Phi} R_{\text{я}\Sigma} (1 + T_{\text{я}} \rho) \Delta i_{\text{я}} = \kappa'_{\Phi} \Delta u_{\text{я}} - \\ - \kappa \kappa'_{\Phi} \Phi^0 \Delta \omega; \\ \Delta M = \kappa \Phi^0 \Delta i_{\text{я}} + \kappa I_{\text{я}}^0 \Delta \Phi. \end{array} \right\}. \quad (2.11)$$

Розв'язавши систему (3.10) відносно $\Delta i_{\text{я}}$ та ΔM , отримаємо лінеаризовані

рівняння електромеханічної та механічної характеристик двигуна у вигляді

$$\Delta i_{\text{я}} = \frac{(1 + T_{\text{в}} \rho) (\Delta u_{\text{я}} - k \Phi^0 \Delta \omega)}{R_{\text{я}\Sigma} T_{\text{в},\text{т}} T_{\text{я}} \rho^2 + R_{\text{я}\Sigma} (T_{\text{в}\Sigma} + T_{\text{я}}) \rho + R_{\text{я}\Sigma} + k k'_{\Phi} \omega^0}; \quad (2.12)$$

$$\Delta M = \frac{(k \Phi^0 + k k'_{\Phi} I_{\text{я}}^0) (\Delta u_{\text{я}} - k \Phi^0 \Delta \omega)}{R_{\text{я}\Sigma} T_{\text{в},\text{т}} T_{\text{я}} \rho^2 + R_{\text{я}\Sigma} (T_{\text{в}\Sigma} + T_{\text{я}}) \rho + R_{\text{я}\Sigma} + k k'_{\Phi} \omega^0}. \quad (2.13)$$

Рівняння (2.12) та (2.13) характеризують основні динамічні особливості перетворювача з послідовним збудженням при умові обмеження відхилення змінних від точки статичної рівноваги вузькими межами.

Структурна схема лінійарезованого електромеханічного перетворювача з послідовним збудженням, яка відповідає (2.13), представлена на рисунку 2.5

За допомогою цієї схеми визначаємо передаточну функцію динамічної жорсткості механічної характеристики:

$$\begin{aligned} \beta_{\text{дин}} &= \frac{\Delta M(\rho)}{\Delta \omega(\rho)} = \\ &= - \frac{k \Phi^0 (k k'_{\Phi} I_{\text{я}}^0 + k \Phi^0)}{R_{\text{я}\Sigma} T_{\text{в},\text{т}} T_{\text{я}} \rho^2 + R_{\text{я}\Sigma} (T_{\text{в}\Sigma} + T_{\text{я}}) \rho + R_{\text{я}\Sigma} + k k'_{\Phi} \omega^0}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Рівняння (2.14) свідчить про те, що динамічна жорсткість в даному випадку значно залежить від положення точки статичної рівноваги на механічній характеристиці двигуна.

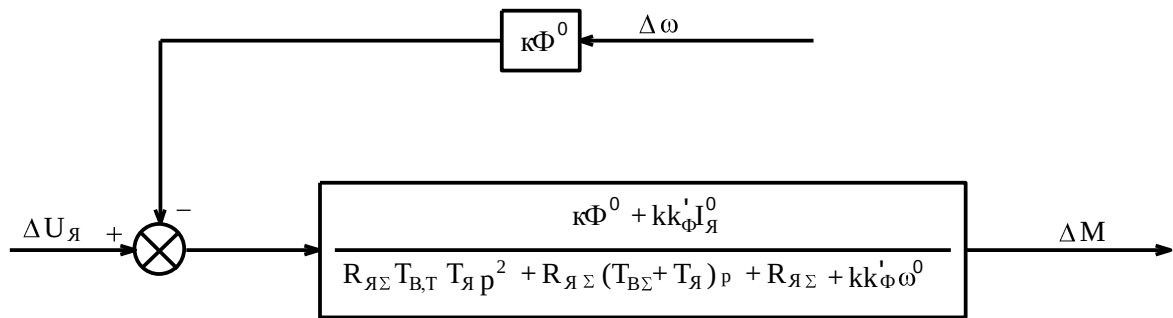


Рисунок 2.5 – Структурна схема лінеаризованого ЕМП з послідовним збудженням

Лінеаризовані характеристики двигуна з послідовним збудженням (2.12) та (2.13) можуть бути використані для аналізу усталених коливальних режимів електромеханічних систем з двигуном послідовного збудження, а також для перевірки стійкості та якості замкнених систем регулювання з таким двигуном при обмежених відхиленнях від точки статичної рівноваги.

На рисунку 2.6 представлена структурна схема електромеханічної системи з двигуном послідовного збудження, яка може бути використана при моделюванні її на ЕОМ. При розгляданні динамічних режимів, в яких відхилення змінних від точки статичної рівноваги не виходять за межі допустимої лінеаризації нелінійної механічної характеристики двигуна, слід користуватися лінеаризованим рівнянням динамічної механічної характеристики (2.13).

$$\left\{ \begin{array}{l} \kappa\Phi_{я} - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - M_{c1} = J_1\rho\omega_1 \\ c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - M_{c2} = J_2\rho\omega_2 \end{array} \right\}. \quad (2.15)$$

Схема представлена на рисунку 2.6 являє собою дуже складну систему, тому її замінюємо на аналогічну, але більш просту схему рисунку 2.7.

2.2 Розрахунки для побудови математичної моделі ТЛ-2К1

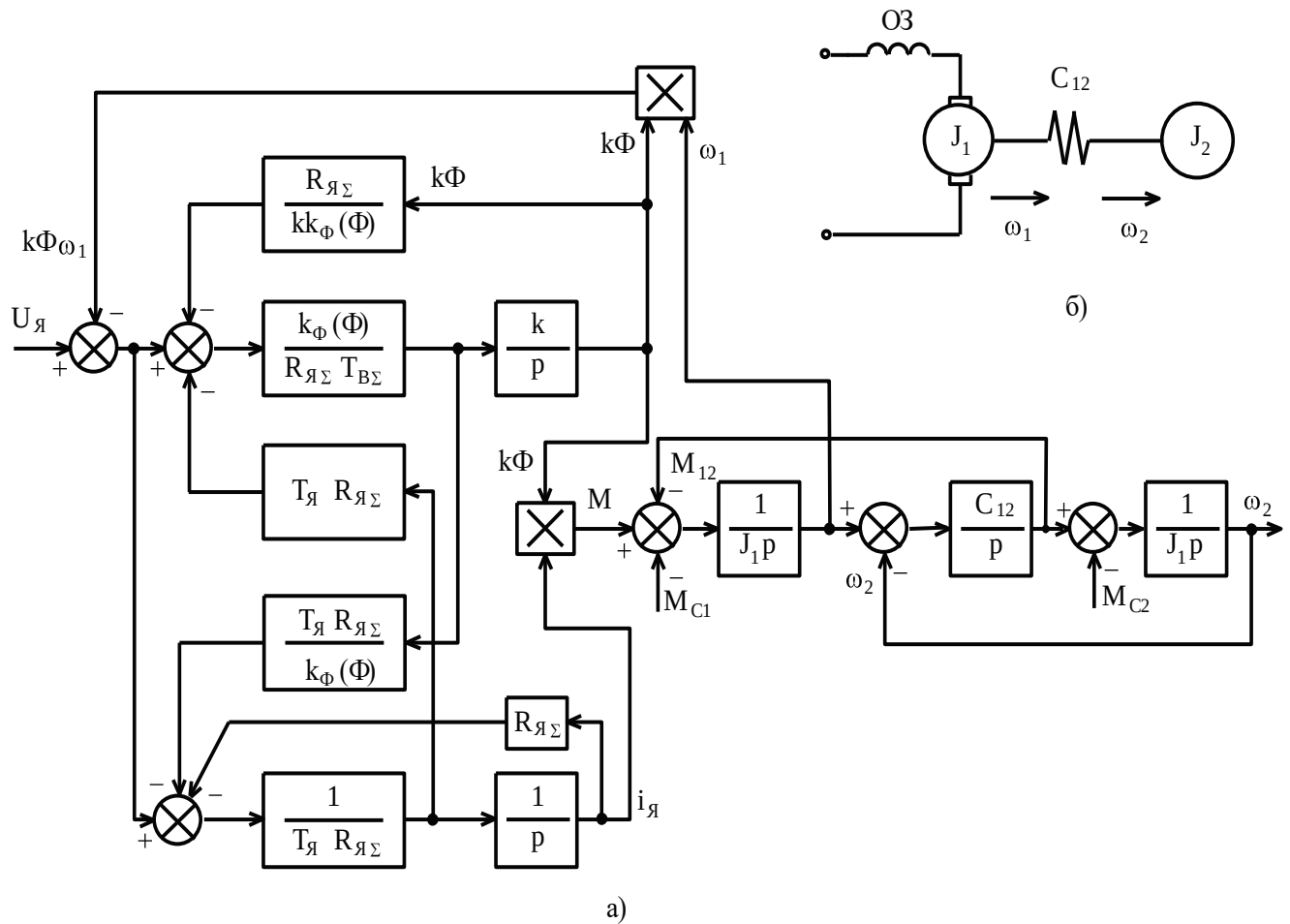


Рисунок 2.6 – Електромеханічна система електропривода постійного струму з двигуном послідовного збудження (а) та її структурна схема (б).

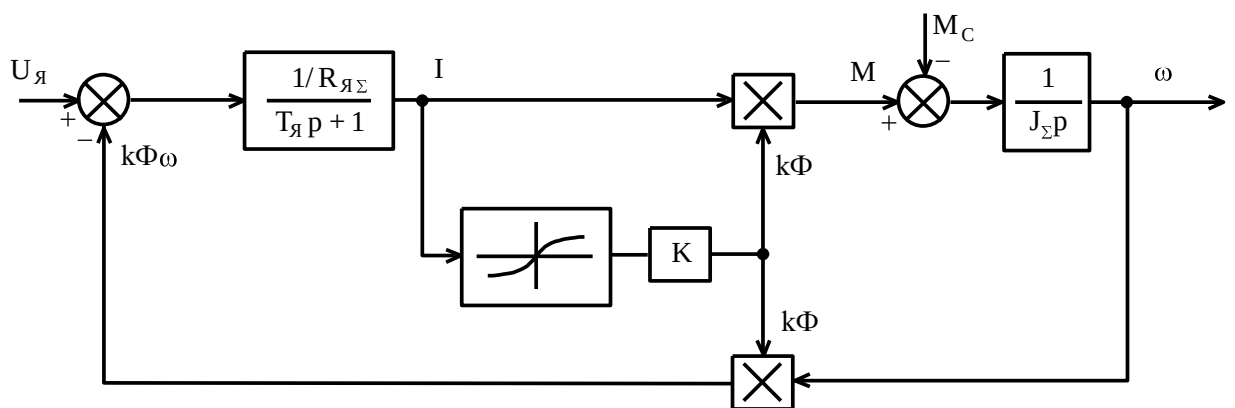


Рисунок 2.7 – Структурна схема електропривода постійного струму з двигуном послідовного збудження.

Розрахунок сумарного опору якірного ланцюга,

$$R_{\text{ЯЕ}} = R_{\text{Я}} + R_{\text{Г.П.}} + R_{\text{Д.П.}} + R_{\text{К.О.}}, \quad (2.16)$$

де $R_{\text{Я}}$ – опір якоря, $R_{\text{Я}} = 0.0317 \text{ Ом}$;

$R_{\text{Г.П.}}$ – опір котушок головних полюсів, $R_{\text{Г.П.}} = 0.0268 \text{ Ом}$;

$R_{\text{Д.П.}}$ – опір котушок допоміжних полюсів, $R_{\text{Д.П.}} = 0.0102 \text{ Ом}$;

$R_{\text{К.О.}}$ – опір котушок компенсаційної обмотки, $R_{\text{К.О.}} = 0.00095 \text{ Ом}$.

$$R_{\text{ЯЕ}} = 0.0317 + 0.0268 + 0.0102 + 0.00095 = 0.07 \text{ Ом}.$$

Опір обмотки збудження

$$R_{\text{О.З.}} = R_{\text{Г.П.}} = 0.0268 \text{ Ом}.$$

Індуктивність якірного ланцюга,

$$L_{\text{я}} = \frac{0,25 U_{\text{Н}}^2}{2 p n I_{\text{Н}} \pi}, \quad (2.17)$$

де $U_{\text{Н}}$ – номінальна напруга двигуна, $U_{\text{Н}} = 1500 \text{ В}$;

p – число пар полюсів, $p = 3$

n – номінальна частота обертання, $n = 770 \text{ об/хв}$;

$I_{\text{Н}}$ – номінальний струм двигуна, $I_{\text{Н}} = 466 \text{ А}$.

$$L_{\text{я}} = \frac{0.25 \cdot 1500 \cdot 60}{2 \cdot 3 \cdot 770 \cdot 466 \cdot 3.14} = 0.003327 \text{ Гн.}$$

Електро́механі́чна стала двигуна,

$$C_{\text{м}} = \frac{pN}{2\pi a}, \quad (2.18)$$

де p – число пар полюсів, $p = 3$;

N – число ефективних провідників, $N = 1050$;

a – число паралельних гілок, $a = 3$.

$$C_{\text{м}} = \frac{3 \cdot 1050}{2 \cdot 3.14 \cdot 3} = 167.113.$$

Магні́тний поті́к двигуна,

$$\Phi = \frac{M}{C_{\text{м}} \cdot I_{\text{я}}}, \quad (2.19)$$

де M – номінальний момент двигуна, $M = 8044 \text{ Нм}$;

$I_{\text{я}}$ – номінальний струм двигуна, $I_{\text{я}} = 466 \text{ А}$.

$$\Phi = \frac{8044}{167.113 \cdot 466} = 0.103 \text{ Вб.}$$

Е.Р.С. двигуна,

$$E = C_{\text{м}} \omega \cdot \Phi, \quad (2.20)$$

де $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ – кутова швидкість двигуна.

$$\omega = 2 \cdot 3.14 \cdot \frac{770}{60} = 80.634 \text{ с}^{-1},$$

$$E = 167.113 \cdot 80.634 \cdot 0.103 = 1392 \text{ В.}$$

Для розрахунку індуктивності обмотки збудження L_{O3} потрібно розрахувати потокозчеплення обмотки збудження Ψ ,

$$\Psi = W \cdot \Phi \cdot \sigma, \quad (2.21)$$

де W – кількість вітків обмотки збудження, $W = 19$;

Φ – магнітний потік двигуна, $\Phi = 0.103 \text{ Вб}$;

σ – коефіцієнт розсіювання полюсів, $\sigma = 1.2$.

$$\Psi = 19 \cdot 0.103 \cdot 1.2 = 14.131.$$

$$L_{O3} = \frac{\Psi}{I_3}, \quad (2.22)$$

де I_3 – струм збудження двигуна, $I_3 = 466 \text{ А}$.

$$L_{O3} = \frac{14.131}{466} = 0.03 \text{ Гн.}$$

Еквівалентна стала часу для математичної моделі,

$$T_E = \frac{L_{\text{я}} + L_{O3}}{R_{\text{я}} + R_{O3}}, \quad (2.23)$$

де $L_{\text{я}}$ – індуктивність якірного ланцюга, $L_{\text{я}} = 0.003327$ Гн;

$L_{\text{оз}}$ – індуктивність обмотки збудження, $L_{\text{оз}} = 0.03$ Гн;

$R_{\text{я}}$ – опір якірного ланцюга, $R_{\text{я}} = 0.0317$;

$R_{\text{оз}}$ – опір обмотки збудження, $R_{\text{оз}} = 0.0268$.

$$T_E = \frac{0.003327 + 0.03}{0.0317 + 0.0268} = 0.575 \text{ с.}$$

Момент інерції якоря,

$$J = \frac{m \cdot R^2}{2}, \quad (2.24)$$

де m – маса якоря, $m = 1530$ кг;

R – радіус якоря, $R = 0.37$ м.

$$J = \frac{1530 \cdot 0.37^2}{2} = 104.78 \text{ кг м}^2.$$

2.3 Побудова математичної моделі тягового електродвигуна ТЛ-2К1

Перевірка математичної моделі на адекватність.

На рисунку 3.8 представлена модель двигуна ТЛ-2К1с номінальними даними, наведеними в таблиці 3.1.[1] У модель були підставлені розрахункові дані, які наведені в таблиці 3.2. На рисунках 3.9 – 3.11 наведені результати моделювання з номінальними початковими умовами, з яких видно, що модель відповідає реальній електричній машині й на ній можна проводити дослідження. Результати моделювання наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 2.1 – Дані двигуна ТЛ-2К1

Найменування параметра	Значення
Номінальна напруга (U_H)	1500 В
Номінальний струм (I_H)	466 А
Номінальна частота обертання (n)	770 об/хв
Номінальний момент (M_H)	8044 Нм
Число ефективних провідників обмотки якоря (N)	1050
Число паралельних гілок обмотки якоря ($2a$)	6
Кількість витків обмотки збудження (W)	19
Коефіцієнт розсіювання головних полюсів (σ)	1.2
Маса якоря (m)	1530 кг
Діаметр якоря ($D_{\text{я}}$)	740 мм
Число пар полюсів ($2p$)	6
Активний опір обмотки якоря ($R_{\text{я}}$)	0.0317 Ом
Активний опір обмотки збудження ($R_{\text{ОЗ}}$)	0.0268 Ом
Активний опір обмотки додаткових полюсів ($R_{\text{ДП}}$)	0.0102 Ом
Потужність (P)	650 кВт
Швидкість (v)	48 км/год

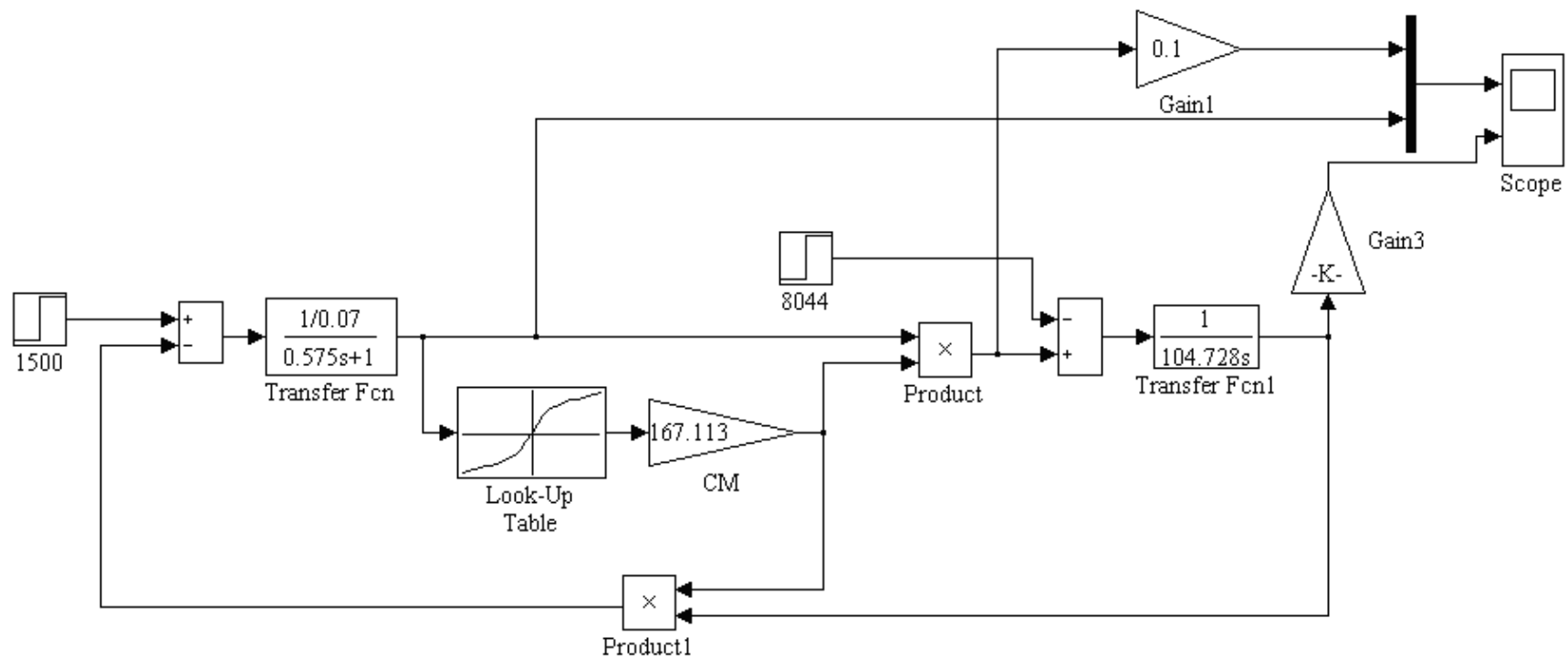
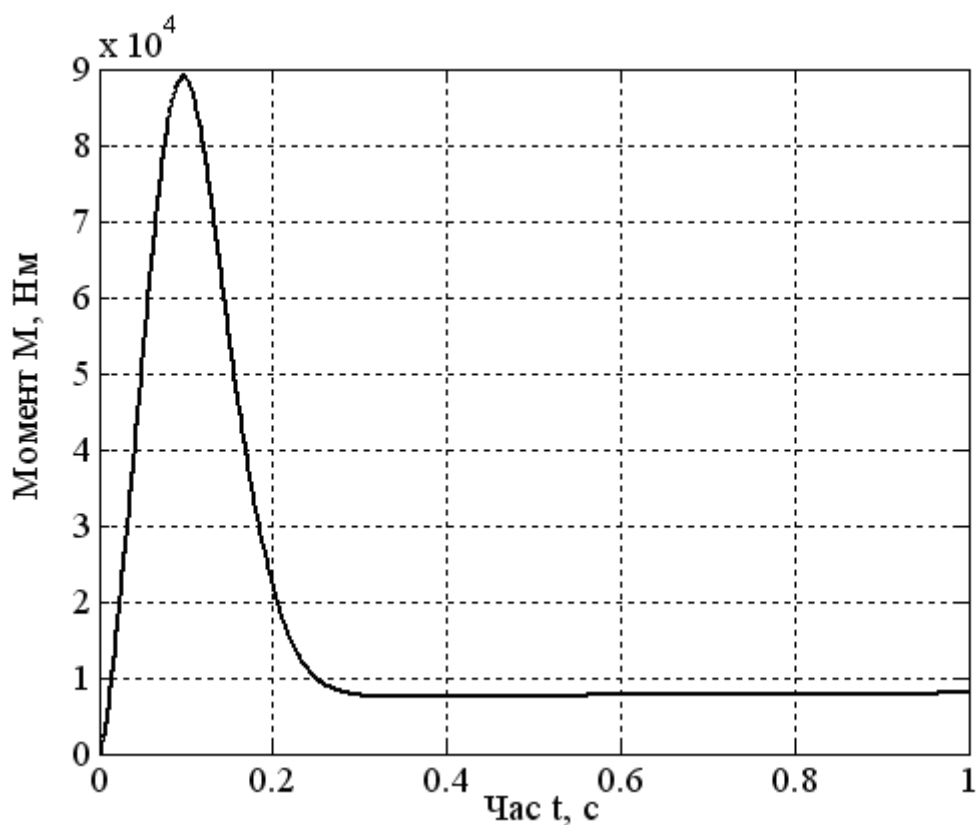


Рисунок 2.8 – Модель двигуна ТЛ-2К1с номінальними параметрами

Таблиця 2.2 – Розрахункові дані

Розрахункова величина	Значення
Індуктивність обмотки якоря ($L_{\text{я}}$)	0.003327 Гн
Сумарний активний опір обмоток ТЕД ($R_{\text{яЕ}}$)	0.07 Ом
Стала часу якоря ($T_{\text{я}}$)	0.105
Електромеханічна постійна двигуна (C_M)	167.113
Номінальний магнітний потік (Φ)	0.103 Вб
ЕРС двигуна (E)	1392 В
Індуктивність обмотки збудження ($L_{\text{ОЗ}}$)	0.03 Гн
Стала часу обмотки збудження ($T_{\text{ОЗ}}$)	0.82
Еквівалентна стала часу ($T_{\text{Е}}$)	0.575
Момент інерції якоря (J)	104.728 кг·м ²

Рисунок 2.9 – Залежність моменту двигуна M від часу t

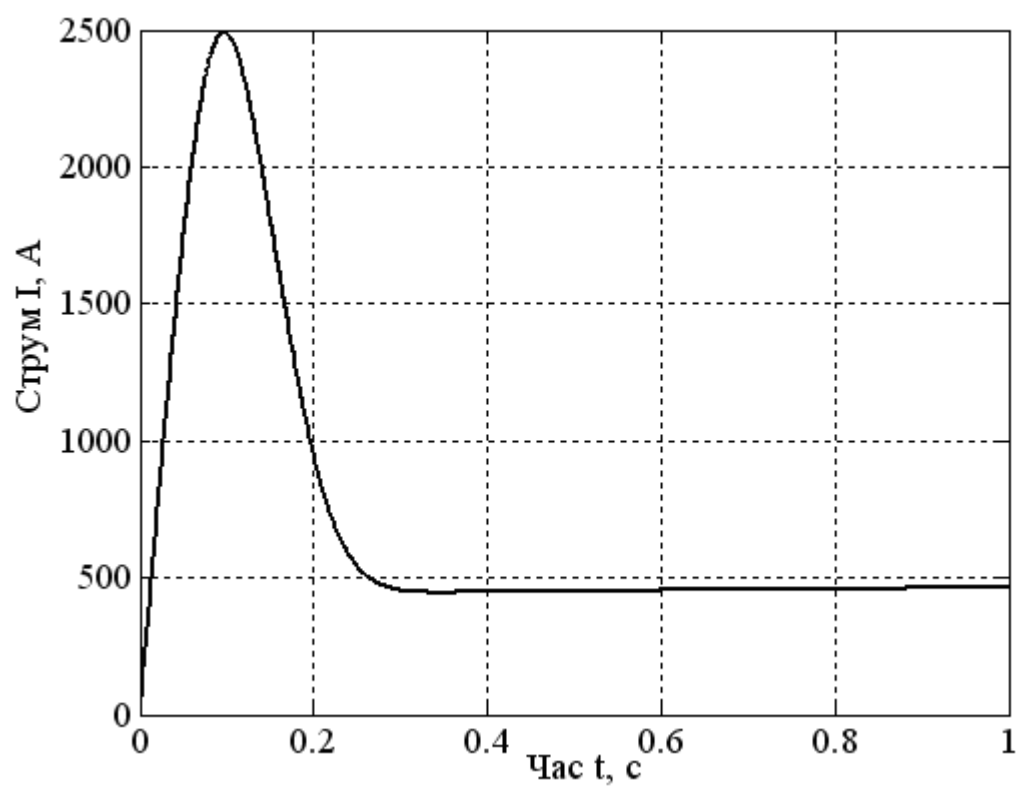


Рисунок 2.10 – Залежність струму I від часу t

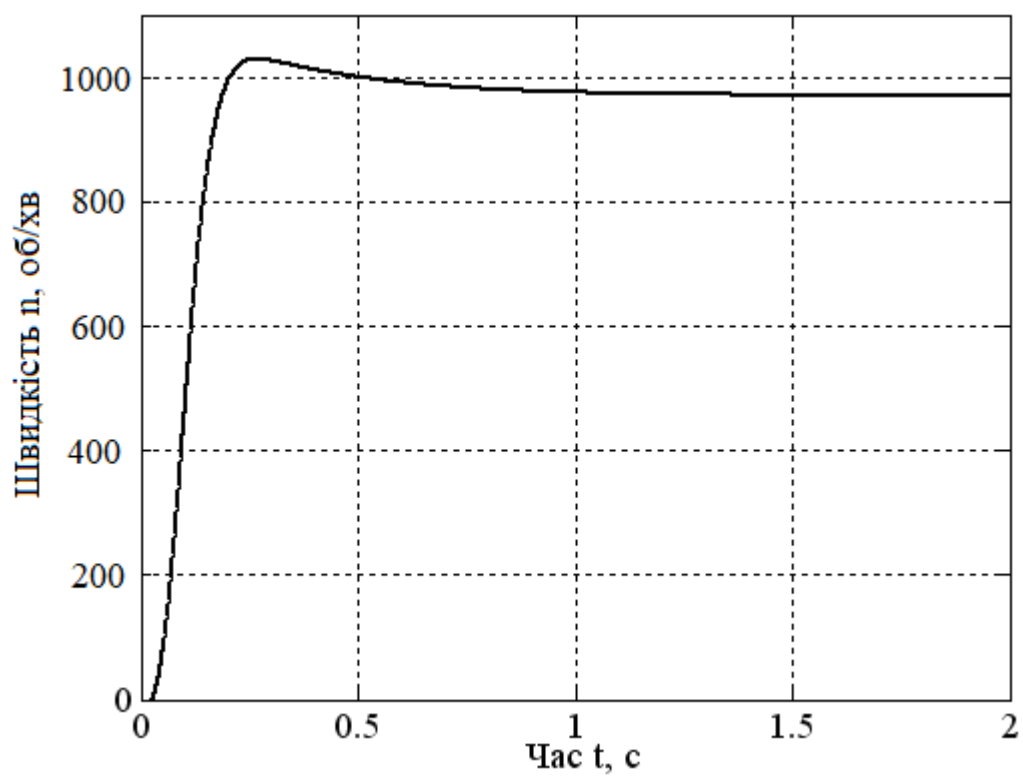


Рисунок 2.11 – Залежність швидкості двигуна n від часу t

3 Математичне поделювання руху потяга з реостатно контакторною системою керування електровоза

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:

$$A_k = \frac{mv^2}{2} + \sum \frac{J_{\partial} \omega_{\partial}^2}{2} + \sum \frac{J_n \omega_n^2}{2} + \sum \frac{J_{\text{я}} \omega_{\text{я}}^2}{2}, \quad (3.1)$$

де A_k — кінетична енергія потяга;

m — маса потяга;

v — швидкість поїзда;

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

J_{Π}, ω_{Π} — 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.

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:

$$\omega_{\text{д}} = \frac{v}{R_{\text{д}}}, \quad (3.2)$$

$$\omega_{\text{п}} = \frac{v}{R_{\text{п}}}, \quad (3.3)$$

$$\omega_{\text{я}} = \mu \omega_{\text{д}} = \frac{\mu v}{R_{\text{д}}}. \quad (3.4)$$

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

$$A_k = \frac{mv^2}{2} \left[1 + \frac{\sum J_{\text{д}}/R_{\text{д}}^2 + \sum J_{\text{п}}/R_{\text{п}}^2 + \sum J_{\text{я}}\mu^2/R_{\text{д}}^2}{m} \right] = \frac{mv^2}{2} \left(1 + \frac{m_{\text{э}}}{m} \right). \quad (3.5)$$

Величину, рівну чисельнику другого члена в квадратній дужці, називають еквівалентною масою частин, що обертаються, двочлен $1 + \frac{m_{\text{э}}}{m} = 1 + \gamma$ — коефіцієнтом інерції частин, що обертаються, а вираз $(1 + \gamma)m = m_{\text{п}}$ — 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:

$$d \frac{(1+\gamma)mv^2}{2} = F_d ds. \quad (3.6)$$

Звідки:

$$(1+\gamma)mv \frac{dv}{ds} = F_d. \quad (3.7)$$

Для знаходження співвідношення між швидкістю і часом слід підставити в рівняння (2.7) $v = \frac{ds}{dt}$, тоді:

$$(1+\gamma)m \frac{dv}{dt} = F_d. \quad (3.8)$$

Формули (3.7) і (3.8) також можна вивести на підставі другого закону Ньютона, застосувавши його до умов руху поїзда. У рівняння (3.7) і (3.8) 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:

$$(1+\gamma)m \frac{dv}{dt} = \xi F_d, \quad (3.9)$$

$$(1+\gamma)mv\frac{dv}{ds}=\xi'F_{\text{д}}. \quad (3.10)$$

Рівності (3.9) і (3.10) називають відповідно першою і другою формою рівняння руху поїзда.

Тягові розрахунки зручніше виконувати, користуючись питомими значеннями рівнодіючої сили і її складових, для чого рівняння (3.9) і (3.10) ділять на вагу G поїзда (іноді на масу поїзда m):

$$\frac{dv}{dt}=\frac{\xi}{(1+\gamma)}f_{\text{д}}, \quad (3.11)$$

$$v\frac{dv}{ds}=\frac{\xi'}{(1+\gamma)}f_{\text{д}}, \quad (3.12)$$

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

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 $F_{\text{д}}$ і $f_{\text{д}}$ в загальному випадку справедливі вирази

$$F_{\text{д}}=F-W-B, \quad (3.13)$$

$$f_{\partial} = f - w - b, \quad (3.14)$$

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

Для подальшого аналізу вводимо в рівняння руху (3.13) замість F_d вираз (2.15) і отримуємо наступну формулу:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{(1+\gamma)} (F - W - B). \quad (2.15)$$

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 , як це витікає з рівняння (3.15). При числі n_d тягових двигунів в поїзді і силі тяги F_k кожного маємо:

$$F = n_d \cdot F_k. \quad (3.16)$$

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:

$$v = 1.8 \frac{D}{\mu} \omega, \quad (3.17)$$

$$F_k = \frac{2\mu}{D} M \eta_3, \quad (3.18)$$

$$P = M \eta_3 \omega, \quad (3.19)$$

$$P = 0.278 v F_k, \quad (3.20)$$

$$\eta = \eta_\partial \eta_3, \quad (3.21)$$

де D – діаметр рушійних коліс, м;

ω – кутова швидкість, рад.;

M – обертаючий момент, кНм;

η_3 – 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.

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 (3.19), 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 ДПСФЗ, модель якого була детально описана раніше, то пояснень він не потребує.

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

$$V = \frac{3,6 \cdot D k \omega}{2\mu} . \quad (3.22)$$

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:

$$\omega_0' = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2. \quad (3.23)$$

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.

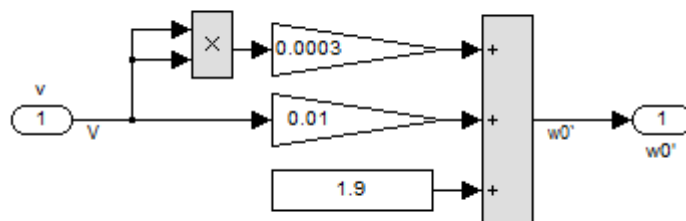


Рисунок 3.8 – Структура моделі блоку, що обчислює питомий опір руху локомотива

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

$$\omega_{04кач}'' = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_{04кач}}, \quad (3.24)$$

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

$$q_{04кач} = \frac{q}{n}, \quad (3.25)$$

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 3.9.

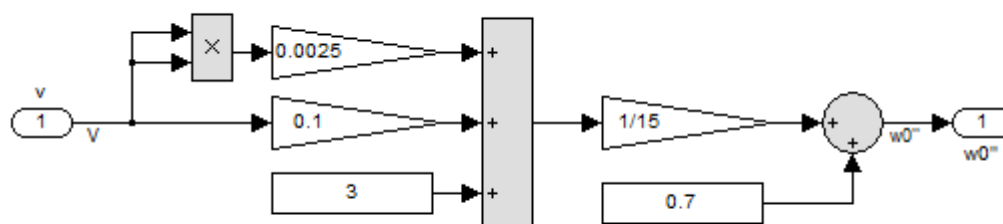


Рисунок 3.9 – Структура моделі блоку, що моделює питомий опір складу (блок3)

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

$$\omega_0 = \frac{m_e \cdot (\omega_0' + i) + m_c \cdot (\omega_0'' + i)}{m_e + m_c}, \quad (3.26)$$

де i – величина хилу на даній ділянці профілю шляху.

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

Виконання умови рівняння (2.26) відбувається таким чином 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 3.4, за основу взята ділянка Харків-Мерефа.

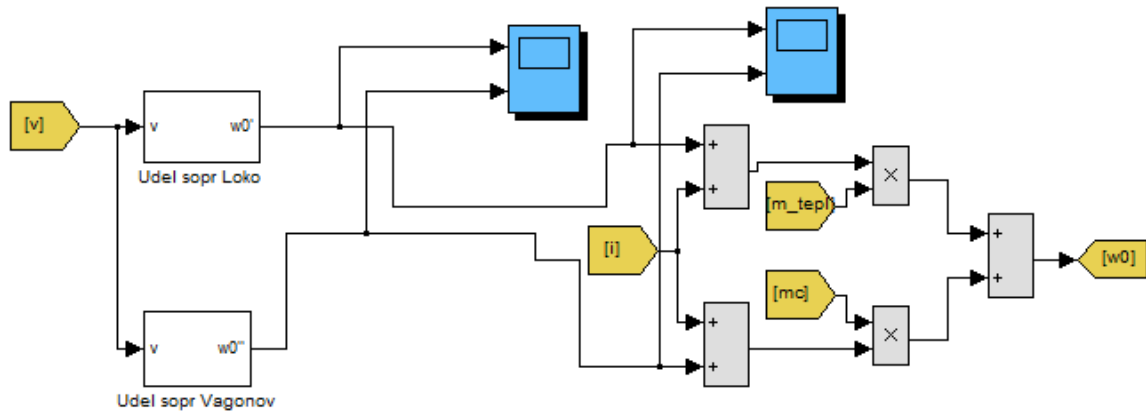


Рисунок 3.10 – Структура блока, що моделює питомий опір потяга

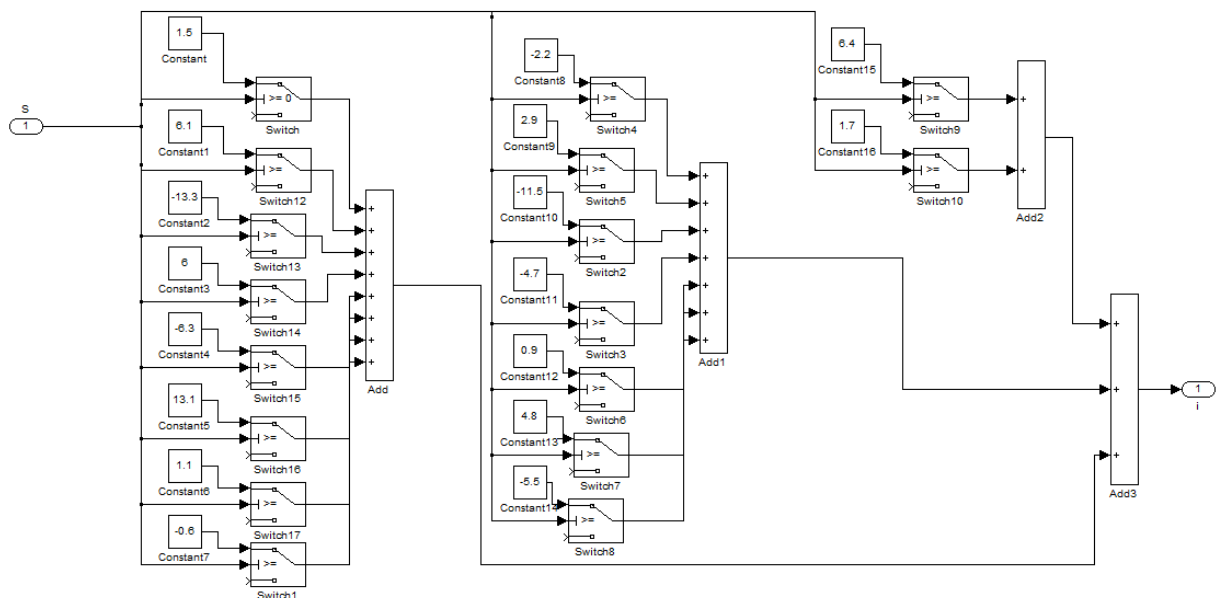


Рисунок 3.11 – Структура підсистеми формування профілю шляху

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

$$M = \frac{D}{2\mu} \cdot F, \quad (3.27)$$

$$W = \omega_0 m, \quad (3.28)$$

де m – маса поїзда.

Вхідними параметрами даного блоку є питомий опір руху складу і його маса. Логіка виконання залежностей (3.27) і (3.28) 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.

Як було сказано в попередньому розділі зміна напруги на тягових двигунах електровозу ВЛ-10 при пуску та регулюванні швидкості руху потяга виконується ступінчасто шляхом зміни опору якірного ланцюгу перемиканням контакторів пускового реостату, а також зміною магнітного потоку двигуна завдяки шунтуванню обмотки збудження. Всього на електровозі існує 54 позиції.

Для побудови характеристик (осцилограм) були використані блоки «To Workspace» та функція «plot». На вхід одного із цих блоків подавався сигнал, який нас цікавить (в даному випадку швидкість потяга), а на інший – параметр часу. В загальному вікні Matlab вводилась функція «plot», та вказувались досліджувані параметри.

Загальний вид моделі, а також осцилограми лінійної швидкості потяга представлені на рисунках 3.12 та 3.13 відповідно.

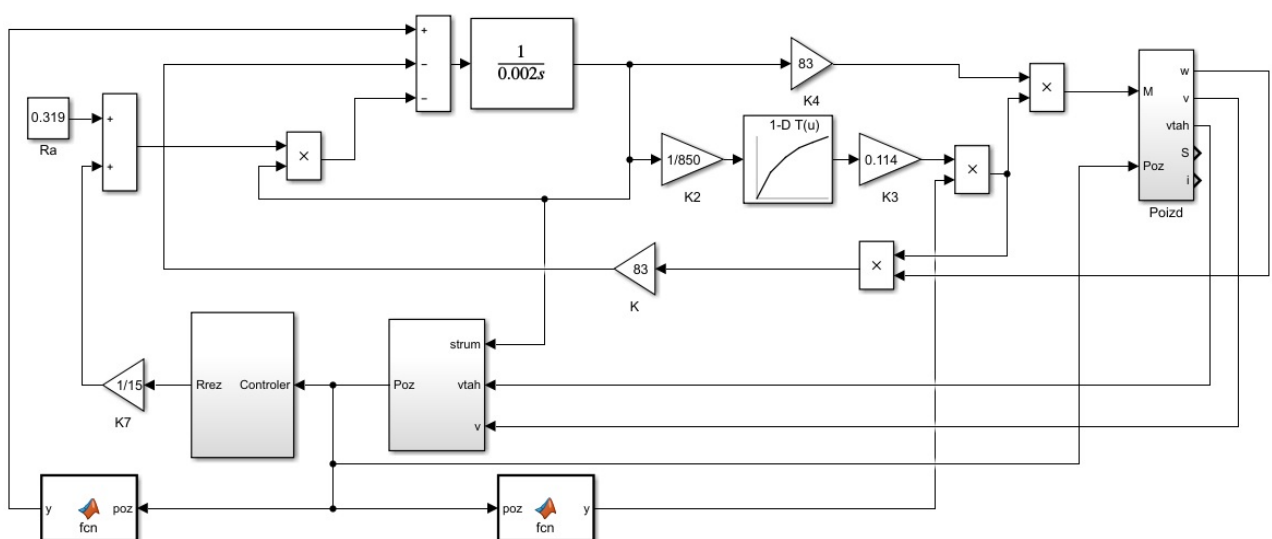


Рисунок 3.12 – Загальний вид моделі поїзда

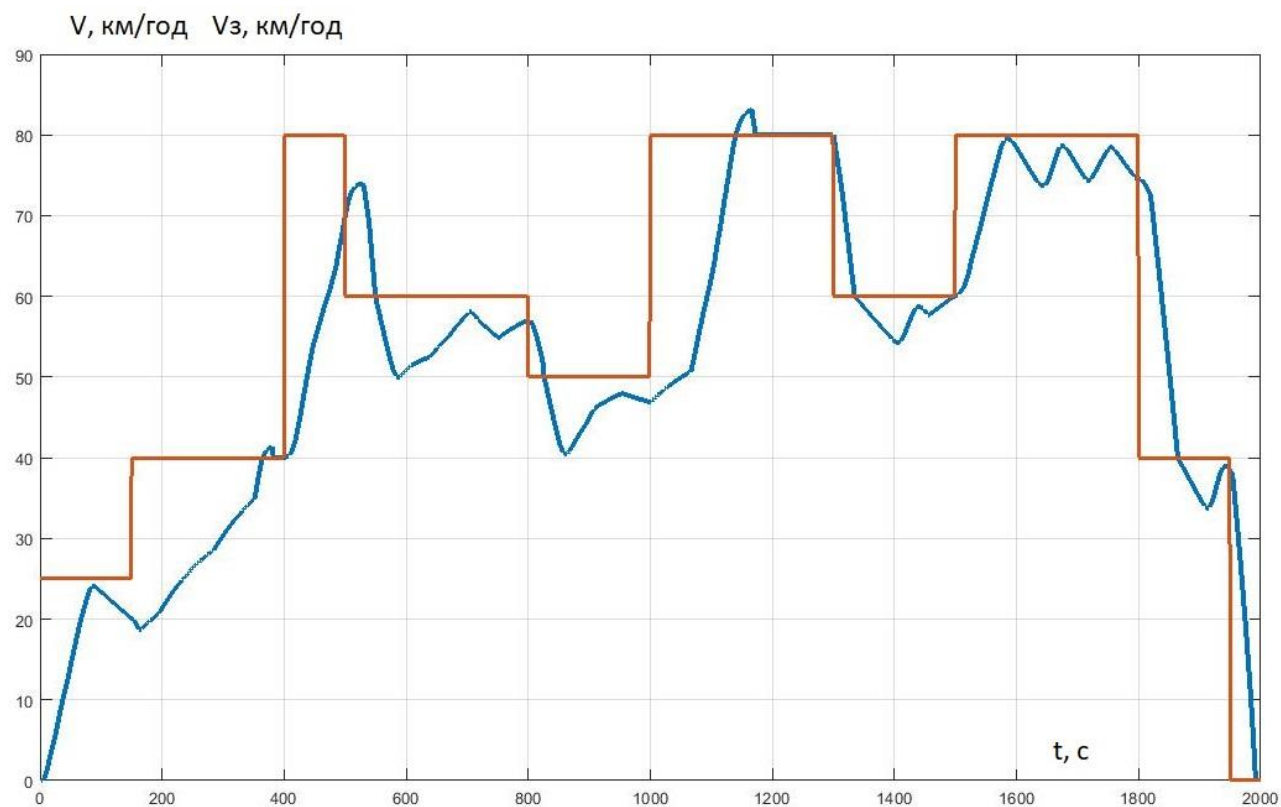


Рисунок 3.13 – Осцилограма лінійної швидкості поїзда на профілі Харків-Мерефа

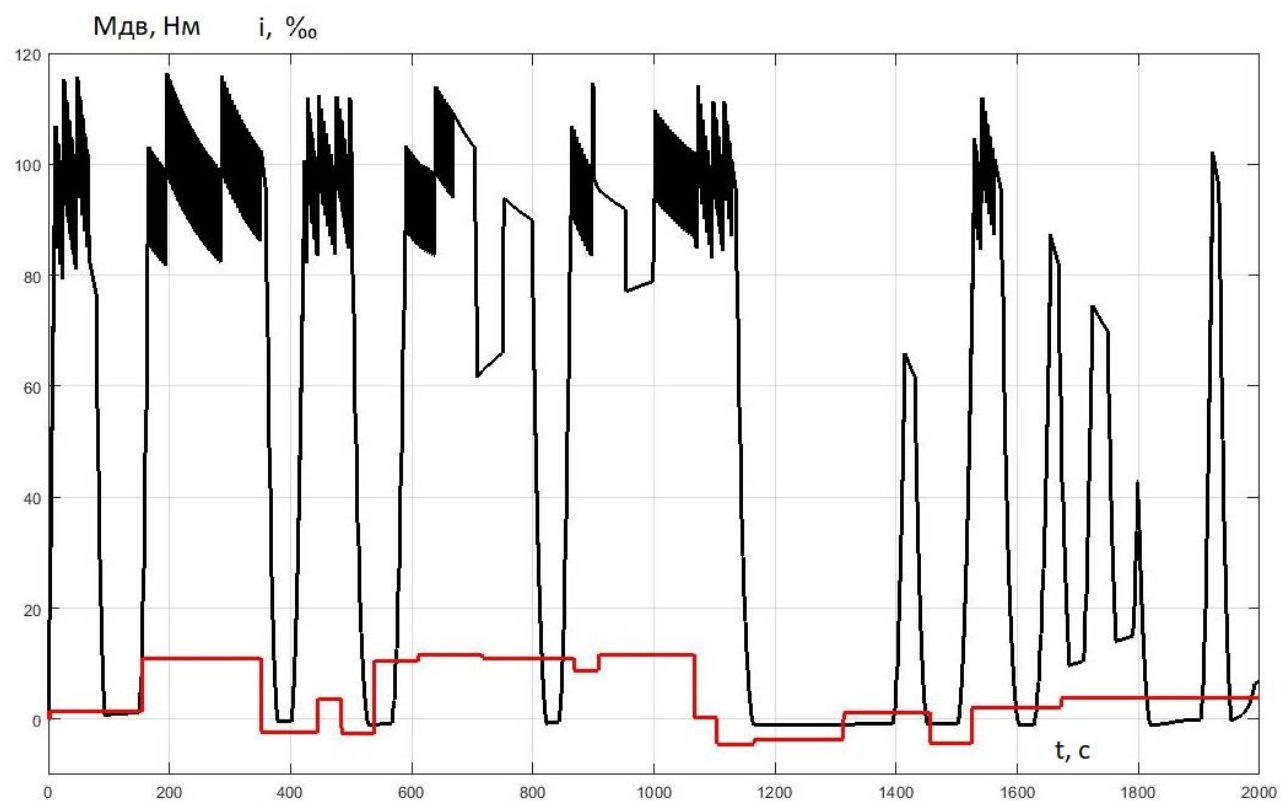


Рисунок 3.14 – Осцилограма моменту на валу тягового двигуна

4 Математичне моделювання системи підлеглого керування з двигунами постійного струму

4.1 Принципи побудови та оптимізації системи підлеглого регулювання

Електродвигун і перетворювач, що представляють собою силову частину електропривода, є об'єктом регулювання в системі автоматичного управління. До об'єкту регулювання відносять також вимірювальні елементи, від яких в ланцюг зворотного зв'язку надходить інформація про фактичні величини струму, напруги, ЕРС, магнітного потоку, швидкості та інше.

Будь-яка замкнута система автоматичного керування (САК) повинна відповідати таким основним вимогам:

- бути стійкою;
- похибка (помилка регулювання) в сталому режимі не повинна перевищувати заданої;
- система повинна забезпечувати необхідну якість перехідних процесів (швидкодія, величину перерегулювання, число коливань і т.д.).

Сучасні уніфіковані системи автоматичного управління електроприводом будують за принципом підлеглого регулювання параметрів.

Аналіз структурних схем об'єкта управління-силової частини електроприводу показує, що вони мають вигляд ланцюжка послідовно з'єднаних ланок, на виході кожної з яких формується той чи інший параметр - е.р.с. перетворювача, струм, швидкість або е.р.с. двигуна, положення та ін. Кожна ланка характеризується однією, рідше двома постійними часу. Найбільш поширеними видами ланок є інерційна та інтегруюча, а також пропорційна. Система підлеглого керування будується так, як показано на рисунку 3.1.

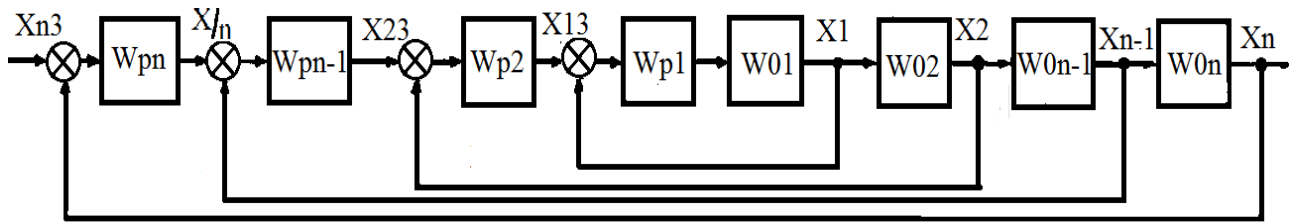


Рисунок 4.1 – Принцип побудови системи підлеглого керування

Кожній ланці об'єкта управління відповідає ланка управляючого пристрою УП; наприклад, ланці W_{o1} - ланка W_{p1} , яка є регулятором параметра x_1 , що формується ланкою W_{o1} . Зворотній зв'язок за регульованим параметром подається на вхід регулятора, де порівнюється із заданим значенням x_{13} , що виробляється ланкою W_{p2} керуючого пристрою. Ланка W_{p2} є регулятором параметра x_2 , що формується ланкою W_{o2} об'єкта управління.

Утворюється система концентричних контурів, число яких n відповідає числу регульованих параметрів електроприводу. Регулятор зовнішнього n -ного контуру регулює основний параметр системи, наприклад положення механізму, і виробляє керуючий вплив для регулятора $n-1$ -го контуру, наприклад регулятора швидкості, і т.д. Таким чином, регулятор W_{p1} підпорядкований регулятору W_{p2} регулятор W_{p2} - регулятору W_{p3} , регулятор W_{pn-1} - регулятору W_{pn} . Можна сказати також, що один параметр управління підпорядкований іншому, наприклад швидкість - положенню, а струм - швидкості.

Перевага системи підлеглого управління в можливості обмеження величини підлеглого параметра шляхом обмеження вихідного сигналу регулятора зовнішнього контуру. З розгляду контуру системи можна зробити висновок, що регулятор являє собою послідовну корегуючу ланку.

Розглянемо найбільш уживані критерії оптимізації контурів системи управління. Всі вони засновані на обліку так званих малих постійних часу, якими відрізняється тиристорний перетворювач з системою імпульсно-фазового управління, функціональні елементи САК і фільтри в її каналах. Крім цих малих, реально існуючих постійних часу, при оптимізації САК доводиться

враховувати еквівалентні малі постійні часу, якими, як показано нижче, характеризуються оптимізовані контури системи. Як видно з рисунку, замкнуті оптимізовані контури входять до складу об'єкта управління для кожного контурного регулятора починаючи з другого.

Найбільш поширеним в уніфікованих системах управління принципом побудови регулятора є компенсація основних інерційностей об'єкта управління. Цей термін, введений в роботу, слід розуміти в широкому сенсі, а саме, що регулятор компенсує дію ланок з більшими постійними часу не тільки інерційного характеру, але й інтегральних, форсуючих та ін.

Принцип компенсації можна сформулювати наступним чином: кожній ланці об'єкта управління з великою постійною часу має відповідати ланка зі зворотною передаточною функцією в складі регулятора. Тоді, якщо не враховувати вплив малих постійних часу, передавальна функція розімкненої системи являє собою коефіцієнт пропорційного підсилення. Практично поведінку регульованої величини в замкнутому контурі, в якому великі постійні часу компенсовані, визначається, крім коефіцієнта пропорційного посилення, дією малих постійних часу. В принципі малі постійні часу, крім еквівалентних, також можна компенсувати, однак цього не роблять з різних міркувань, наприклад непотрібності або неприпустимість занадто високої швидкодії електропривода, погіршення його енергетичних показників і зниження завадостійкості САК.

Згідно з принципом компенсації для управління об'єктом, яка є інерційною ланкою з передавальною функцією

$$W_0(p) = \frac{K_0}{T_p + 1}, \quad (4.1)$$

слід застосувати пропорційно-диференціальний (ПД) регулятор з передавальною функцією

$$W_p(p) = K_p(\tau p + 1), \quad (4.2)$$

де τ – час попередження, прийняте рівним T .

Для компенсації дії інерційної ланки можна застосувати також пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор з передавальною функцією

$$W_p(p) = K_p \cdot \frac{\tau p + 1}{p}, \quad (4.3)$$

де τ - час ізодрома, приймається рівним T .

Наявність інтегруючої ланки надає контуру властивості астатичній системи регулювання.

Якщо об'єкт управління містить дві інерційні ланки з великими постійними часу ($T_1 > T_2$), тобто

$$W_0(p) = \frac{K_0}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}, \quad (4.4)$$

то слід застосувати пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор з передавальною функцією

$$W_0(p) = K_p \cdot \frac{(\tau_1 p + 1) \cdot (\tau_2 p + 1)}{\tau_1 p}, \quad (4.5)$$

де τ_1 - час ізодрома, приймається рівним T_1 ;

τ_2 - час попередження, приймається рівним T_2 .

Що стосується малих постійних часу об'єкта управління і керуючого пристрою, то їх за певних умов можна підсумувати. Еквівалентна передавальна функція ряду послідовно включених інерційних ланок з малими постійними часу виражається дуже громіздкою формулою.

Ці передавальні функції з достатньою для практичних розрахунків системи точністю можна замінити усіченою передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n T_{\mu i} p + 1}. \quad (4.6)$$

Передавальна функція розімкнутого контуру, в якому великі постійні часу компенсовані, з урахуванням малих постійних часу виражається формулою:

$$W^p(p) = \frac{k_p \cdot k_0}{T_p \cdot (\sum T_{\mu} p + 1)}. \quad (4.7)$$

Згідно найбільш поширеному критерію оптимізації, запропонованого Ц. Кесслером і названу ним «Betragsoptimum», величина $T/K_p K_0$ приймається рівною $2 \sum T_{\mu}$, що відповідає коефіцієнту пропорційного підсилення

$$K_p = \frac{T}{K_0^2 \cdot \sum T_{\mu}}. \quad (4.8)$$

Передавальна функція замкнутого оптимізованого контура має вигляд

$$W_3(p) = \frac{1}{2 \cdot (\sum T_{\mu})^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \sum T_{\mu} \cdot p + 1}. \quad (4.9)$$

Таким чином, поведінка регульованої величини на виході замкнутого оптимізованого контура залежить тільки від суми малих постійних часу. Контур являє собою систему другого порядку. Найважливішою характеристикою такої системи є коефіцієнт демпфування

$$\xi = \frac{\beta}{2\sqrt{a}}, \quad (4.10)$$

де β - коефіцієнт при p ; a - коефіцієнт при p^2 .

Перехідні функції регульованої величини на виході системи другого порядку при стрибкоподібній зміні вхідного сигналу наведено на рисунку 3.8 у вигляді сімейства кривих, що відповідають різним значенням ξ . У разі оптимізації по Betrags-оптіуму

$$\xi = \frac{2\sum T_{\mu}}{2\sqrt{2}(\sum T_{\mu})^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707, \quad (4.11)$$

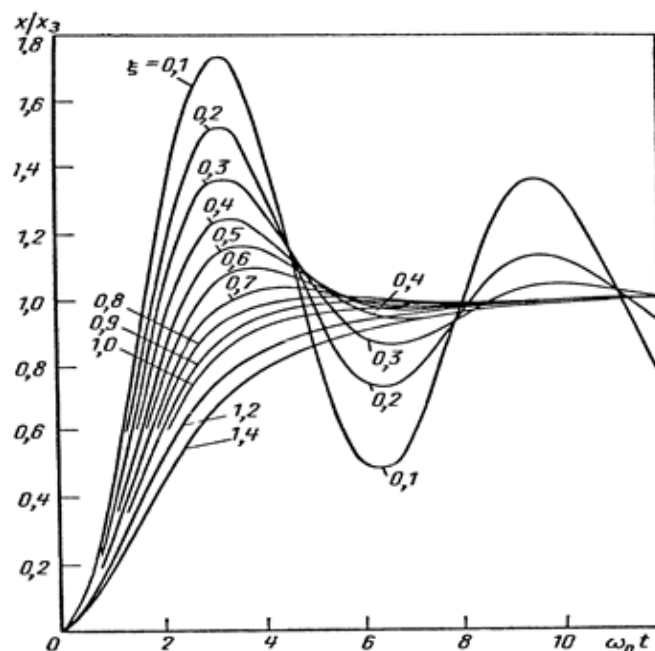


Рисунок 4.2 - Характеристики перехідних функцій регульованої величини на виході системи другого порядку при стрибкоподібному зміні завдання

Загальні правила для вибору регулятора і оптимальної настройки контуру:

- кожній ланці з великою постійною часу в об'єкті регулювання повинна відповідати ланка зі зворотною передаточною функцією і такою ж постійною часу в складі регулятора;

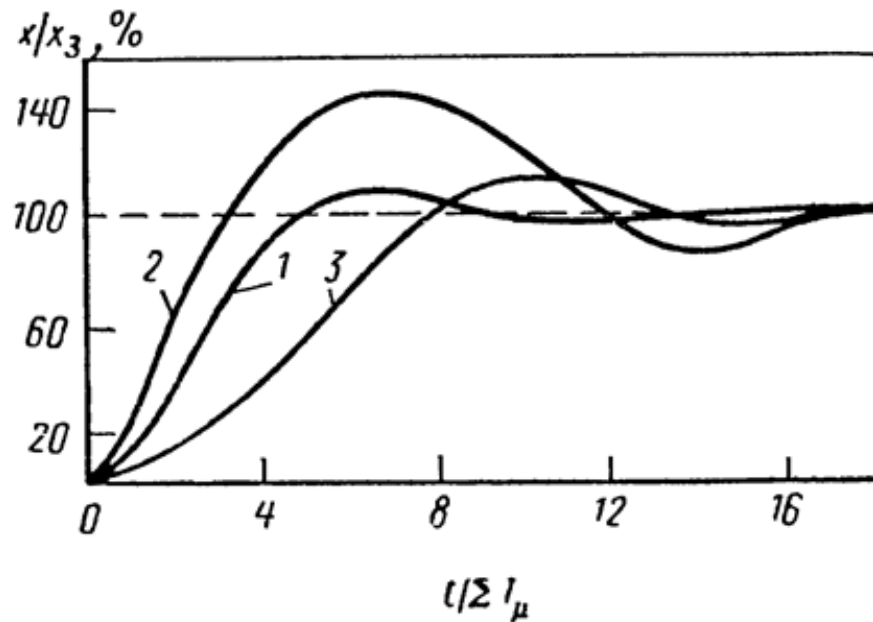
- величина B_0 повинна бути обрана відповідно до умови $B_0=2T_\mu$, тому передавальна функція регулятора $W_p(p) = \frac{T_p+1}{K_0 B_0 p}$.

Перехідна функція характеризується величиною перерегулювання $\sigma=4,3\%$ і часом досягнення максимуму, рівним $6,3\Sigma T_\mu$. Час першого досягнення сталого значення (час наростання) $t_n=4,7\Sigma T_\mu$, час входження в смугу помилки $\pm 2\%$ (час-регулювання) $t_p = 8,4\Sigma T_\mu$. Така настройка контуру не є граничною ні за швидкістю, ні по перерегулюванню, яке можна зменшити або взагалі виключити ціною зниження швидкодії, однак в більшості випадків вона задовольняє практичним вимогам. Завдяки простоті реалізації оптимізація по Betrags-оптимальності стала найбільш поширеним методом оптимальної настройки контурів уніфікованих САК. У вітчизняній літературі цей критерій оптимізації отримав назву технічного, або модульного, оптимальності (МО).

Термін «модульний оптимальність» є, мабуть, більш вдалим, так як він відображає сутність критерію оптимізації, при якому домагаються наближення модуля передавальної функції до одиниці для смуги частот від нуля до максимально високого значення. При стрибкоподібній зміні вхідного сигналу регульована величина буде тим точніше слідувати за заданою, чим ширше ця смуга частот. Чим ближче до одиниці модуль передавальної функції, тим менше динамічна помилка регулювання.

Класична теорія оптимізації систем підлеглого управління, викладена в роботах Ц. Кесслера, не дає іншого способу обліку малих постійних часу, крім їх підсумовування. Поряд з тим, що збільшення суми малих постійних часу змушує зменшувати коефіцієнт пропорційного підсилення регулятора, не байдуже, чи збільшується мала постійна часу в прямому каналі системи або в

каналі зворотного зв'язку. При незмінних величинах K_p і розподіл ΣT_μ в цих каналах суттєво впливає на перехідні функції контуру. Збільшення T_μ в прямому каналі при одночасному зменшенні величини T_μ в каналі зворотного зв'язку робить систему більш демпфованою, і навпаки, затримка сигналу зворотного зв'язку призводить до підвищення перерегулювання.



1 - при оптимізації по МО; 2 - при оптимізації по СО; 3 - при оптимізації по СО з фільтром в каналі завдання

Рисунок 4.3 - Стандартні реакції регульованої величини на стрибок завдання:

Крива 2 відповідає настройці контуру, названої налаштуванням по симетричному оптимуму. Назва «Symmetrisches Optimum» введено Ц. Кесслером по виду логарифмічної амплітудно-частотної характеристики контуру. Перерегулювання $\sigma = 43,4\%$; $t_n = 3,1 \Sigma T_\mu$; $t_p = 16,5 t_n$. Якщо ввести в канал завдання фільтр (інерційна ланка) з постійною часу $4 \Sigma T_\mu$, то перерегулювання вихідної величини зменшиться 8,1%, t_n складе $7,6 \Sigma T_\mu$, а t_p дорівнюватиме $13,3 \Sigma T_\mu$.

4.2 Розрахунок та побудова системи підлеглого керування двигуном ТЛ-2К1

Електропривод з СПК в теперішній час найбільш часто застосовується для приводу механізмів різних машин, що потребують плавного регулювання швидкості в широких межах, зокрема і залізничного транспорту. Структурна схема електроприводу з СПК зображена на рисунку 4.4

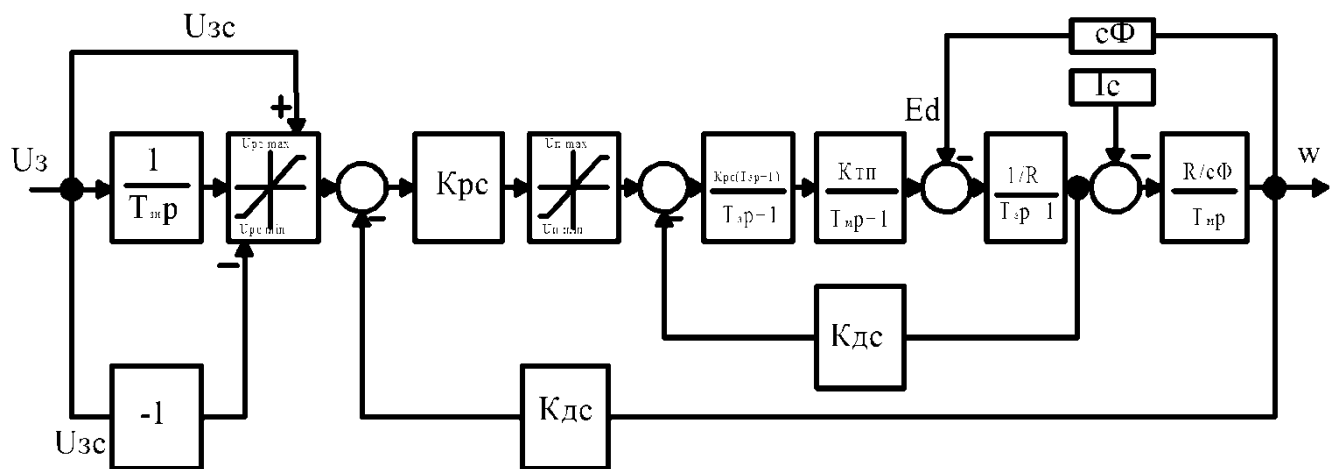


Рисунок 4.4 – Структурна схема електропривода з СПК

Розрахунок параметрів контуру струму робиться відповідно наступних залежностей.

Коефіцієнт підсилення шунта, В/А

$$K_{ш} = \frac{U_{ш}}{I_{н.ш.}}, \quad (4.12)$$

$$K_{ш} = \frac{150 \cdot 10^{-3}}{565} = 1 \cdot 10^{-4}.$$

Коефіцієнт підсилення датчику струму:

$$K_{п.дс} \leq \frac{10}{K_{ш} \lambda I_n}, \quad (4.13)$$

$$K_{п.дс} \leq \frac{10}{10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 565} = 70,796.$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом:

$$K_{дс} = K_{ш} K_{v,дс}, \quad (4.14)$$

$$K_{дс} = 10^{-4} \cdot 70,796 = 7,08 \cdot 10^{-3}.$$

Величина гадючої напруги на вході регулятора струму, В:

$$U_{3.C.max} = K_{дс} \lambda I_n, \quad (4.15)$$

$$U_{3.C.max} = 7,08 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 565 = 9,99 В.$$

Об'єктом регулювання у контурі струму є тиристорний перетворювач, електрична частина двигуна та елементи зворотного зв'язку за струмом. Звідси коефіцієнт підсилення об'єкту

$$K_{зс} = K_{ш} \cdot K_{дс} \cdot \frac{1}{R_e}, \quad (4.16)$$

$$K_{зс} = 150 \cdot 7,08 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{0,0161} = 65,96.$$

Коефіцієнт підсилення регулятора струму:

$$K_{pc} = \frac{T_e}{K_{зс} \cdot 2T_{\mu\pi\pi}}, \quad (4.17)$$

$$K_{PC} = \frac{0,306}{65,69 \cdot 2 \cdot 0,01} = 0,232.$$

При розрахунку параметрів контуру швидкості передавальна функція оптимізованого контуру струму спрощується. Вона представляється у вигляді інерційної ланки з передавальною функцією:

$$W_{P.C.}(p) = \frac{1/K_{ДС}}{2T_{\mu\Pi}p+1} = \frac{K_T}{T_T p+1}, \quad (4.18)$$

де $K_T = 1/K_{ДС}.$

$$T_{\mu\kappa} = T_T = 2T_{\mu\Pi}, \quad (4.19)$$

$$W_{P.C.}(p) = \frac{1/7,08 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,01p+1} = \frac{354,9}{0,02p+1}.$$

Передавальна функція П-регулятора швидкості в однократно інтегруючій системі виражається рівнянням

$$W_{P.Ш.}(p) = K_{P.Ш.} = \frac{T_M}{K_{3Ш} \cdot 2T_{\muШ}}, \quad (4.20)$$

де $K_{3Ш} = K_T \frac{R_e}{k\Phi_H} K_{ДШ},$

$$K_{3Ш} = \frac{10}{\omega_H}, \quad (4.21)$$

$$K_{3ш} = \frac{10}{62} = 0,16129,$$

$$K_{3ш} = 354,9 \cdot \frac{0,0161}{15,72} \cdot 0,16129 = 0,0724.$$

За розрахованими даними побудуємо математичну модель системи підлеглого керування двигунами ТЛ-2К1 у середовищі Matlab. На основі моделі були отримані осцилограми роботи такої системи, а саме момент та швидкість двигуна

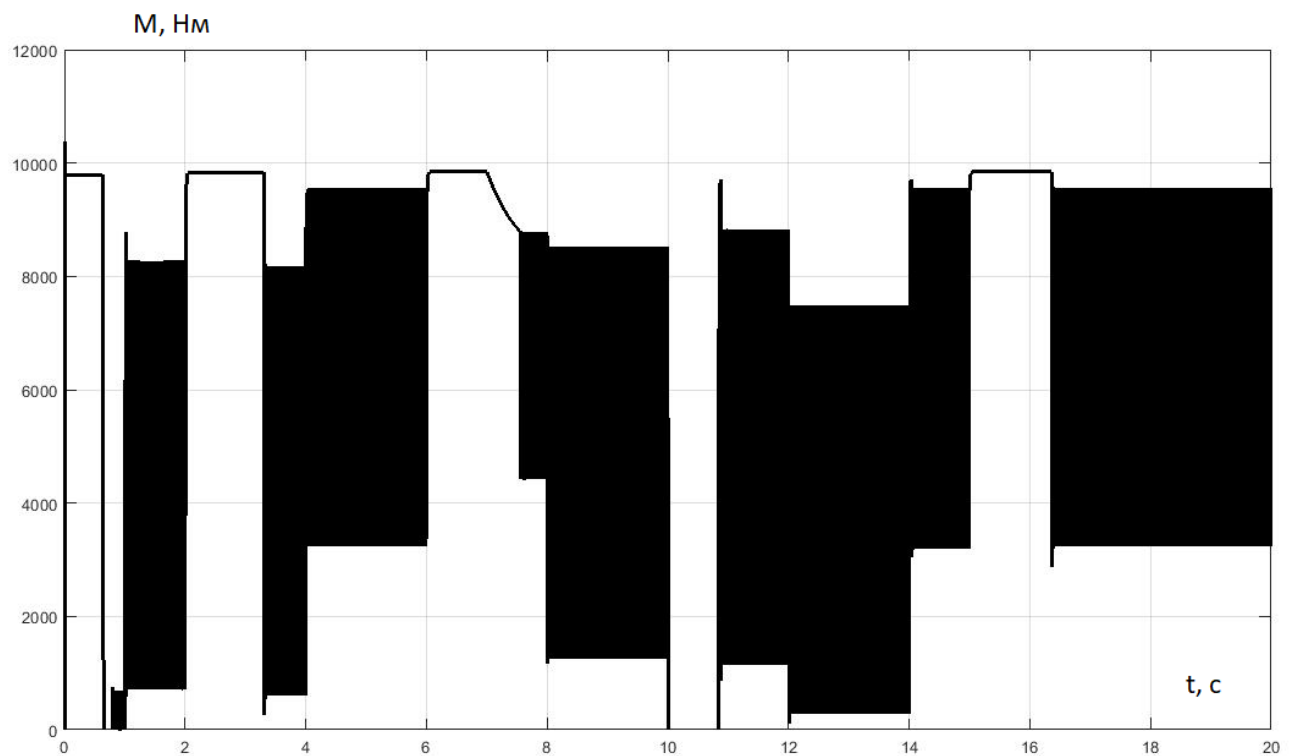


Рисунок 4.5 – Момент двигуна з використанням СПК

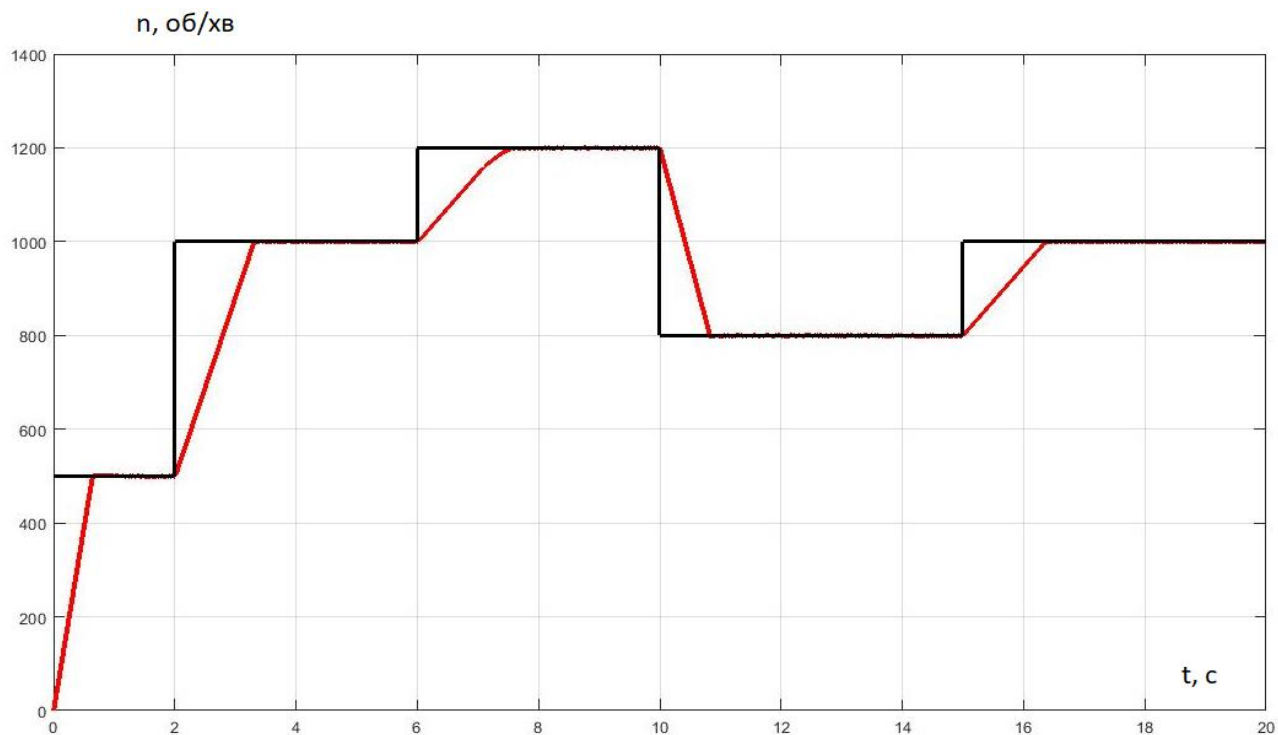


Рисунок 4.6 – Швидкість двигуна з використанням СПК

Для дослідження роботи електровоза з системою підлеглого керування була створена математична модель. В якості навантаження використовується модель поїзда, яка детально була описана у попередньому розділі. На рисунку 4.7 показана математична модель модернізованого електровозу з поїздом.

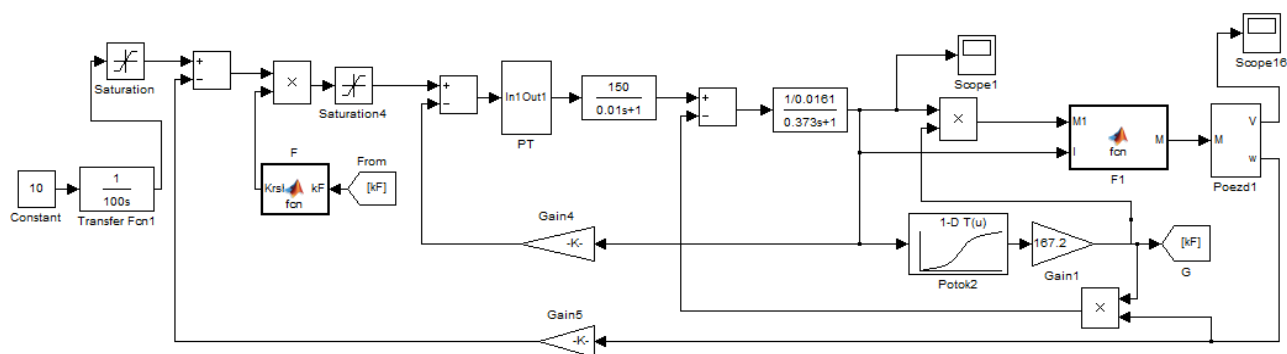


Рисунок 4.7 – Математична модель руху поїзда із системою підлеглого керування

На рисунках 4.8-4.10 наведено графіки швидкості поїзда з модернізованим електровозом, моменту двигуна та пройденого шляху поїзда

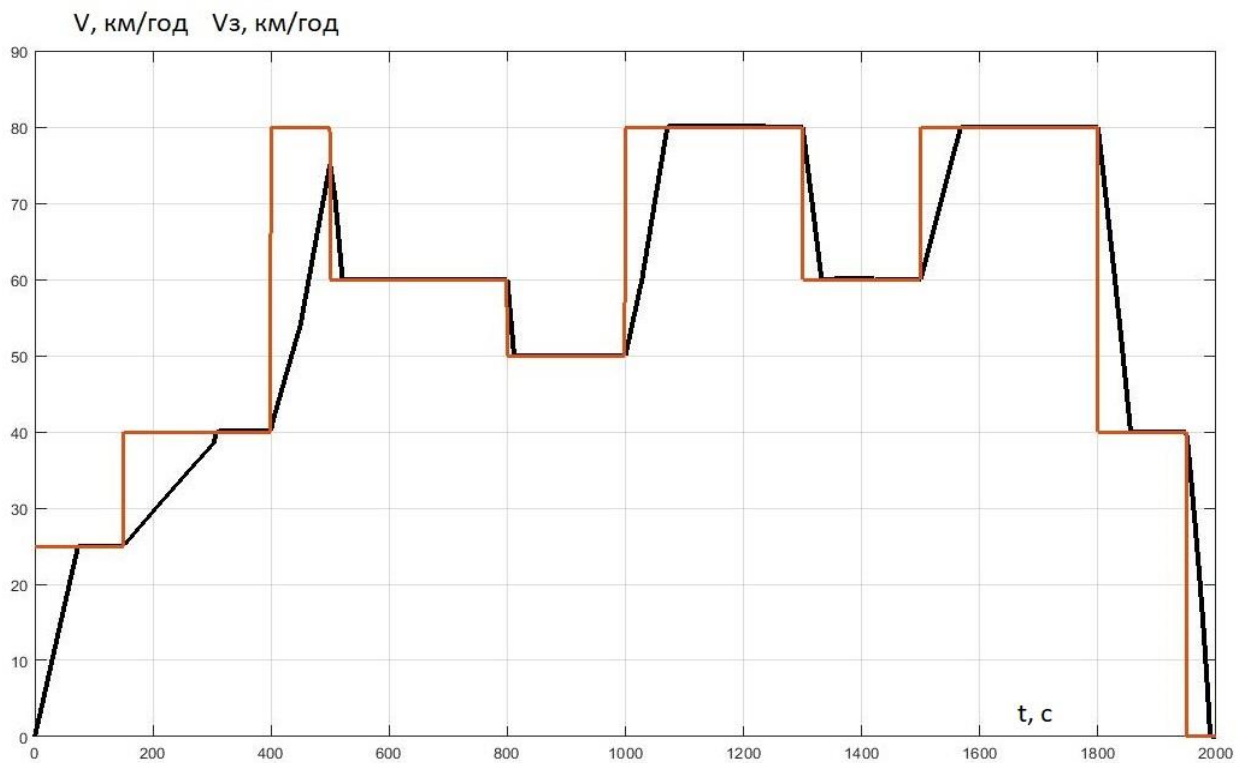


Рисунок 4.8 – Швидкість руху поїзда з використанням СПК двигунами

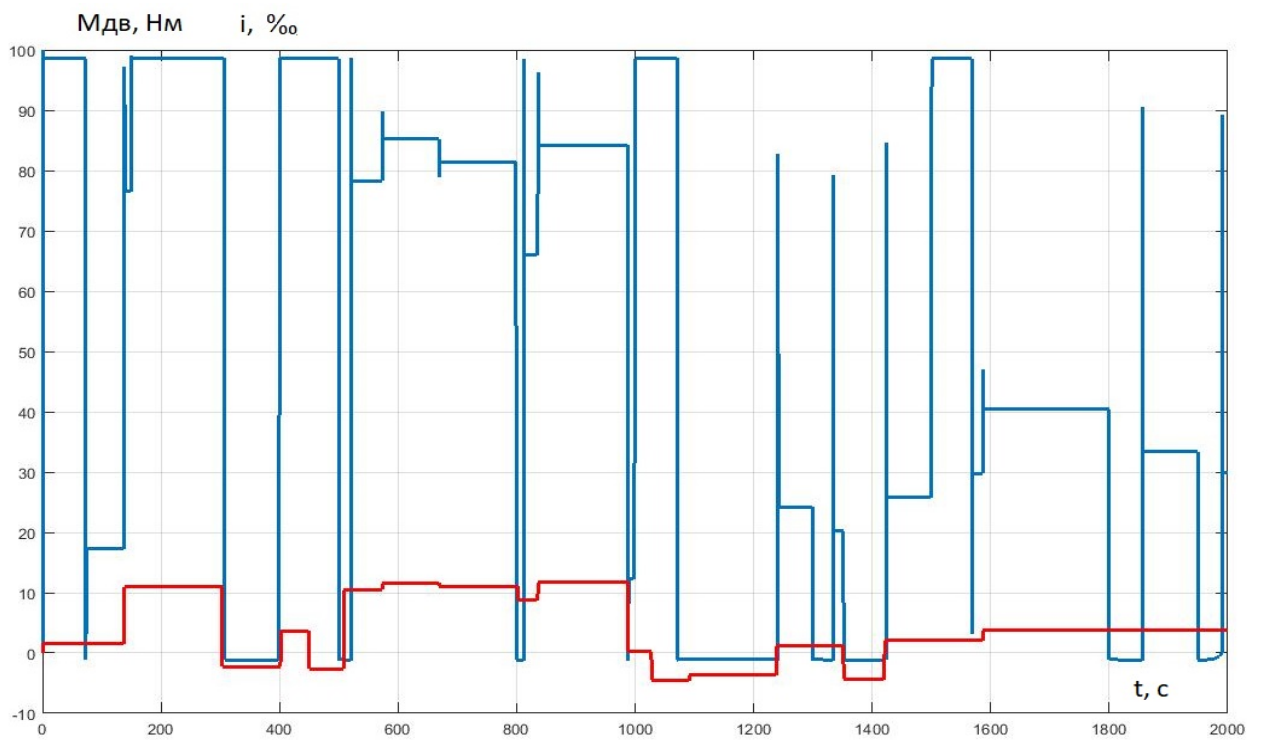


Рисунок 4.9 – Тяговий момент двигуна з використанням СПК двигунами

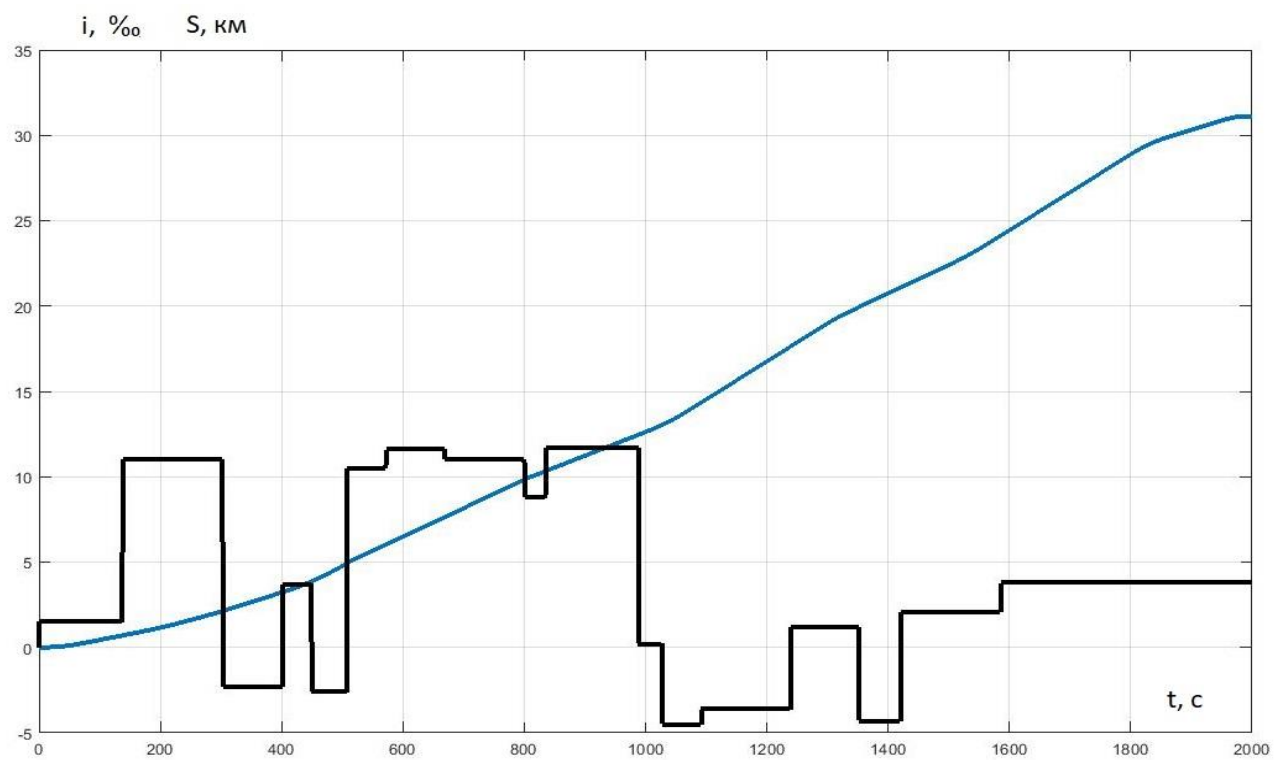


Рисунок 4.10 – Момент опору в залежності від профілю шляху та крива переміщення поїзда

6 Розрахунок економічного ефекту

6.1 Коротка характеристика пропонованого технічного рішення

Модернізація системи керування електровозу, а саме застосування широтно-імпульсного перетворювача, дає можливість реалізовувати на даному рухомому складі більш надійне функціонування системи керування тяговими двигунами. Це надає нам можливість суттєвого поліпшення умов роботи ТЕД та економити електроенергію на тягу.

Контакторно - реостатна система управління е.р.с. залишалася до недавнього часу основною системою електричної тяги на постійному струмі.

Проте ця система володіє багатьма істотними недоліками, пов'язаними головним чином з трудностю регулювання швидкості. Через це на рухомому складі постійного струму прирівняють реостатний пуск, що викликає значні втрати енергії, управління за допомогою контакторів, що розривають великі струми, перемикання груп тягових двигунів, спеціальні системи збудження двигунів при рекуперативному гальмуванні. Більшість цих недоліків усуваються при імпульсному управлінні, яку забезпечує можливість плавного без реостатного регулювання в широких межах напруги, що підводиться до тягових двигунів. Завдяки цьому стає досконалішим і простішим управління швидкістю рухомого складу, відсутній жорсткий зв'язок між напругою двигунів і контактної мережі, спрощується автоматизація процесів руху поїзда, покращуються умови використання рекуперативного гальмування.

Застосування приладів на базі напівпровідникових елементів на залізничному транспорті обумовлюється її техніко-економічними перевагами. За рахунок відсутності рухливих та контактних частин, їх простіше обслуговувати. Також використання ШПП зменшує витрати на експлуатацію електровозів.

6.2 Методика розрахунку економічного ефекту

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

Сумарний по рокам розрахункового періоду економічний ефект (E_T) визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів заходу НТП за розрахунковий період (P_T) над вартісною оцінкою сукупних витрат на здійснення заходу НТП за розрахунковий період ($З_T$) згідно з вказівками

$$E_T = P_T - З_T. \quad (6.1)$$

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, $E_n=0,2$;

t_p – розрахунковий рік;

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

Оскільки автоматичне вимкнення двигунів не вплине на вартісну оцінку результатів, тому економічний ефект буде визначатися економією витрат

$$E_T = Z_T^6 - Z_T^H. \quad (6.3)$$

Вартісна оцінка витрат визначається

$$Z_t = \sum_{t=t_H}^{t_k} Z_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=t_H}^{t_k} (u_t + k_t - l_t) \cdot \alpha_t, \quad (6.4)$$

де Z_t - витрати всіх ресурсів у рік t (включаючи витрати на отримання супутніх результатів) грн.;

u_t - поточні витрати у рік t без урахування амортизаційних відрахувань на реновацію грн.;

k_t - одноразові витрати у рік t ;

l_t - залишкова вартість (ліквідаційне сальдо) основних фондів, що вибувають у рік t .

6.3 Розрахунок капітальних витрат

До капітальних вкладень на модернізацію одного електровозу входять витрати, пов'язані з придбанням перетворювача, витрати на демонтаж базового обладнання і монтаж нового. Вартість широтно-імпульсного перетворювача 1413600 грн. Для модернізації необхідно чотири одиниці, тому загальна вартість 5654400 грн.

Розглянемо витрати підприємства на оплату праці працівників та відрахування на соціальні заходи, що пов'язані з демонтажем базового обладнання, монтажем нового обладнання та встановленням широтно-імпульсного перетворювача. Трудові витрати на демонтаж базового обладнання та монтаж нового обладнання представлені в таблиці 6.1, де розрахована основна і додаткова заробітна плата слюсарів п'ятого розряду по видам виконаних робіт, а також загальна сума трудових витрат.

Витрати складуть, грн.

$$B_{\text{МОНТ}} = Z_M \cdot m, \quad (6.5)$$

де m – кількість обладнання;

Z_M – витрати на монтаж обладнання, грн.

Трудові витрати на демонтаж складають

$$B_{\text{ДЕМОНТ}} = Z_D \cdot m, \quad (6.6)$$

де m – кількість обладнання;

Z_D – витрати на демонтаж обладнання, грн.

Витрати на сировину та матеріали для виконання робіт з демонтажу енергетичної установки визначаються на основі встановленої норми витрат матеріалів на виконання всього обсягу робіт з монтажу та ціни матеріалів.

Витрати на заробітну плату для виконання монтажних робіт включають витрати на основну заробітну плату та допоміжну.

Таблиця 6.1 – Трудові витрати на демонтаж та монтаж обладнання

Вид робіт	Розряд	Кількість працівн.	Годин. тариф. ставка	Кількість годин на одиницю	Основна заробітна плата, грн.	Дод. заробіт. плата, грн.	Відрах. на соц. заходи, грн..	Усього грн.
Демонтаж реостата	5	4	50,49	0,5	100,98	10,098	24,44	135,52
Демонтаж контактора	5	4	50,49	0,5	100,98	10,098	24,44	135,52
Монтаж широтно-імпульсного перетворювача	5	5	50,49	8	3231,36	323,136	781,99	4336,5

Затрати на матеріали приймаємо 58900 грн.

Існуюча система керування включає в себе 6 резисторів та 20 контакторів на одну секцію, тобто разом на електровоз 12 резисторів та 40 контакторів. Запропонований варіант модернізації включає в себе 4 широтно-імпульсних перетворювачів на весь електровоз.

Підставляємо відповідні значення та отримуємо:

$$B_{\text{монт.п}} = 4336,5 \cdot 4 = 17345,94 \text{ грн}$$

$$B_{\text{демонт.к}} = 135,52 \cdot 40 = 5420,8 \text{ грн}$$

$$B_{\text{демонт.р}} = 135,52 \cdot 12 = 1626,24 \text{ грн}$$

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

$$\Delta K = \Sigma B_{\text{ПО}} + B_{\text{МОНТ}} + B_{\text{ДЕМОНТ}} + B_{\text{м}}, \quad (6.7)$$

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

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

$$\Delta K = 5654400 + 58900 + 17345,94 + 5420,8 + 1626,24 = 5737692,73 \text{ грн}$$

Економічний ефект від запропонованих модернізаційних заходів досягається за рахунок економії електричної енергії на роботу системи керування та витрат на її обслуговування та ремонт.

Одержуємо витрати електроенергії на роботу системи керування одного електровоза базового варіанту і нового варіанту.

Визначимо пробіг електровоза за рік

$$L_{\text{рік}} = 365 \times L_c \quad (6.8)$$

де, L_c - пробіг середньодобовий, км.

Середньодобовий пробіг електровоза визначається за формулою

$$L_c = \frac{24}{O_l} \cdot 2 \cdot L = \frac{48L}{O_l}$$

де, L - відстань ділянки обертання локомотива, км;

O_l - повний обіг локомотива, год.

$$L_c = \frac{48 \cdot 268}{19} = 677 \text{ км}$$

$$L_{\text{рік}} = 365 \cdot 677 = 247124 \text{ км}$$

Середньорічний бюджет часу електровозу

$$K_{об} = 365 \cdot 24 - (\sum T_{IP1} + \sum T_{IP2} + \sum T_{IP3} + \sum T_{mo3} + \sum T_{mo2}) , \quad (6.9)$$

де, $\sum T_{IP3}, \sum T_{IP2}, \sum T_{IP1}$ - простій на ремонті ПР3, ПР2, ПР1 середньорічний, год;

$\sum T_{mo3}, \sum T_{mo2}$ - простій на технічному обслуговуванні ТО3 та ТО2 в середньому за рік, год.

Простій на i - виді ремонту за рік

$$\sum T_i = \sum M_i \cdot t_{\text{рем}i} , \quad (6.10)$$

де $\sum M_i$ - кількість i -тих видів ремонтів за рік;

$t_{\text{рем}i}$ - норма простою на ремонт i -ого виду ремонту, год.

Кількість ремонтів i -го виду за рік

$$\sum M_i = \frac{L_{pi4}}{n_{pem_i}}, \quad (6.11)$$

де, n_{pem_i} - міжремонтний пробіг і-го виду ремонту;

$$\sum M_{пп-3} = \frac{247124}{400000} = 0,618$$

$$\sum M_{пп-2} = \frac{247124}{200000} = 1,236$$

$$\sum M_{пп-1} = \frac{247124}{30000} = 8,237$$

$$\sum M_{ТО-3} = \frac{247124}{677 \cdot 5} = 73$$

де 5 – міжремонтний період ТО-3, діб.

Розрахуємо кількість ТО-2 за рік:

$$\sum M_{ТО-2} = \frac{365}{2} - \sum M_{mp3} - \sum M_{mp2} - \sum M_{mp1} - \sum M_{mo3} \quad (6.12)$$

$$\sum M_{ТО-2} = \frac{365}{2} - 0,618 - 1,236 - 8,237 - 73 = 99,41$$

Таким чином середньорічний простій електровозу на і-му виді ремонту складає

$$\sum T_{пп-3} = 0,618 \cdot 91 = 56,221 \text{ год},$$

$$\sum T_{\text{ПР-2}} = 1,236 \cdot 36 = 44,482 \text{ год},$$

$$\sum T_{\text{ПР-1}} = 8,237 \cdot 15 = 123,562 \text{ год},$$

$$\sum T_{\text{ТО-3}} = 73 \cdot 6 = 438 \text{ год},$$

$$\sum T_{\text{ТО-2}} = 99,41 \cdot 0,5 = 49,7 \text{ год}.$$

Ефективний фонд робочого часу електровоза

$$T_{\text{эф}} = 365 \cdot 24 - (56,221 + 44,482 + 123,562 + 438 + 49,7) = 8024,03 \text{ год}.$$

Потужність втрат при реостатно-контакторній системі складається з втрат на резисторах та контакторах, втрати на одному резисторі 1820 Вт, а на контакторі 520 Вт. Звідси маємо, що потужність втрат на електровозі за одну годину дорівнює:

$$P_{\text{втр}}^{\text{баз}} = 1820 \cdot 12 + 520 \cdot 40 = 42600 \text{ Вт} = 42,6 \text{ кВт}.$$

Модернізована система з широтно-імпульсним перетворювачем споживає 4,52 кВт на один перетворювач, потужність втрат на весь електровоз складає $P_{\text{втр}}^{\text{мод}} = 18,06 \text{ кВт}.$

Визначаємо річну кількість електричної енергії спожитої системою керування для базового варіанту,

$$E_{\text{річ}}^{\text{баз}} = P_{\text{втр}}^{\text{баз}} \cdot T_{\text{об}} = 42,6 \cdot 8024,03 = 341823,7 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

для модернізованого варіанту,

$$E_{річ}^{mod} = P_{втр}^{mod} \cdot T_{об} = 18,06 \cdot 8024,03 = 144914 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Визначаємо економію витрат на електричну енергію на тягу

$$\Delta E_{річ} = (E_{річ}^{баз} - E_{річ}^{mod}) \cdot e_3 = (341823,7 - 144914) \cdot 6,9 = 1358676,9 \text{ грн}$$

де e_3 – вартість електричної енергії, 6,9 грн.

Визначаємо економію витрат на ремонт

Таблиця 6.2 – Визначення загальної вартості ремонту системи керування

Вид ремонту	Кількість ремонтів	Вартість ремонту, грн	Кількість одиниць, шт	Вартість ремонту обладнання електровозу, грн
Вартість ремонту реостатно-контакторної системи				
ПР-3	0,618	5040,9	40	124611,0
ПР-2	1,236	840,53	40	41555,8
ПР-1	8,237	527,86	40	173919,3
ТО-3	73	325,41	40	950197,2
ТО-2	99,41	213,35	40	848364,9
Разом				2138648,3
Вартість ремонту широтно-імпульсного перетворювача				
ПР-3	0,618	121354,75	4	299988,9
ПР-2	1,236	119266,84	4	589655,3
ПР-1	8,237	12014,68	4	395859,7
ТО-3	73	1572,19	4	459079
ТО-2	99,41	0	4	0
Разом				1744583,4
Різниця вартості ремонту				394064,9

При виконанні електровозу ТО-2 завжди проводять огляд та обслуговування контактної апаратури. При заміні реостатно-контакторної

системи на широтно-імпульсний перетворювач огляд виконувати не потрібно. Тим самим зменшується час виконання ТО-2.

Таким чином річна економія поточних витрат на ремонт системи керування

$$\Delta E_{річ}^{рем} = 2138648,3 - 1744583,4 = 394064,9 \text{ грн}$$

Загальна економія витрат складе

$$\Delta E_{річ}^{заг} = 1358676,9 + 394064,9 = 1752742 \text{ грн}$$

Розрахунок економічного ефекту здійснюється у табличній формі

Таблиця 6.3 - 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.	5737,7									
Економія поточних витрат Δu_t , тис. грн	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7
Економічний ефект E_t , тис.грн.	-3985	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7	1752,7
Коефіцієнт приведення α_t	0,909	0,826	0,751	0,683	0,621	0,564	0,513	0,467	0,424	0,386
Економічний ефект з урахуванням приведення $E_t \cdot \alpha_t$	-3622,7	1448,5	1316,8	1197,1	1088,3	989,4	899,4	817,6	743,3	675,7

Економічний ефект наростаючим підсумком $E_1 + E_2 + \dots + E_k$ тис. с.грн.	-3622,7	-2174,2	-857,4	339,7	1428,0	2417,4	3316	4134	4877	5553
--	---------	---------	--------	-------	--------	--------	------	------	------	------

З таблиці видно, що за життєвий цикл обладнання у 10 років економічний ефект складе 5553000 грн., що вказує на доцільність запропонованої модернізації системи керування електровозу ВЛ11. 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 системи керування, у якій відсутні недоліки реостатно-контакторної системи. В цьому співвідношенні кращі показники притаманні системі підлеглого керування.

З урахуванням вище сказаного були проведені дослідження з точки зору можливого застосування тягових двигунів ТЛ-2К1 з різними системами керування для приводу електровозу постійного струму ВЛ10. Для цього в процесі моделювання була розроблена структурна схема потяга, а також на її основі побудована і математична модель з урахуванням навантаження у вигляді профілю шляху. Були досліджені різні типи систем керування такі, як реостатно контакторна та система підлеглого керування. В якості навантаження був змодельований профіль шляху з різними величинами ухилів. На базі отриманої моделі були зняті осцилограми швидкості руху потягу.

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. Красношайка, М.Я. Островерхов. – К.: 2020.
- 9 Сенько, В.І. Електроніка і мікросхемотехніка. Елементна база електронних пристроїв. [Текст]: Підручник у 4-х томах / В.І. Сенько, за ред. В. І. Сенька. Т.1. – К.: Обереги, 2000. – 300 с.
- 10 Банєв, Є.Ф. Енергоресурсозберігаючий електропривод ескалатора метрополітена [Текст]: дис. к.т.н.: 05.09.03 / Є.Ф. Банєв. Харків, 2013. – 140 с.
- 11 Чорний, О.П. Моделювання електромеханічних систем [Текст] / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовой – Кременчук, 2001. – 376 с.
- 12 Приймак, Б.І. Нечітке керування електротехнічними об'єктами [Текст] / Б.І. Приймак, М.М. Бондаренко, О.М. Халімовський // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №10. – С. 308-311.

Додаток А
Ілюстраційний матеріал

Дослідження роботи модернізованого електровозу ВЛ11



Виконав:

студент групи 214-ЕЕП-323

Євген РУБАНСЬКИЙ

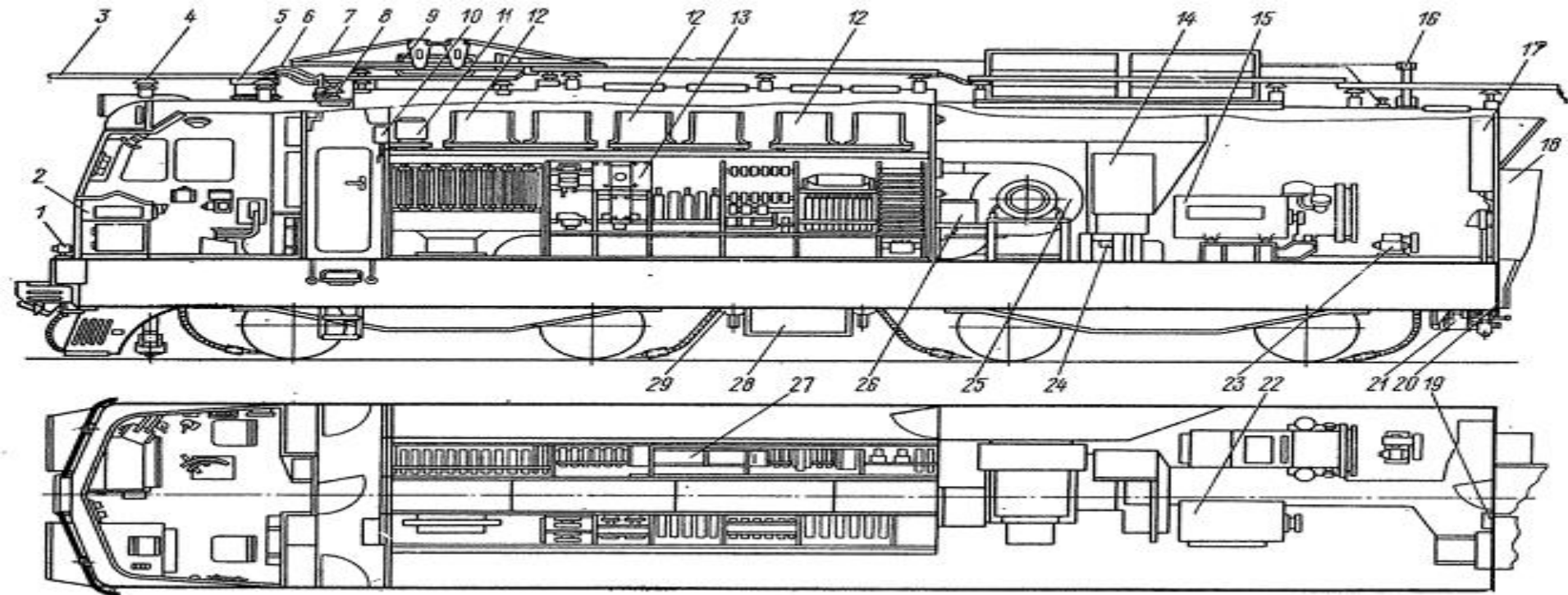
Керівник:

к.т.н., доцент. Артем МАСЛІЙ

- Огляд основних технічних характеристик електровоза ВЛ11 та вибір шляхів його модернізації;
- Розробка імітаційної моделі тягового приводу постійного струму з реостатно-контакторною системою керування;
- Синтез системи підлеглого керування тяговим двигуном постійного струму;
- Розробка імітаційної моделі руху поїзда з навантаженням у вигляді профіля шляху;
- Розробка математичної моделі вентильно-індукторного приводу з модальним регулятором;
- Дослідження на імітаційній моделі рух потяга з приводом постійного струму та тяговим вентильно-індукторним приводом на електровозі ВЛ11;

Загальний вигляд електровозу ВЛ11

3



1-ревун ТС-15; 2-апарати в кабіні; 3-струмоведучий кутник; 4-опорний ізолятор; 5-розрядник; 6-шина; 7-струмоприймач; 8-головне введення; 9-дросель перешкодоподавляючий; 10-роз'єднувач високовольний; 11-блок індуктивних шунтів; 12-блок пускових резисторів; 13-блок апаратів № 2; 14-панель керування; 15-блок мотор-компресора; 16-антена радіостанції; 17-санвузол; 18-переходна площадка; 19-ящик ЗИПа; 20-коробка розеток міжсекційного з'єднання; 21-повітророзподільник; 22-перетворювач НБ-436 В; 23-агрегат мотор-компресора для підйому струмоприймача; 24-панель заземлення; 25-відцентровий вентилятор Ц13-50 № 8 з двома вихідними патрубками; 26-дешифратор; 27-блок апаратів № 1; 28-акумуляторна батарея; 29-головні резервуари



Способи з'єднань тягових двигунів електровозу ВЛ-11

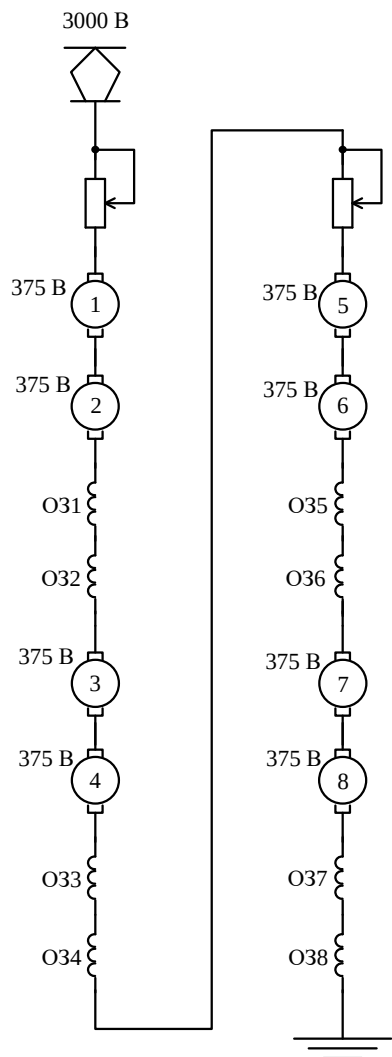


Рисунок 1 – С-з'єднання
тягових двигунів

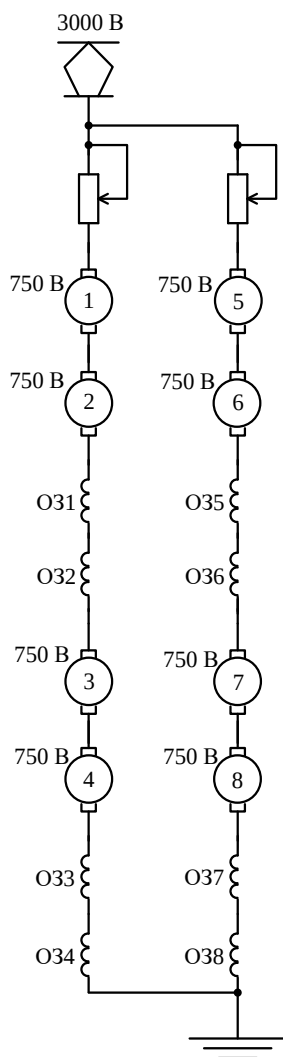


Рисунок 2 – СП-з'єднання
тягових двигунів

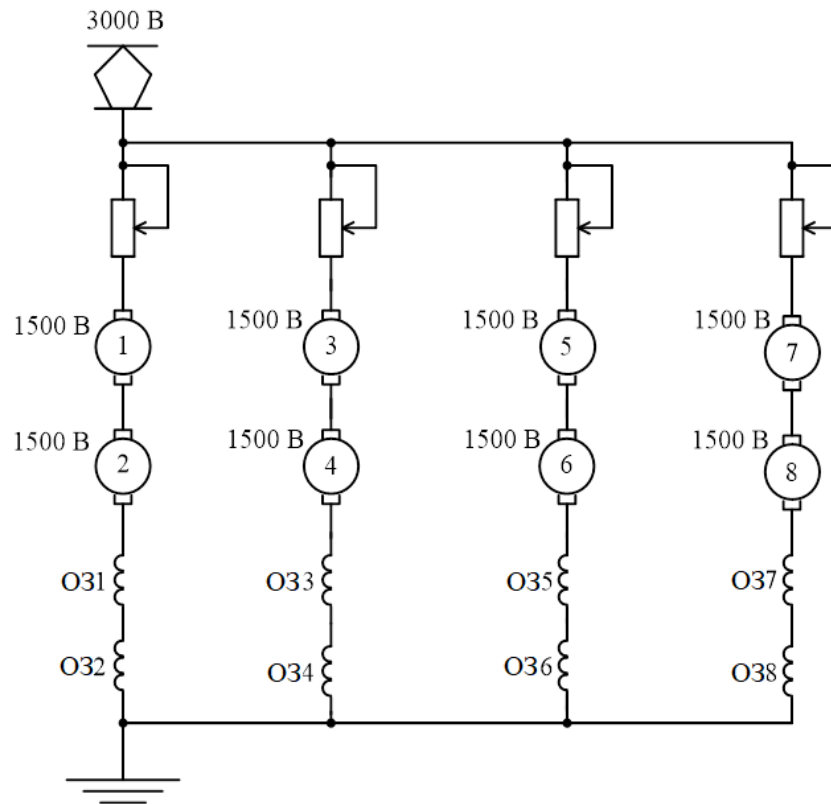


Рисунок 3 – П-з'єднання тягових двигунів

Математичне моделювання тягового електродвигуна ТЛ-2К1

5

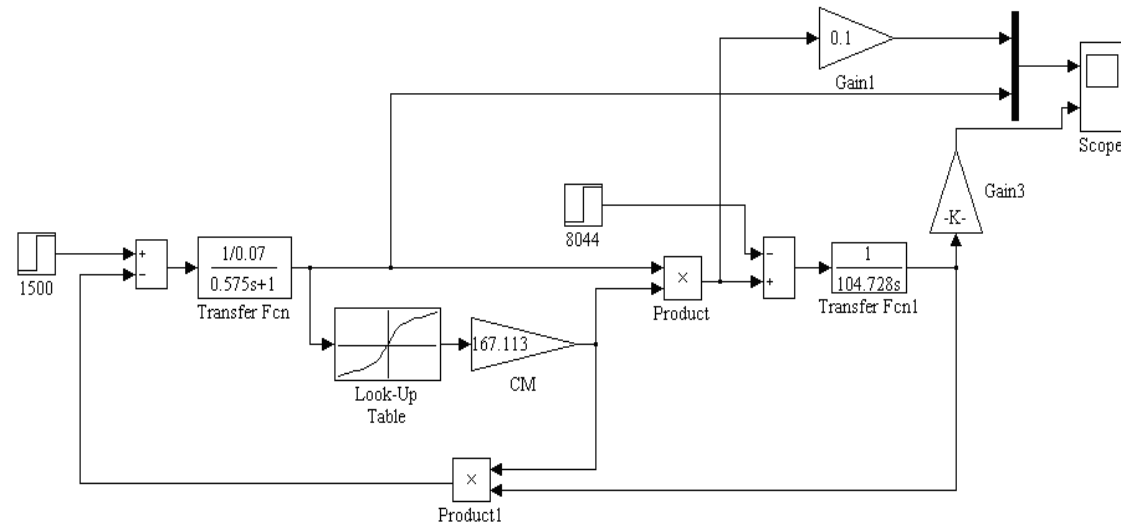


Рисунок 1 – Математична модель двигуна

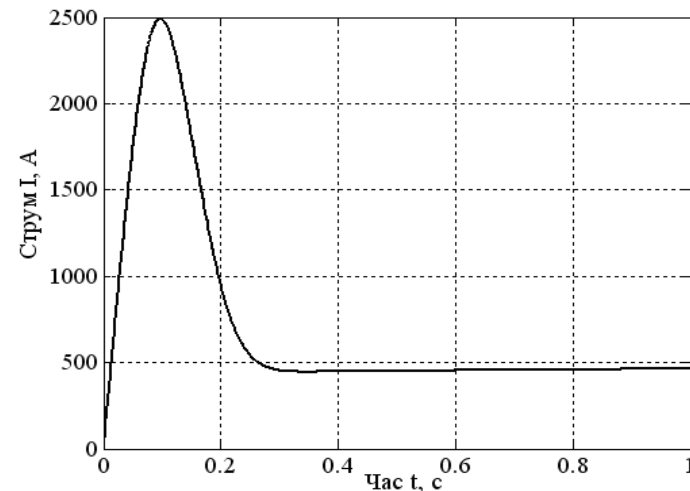


Рисунок 2 – Залежність струму I від часу t

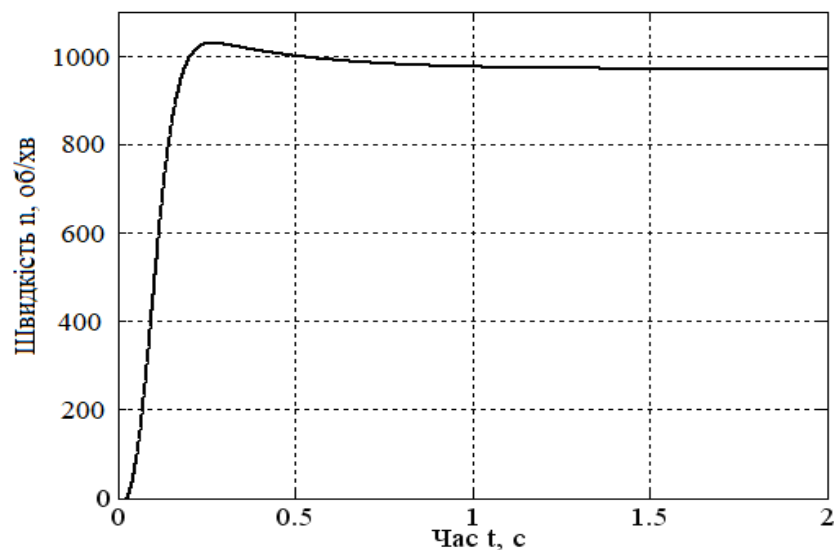


Рисунок 3 – Залежність швидкості двигуна n від часу t

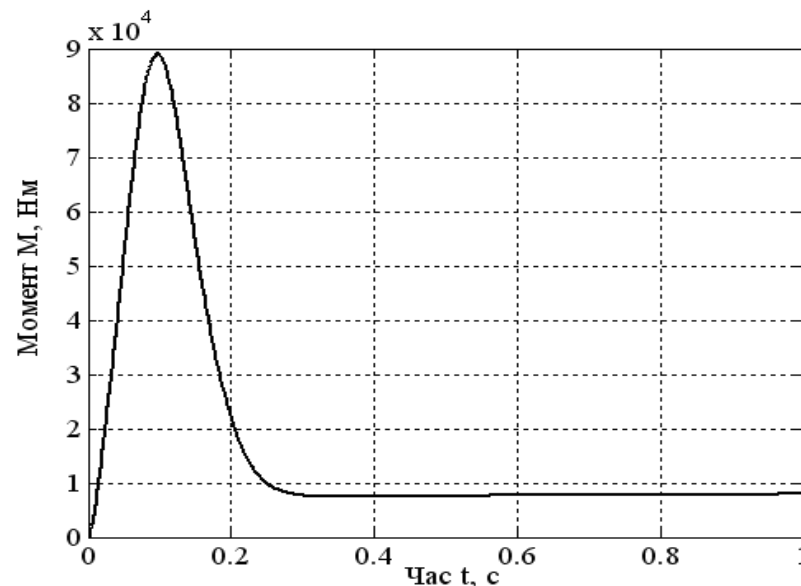
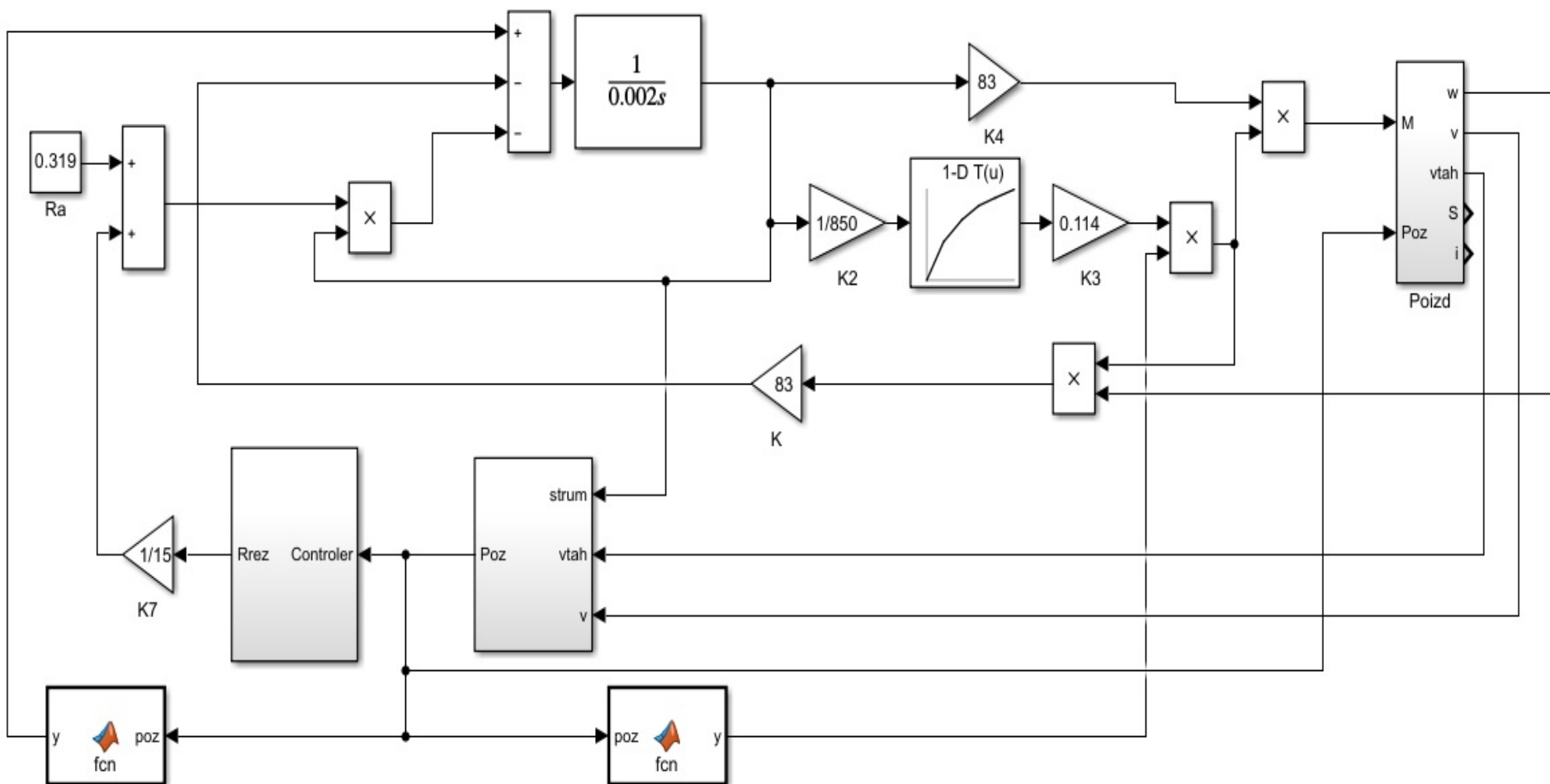
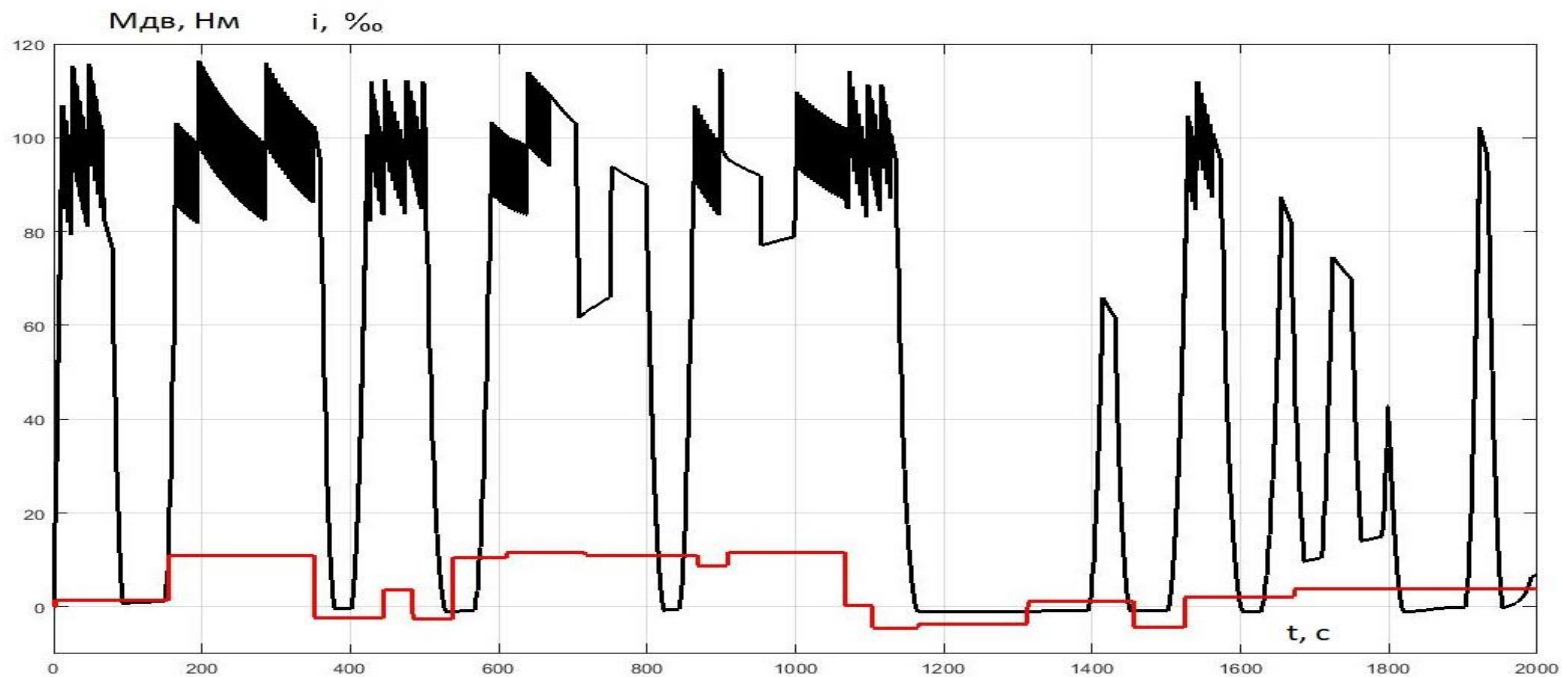


Рисунок 4 – Залежність моменту двигуна M від часу t

Математична модель поїзда з реостатно контакторною системою керування





Моделювання системи підлеглого керування 8

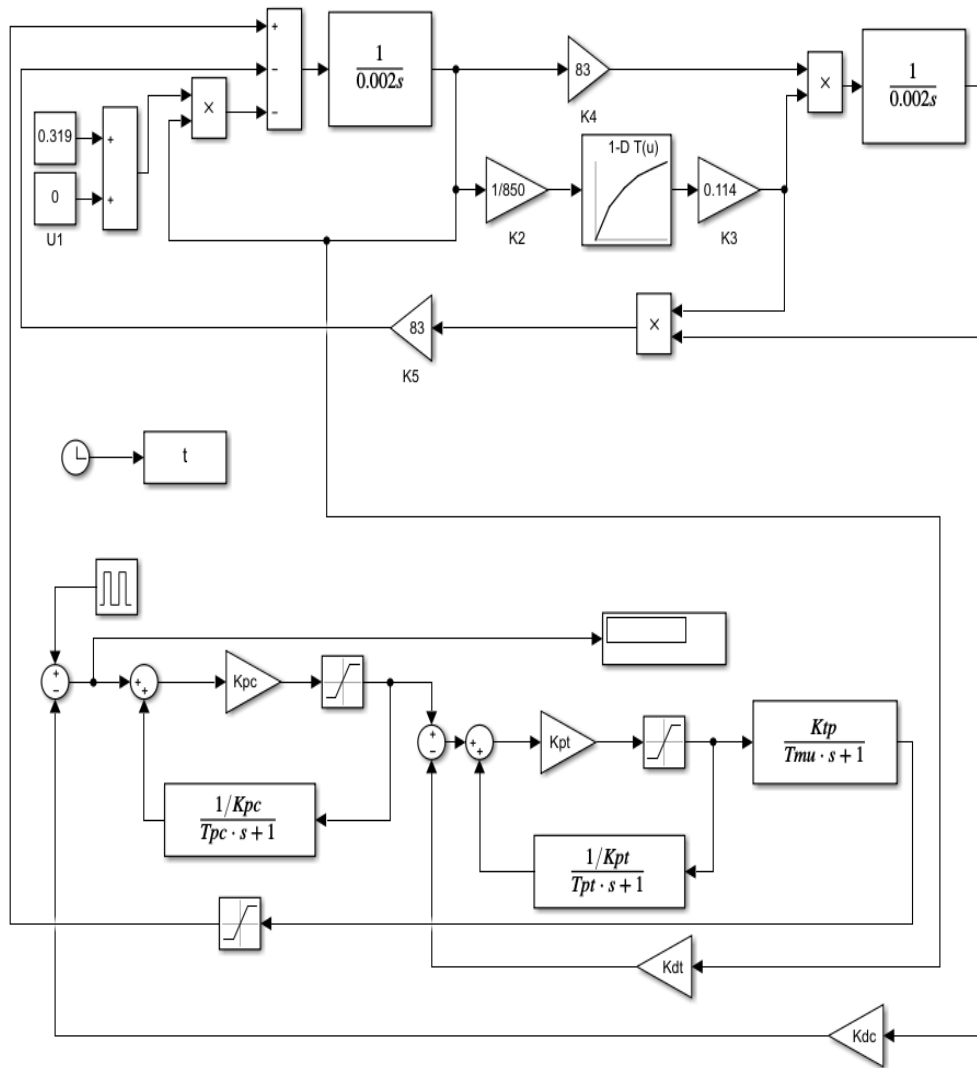


Рисунок 1 – Математична модель системи підлеглого керування

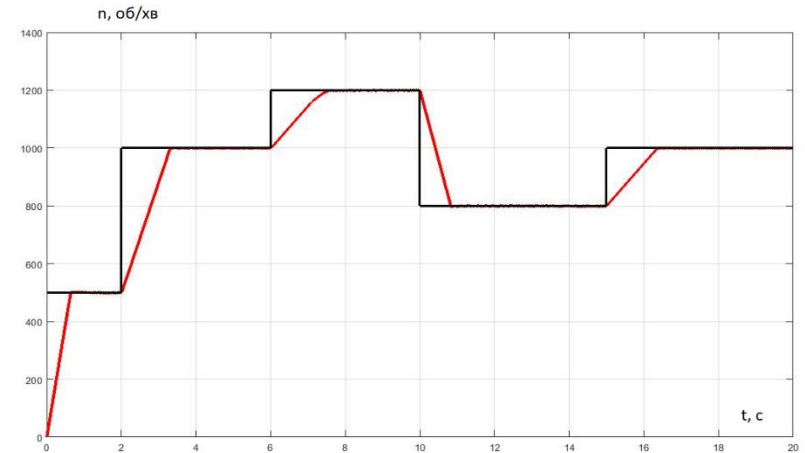
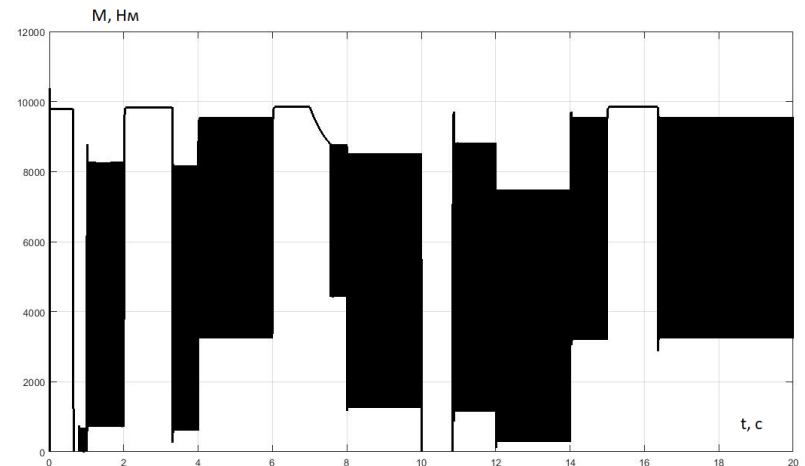
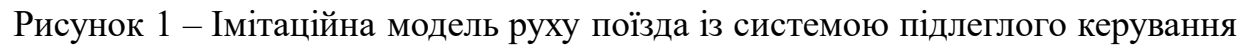
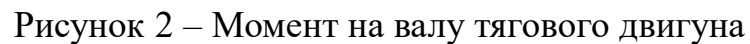


Рисунок 2 – Результати моделювання



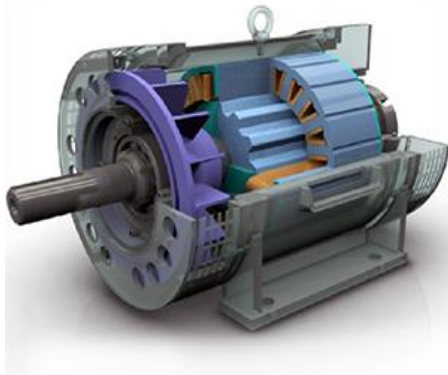
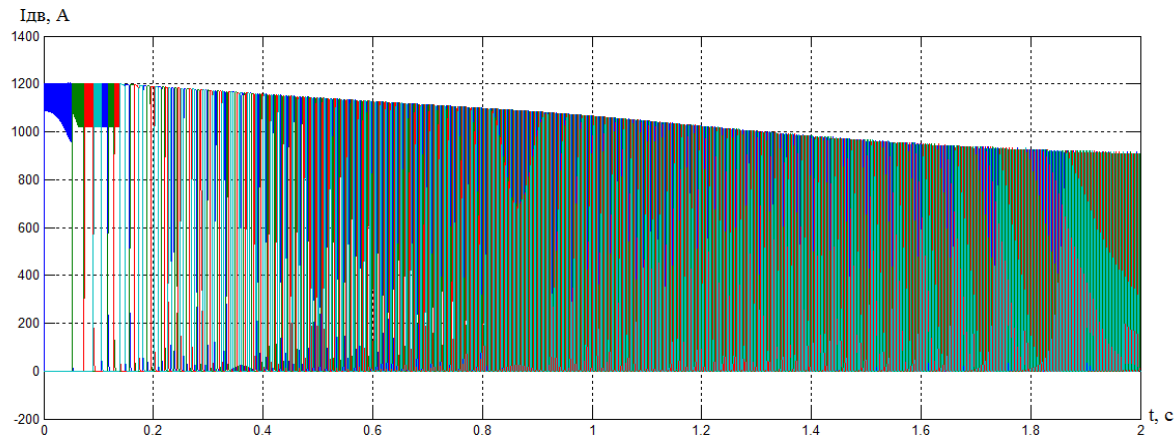


Рисунок 1 – Фазні струми ВІД

$$\frac{di_A}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial i_A}} \left(e_A - r_A i_A - \frac{\partial \Psi_A(i_A, \theta)}{\partial \gamma} \cdot \omega \right)$$

$$\frac{di_B}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial i_B}} \left(e_B - r_B i_B - \frac{\partial \Psi_B(i_B, \theta)}{\partial \gamma} \cdot \omega \right)$$

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial i_C}} \left(e_C - r_C i_C - \frac{\partial \Psi_C(i_C, \theta)}{\partial \gamma} \cdot \omega \right)$$

$$\frac{di_D}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial i_D}} \left(e_D - r_D i_D - \frac{\partial \Psi_D(i_D, \theta)}{\partial \gamma} \cdot \omega \right)$$

$$M_{\partial\theta} = f(i_A, i_B, i_C, i_D, \theta)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\partial\theta} - M_c}{J}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

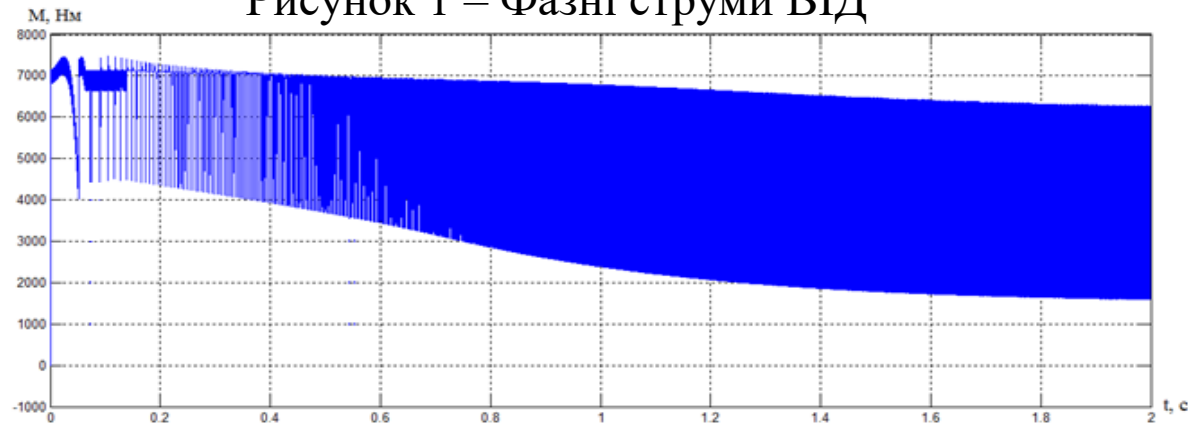


Рисунок 2 – Тяговий момент ВІД

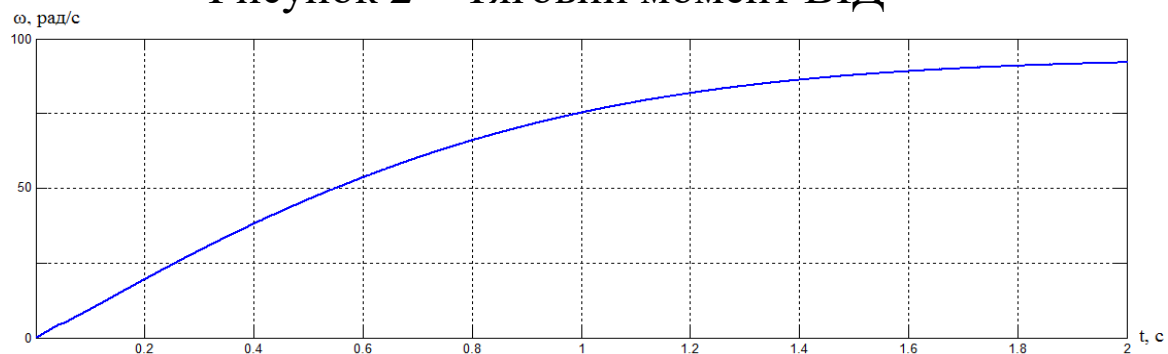
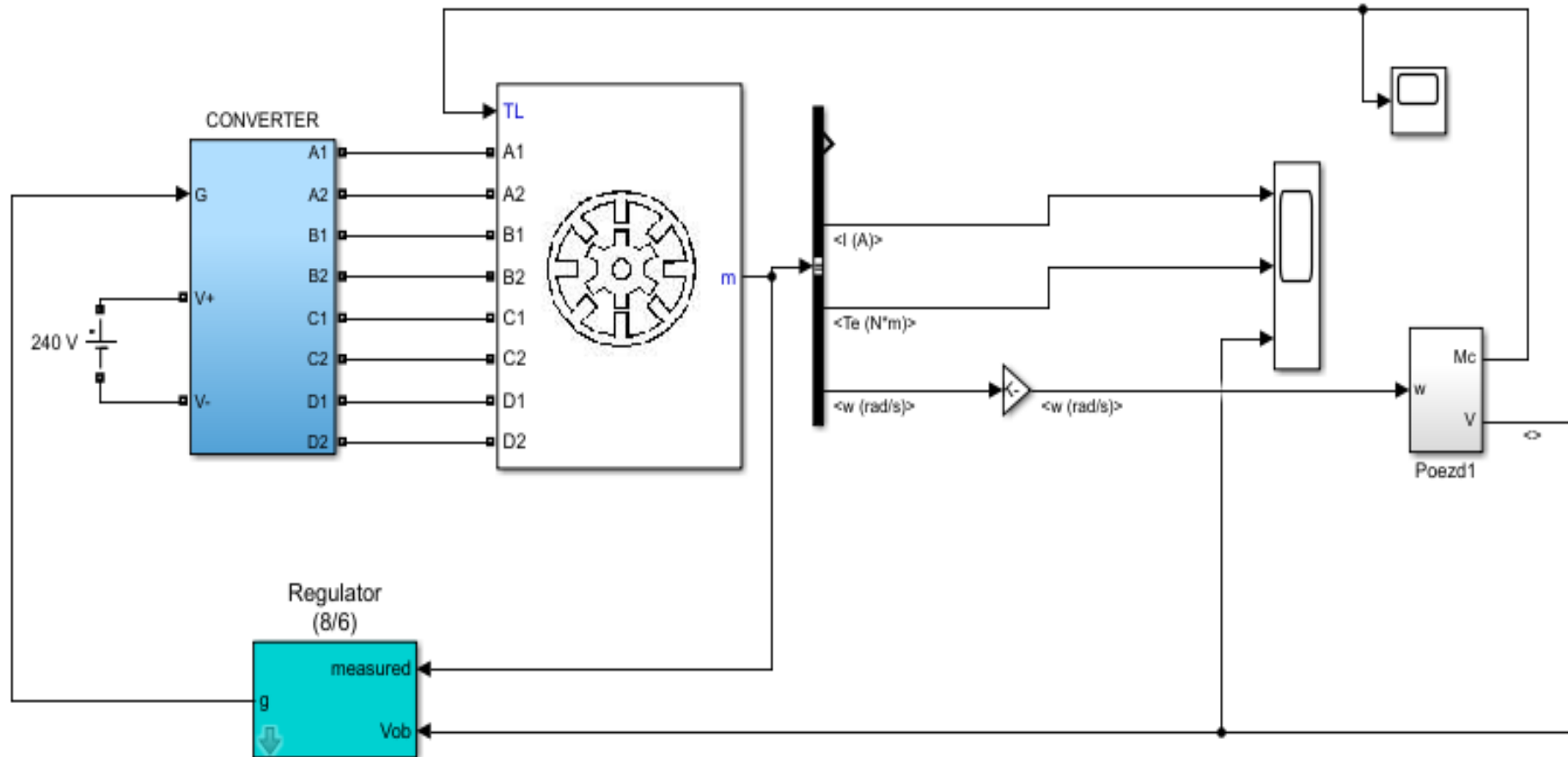


Рисунок 3 – Швидкість обертання ВІД

Математична модель руху поїзда з тяговим вентильно-індукторним приводом



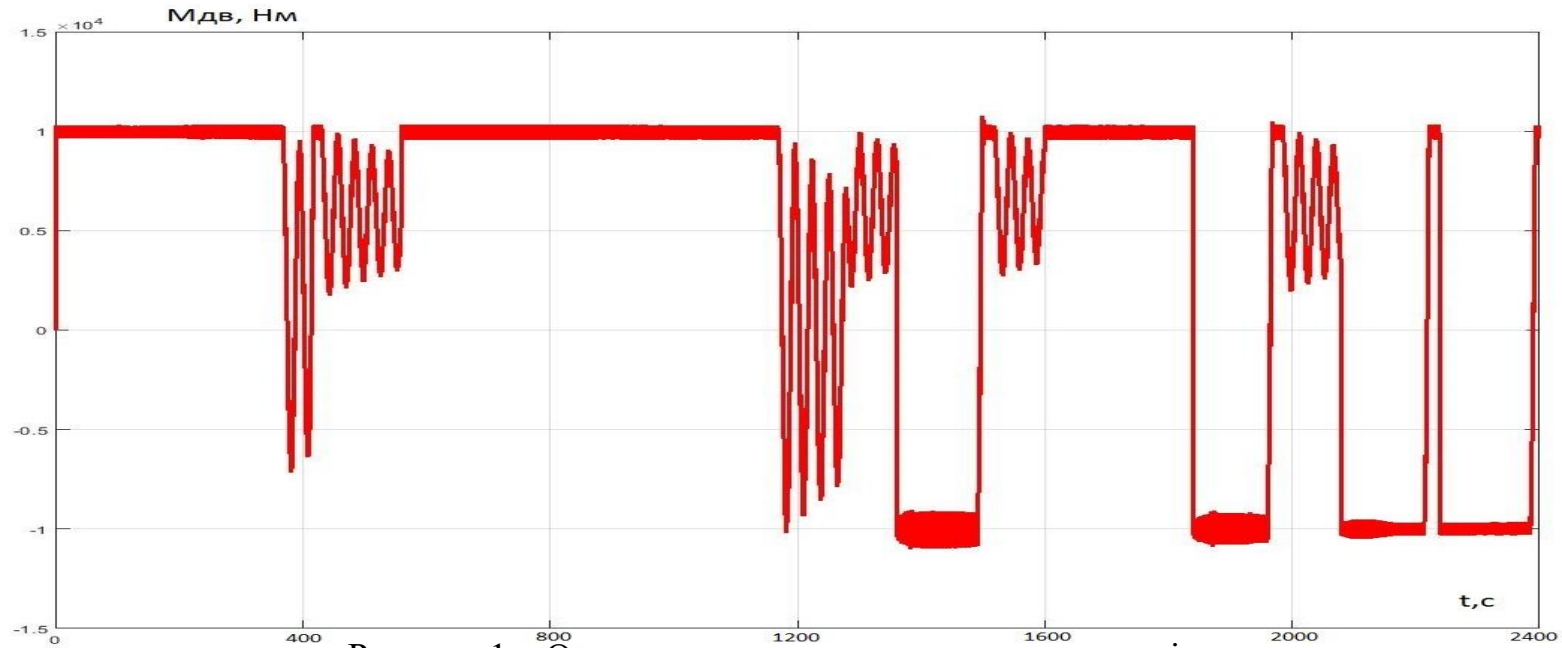


Рисунок 1 – Осцилограма моменту двигуна при русі потяга

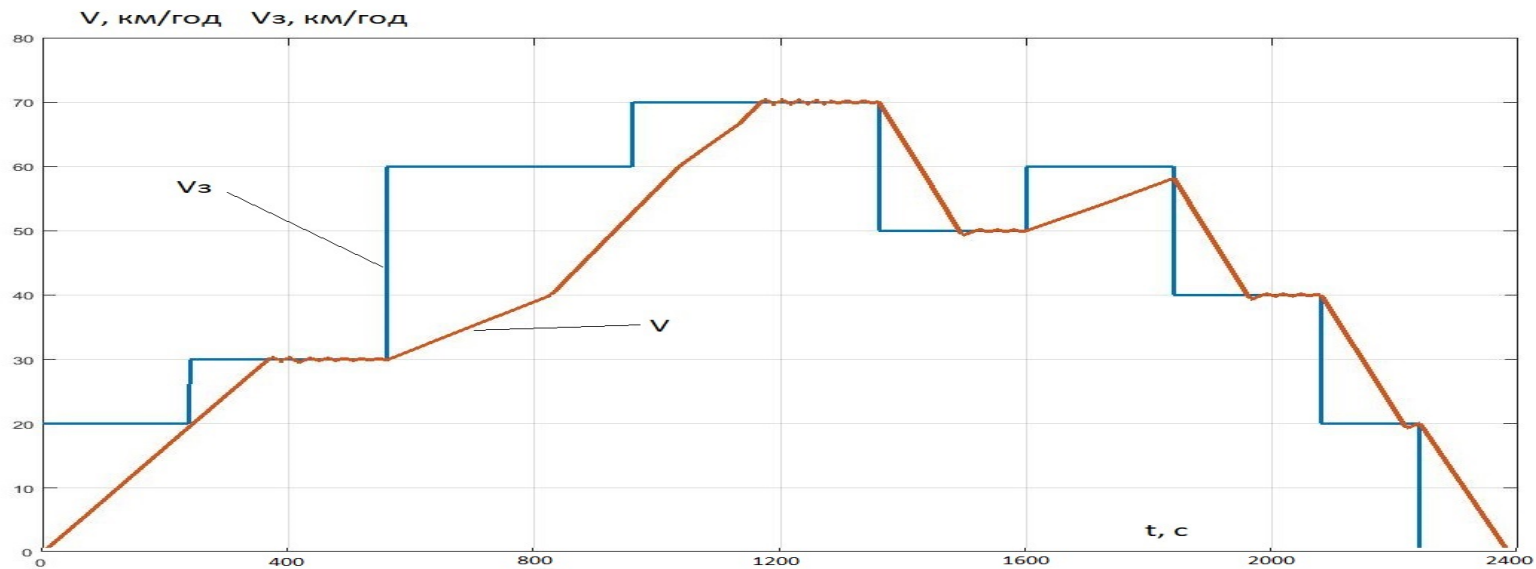


Рисунок 2 – Осцилограма швидкості (фактична та задана) руху потяга

- Розроблена структурна схема та математична модель тягового двигуна ТЛ-2К1;
- Проведене дослідження реостатно контакторної системи керування електровоза ВЛ-11 та системи підлеглого керування;
- Побудована математична модель руху потяга з урахуванням навантаження у вигляді профілю шляху;
- Синтезовано систему модального керування тяговим вентиляно-індукторним приводом;
- Отримані осцилограми швидкості руху потягу з приводом постійного струму з різними системами керування та вентиляно-індукторним приводом та проведено їх аналіз.