

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

На правах рукопису

Карзова Оксана Олександрівна

УДК 629.423.024:621.316.92

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСТУ СИЛОВИХ КІЛ
ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Спеціальність: 05.22.09 – електротранспорт

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:

доктор технічних наук,

професор Дубинець Леонід Вікторович

Дніпропетровськ – 2012

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРЕДМЕТУ ДОСЛІДЖЕНЬ	
1.1 Порівняльний аналіз захисних реле різних видів.....	11
1.2 Ефективність захисної релейної апаратури на діючому електрорухомому складі залізниць України.....	14
1.3 Аналіз методів досліджень електромагнітних перехідних процесів у колах тягових електродвигунів.....	24
1.4 Постановка задачі досліджень.....	27
1.5 Висновки до першого розділу.....	27
2 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ В СИЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	
2.1 Створення математичної моделі, яка описує процеси в силовому колі електрорухомого складу постійного струму, та перевірка її адекватності.....	29
2.2 Дослідження перехідних процесів з урахуванням швидкості зміни струму при коротких замиканнях в силовому колі електровоза з допомогою створеної математичної моделі.....	48
2.2.1 Без врахування вихрових струмів та динамічної індуктивності.....	48
2.2.2 З врахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності.....	60
2.2.3 Аналіз перехідних процесів при різних початкових умовах	75
2.3 Вплив індуктивності контактної мережі на значення швидкості зміни струму при короткому замиканні.....	79
2.4 Висновки до другого розділу.....	82

3 РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО СТВОРЕННЮ ЗАХИСНИХ ПРИБОРІВ ВІДПОВІДНО ДО ПОСТАВЛЕНОЇ МЕТИ

3.1 Визначення закону розподілу швидкості зростання струму при короткому замиканні в колах тягових електродвигунів ЕРС постійного струму	84
3.2 Метод визначення уставки спрацьовування захисних мікропроцесорних пристроїв від струмів короткого замикання по критерію швидкості зростання струму.....	90
3.3 Визначення чисельних значень уставок захисних мікропроцесорних пристроїв для електровозів ДЕ1 та ВЛ8 з використанням запропонованого методу.....	91
3.3.1 Електровоз ДЕ1	91
3.3.2 Електровоз ВЛ8	100
3.4 Висновки до третього розділу.....	108
4. УНІФІКОВАНИЙ ПРИСТРІЙ ЗАХИСТУ СИЛОВИХ КІЛ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА СУЧАСНІЙ МІКРОПРОЦЕСОРНІЙ БАЗІ	
4.1 Розробка принципової схеми уніфікованого захисного пристрою...110	
4.2 Створення стенду для перевірки уніфікованого захисного пристрою. Зняття осцилограм при перевантаженні стендового електродвигуна.....	114
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	123
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ	
5.1 Технічна ефективність впровадження результатів роботи	125
5.2 Очікувана економічна ефективність впровадження результатів.....	127
5.3 Висновки до п'ятого розділу.....	128
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	132
ДОДАТКИ.....	143

ВСТУП

Актуальність теми

У процесі експлуатації електрорухомого складу (ЕРС) можуть виникнути аварійні режими: коротке замикання (КЗ) та перевантаження у колі тягових електродвигунів (ТЕД), що призведе до повного або часткового виходу з ладу електрообладнання, якщо захисні апарати не вимкнуться своєчасно відповідне коло. Зменшення часу від моменту виникнення КЗ до моменту розриву відповідного силового кола – важлива задача з точки зору підвищення ефективності захисту силових кіл ЕРС. Одним із варіантів вирішення цієї задачі є зменшення власного часу спрацьовування пристроїв захисту (ПЗ) низьковольтних кіл.

Питанням захисту силових кіл рухомого складу присвячені роботи таких вчених, як Тихменьов Б. М., Трахтман Л. М., Захарченко Д. Д., Ісаєв І. П., а також вчених ДПТУ: Костіна М. О., Вісіна М. Г., Кійко А. І. та ін.

На сучасних електровозах та електропоїздах постійного струму основним апаратом захисту від струмів КЗ у колі тягових електродвигунів є швидкодіючий вимикач (ШВ), який за сигналом відповідних пристроїв здійснює прямий або непрямий захист. Щоб подати сигнал на розмикання утримуючої котушки швидкодіючого вимикача, застосовуються низьковольтні електромеханічні реле та інші пристрої, що мають відносно низький рівень надійності та відносно великі значення власного часу спрацьовування.

Сумарний час спрацьовування ШВ та вказаних реле у разі КЗ у захищаємих колах може становити декілька сотих долей секунди. За цей час можуть відбутися значні пошкодження електрообладнання, що призводить до погіршення його ремонтпридатності, оскільки через значні пошкодження не вдається відновити електрообладнання за час, відведений для виконання технічного обслуговування або певного виду ремонту. Крім того, ремонт пошкодженого обладнання викликає значні експлуатаційні витрати. Тому

зменшення часу спрацьовування захисної апаратури є суттєвим засобом підвищення ефективності захисту електричних силових кіл, покращення ремонтпридатності електрообладнання ЕРС, зменшення експлуатаційних витрат.

Суттєве значення для зменшення експлуатаційних витрат під час експлуатації апаратів захисту має їх уніфікація.

Сьогодні одним із шляхів збільшення швидкодії та покращення уніфікації вказаних апаратів є використання сучасної мікропроцесорної елементної бази. При цьому стає можливим за контролюємий параметр прийняти значення зміни швидкості наростання струму ($\frac{di}{dt}$) за різних режимів роботи ЕРС на відміну від більшості експлуатуємих апаратів захисту, що реагують тільки на значення струму. Для отримання рекомендацій по розробці таких пристроїв у даній дисертаційній роботі проведені відповідні дослідження із застосуванням сучасних методів.

У зв'язку з вищевикладеним тема дисертації є актуальною для галузі електричного транспорту. Її виконання є доцільним з точки зору підвищення ефективності захисту силових кіл електрорухомого складу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана відповідно до головних напрямів розвитку науки і техніки, закону України про основи державної політики в сфері науки та науково-технічної діяльності, а також до програми «Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки», затвердженої Міністерством транспорту та зв'язку України наказом № 1259 від 14.10.2008 р.

Обраний напрямок досліджень пов'язаний з планами виконання робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: «Підвищення надійності двигунів компресорів електропоїздів серії EP1, EP2» (№ держреєстрації 0106U006491) та

«Виконання робіт по створенню системи випробувань тягових електричних машин» (№ держреєстрації 0108U003888).

Дисертант виступав як виконавець окремих розділів і є співавтором звітів науково-дослідних робіт.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є підвищення ефективності захисту силових електричних кіл електрорухомого складу постійного струму від коротких замикань за рахунок підвищення швидкодії та уніфікації захисних пристроїв шляхом застосування сучасної елементної бази.

Для досягнення зазначеної мети автором сформульовані для вирішення такі задачі:

1. Провести порівняльний аналіз різних видів існуючих захисних пристроїв силових електричних кіл електрорухомого складу за основними параметрами.
2. Проаналізувати властивості існуючих захисних пристроїв різних типів за показниками швидкодії та уніфікація.
3. Дослідити перехідні процеси в силових електричних колах тягових електродвигунів за допомогою математичних моделей з різними умовами в режимах пуску та короткого замикання з метою визначення швидкості зростання струму з урахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності обмоток збудження тягових електродвигунів.
4. Визначити закон розподілу швидкостей зростання струму за різних умов виникнення короткого замикання у колі тягових електродвигунів.
5. На базі проведених теоретичних досліджень розробити рекомендації для створення уніфікованих пристроїв захисту на базі сучасних мікроконтролерів, які б забезпечували захист електричних кіл електрорухомого складу залізниць від струмів короткого замикання

і реагували не тільки на значення струму уставки, а й на певну швидкість зростання струму.

6. Із використанням розроблених рекомендацій виготовити експериментальний зразок пристрою захисту від короткого замикання та провести його стендові випробування з метою перевірки виконання повноти потрібних функцій.
7. Провести техніко-економічне обґрунтування впровадження розроблених рекомендацій.

Об'єкт досліджень – процес захисту від коротких замикань силових тягових кіл електрорухомого складу залізниць постійного струму.

Предмет досліджень – захисні пристрої силових електричних кіл електрорухомого складу залізниць постійного струму.

Методи досліджень

Для вирішення поставлених у дисертації задач застосовані: аналіз літературних джерел і узагальнення досліджень, виконаних раніше іншими авторами по захисту силових електричних кіл електрорухомого складу залізниць постійного струму; аналіз параметрів існуючої апаратури захисту кіл тягових електродвигунів від аварійних режимів за критеріями швидкодії та уніфікації; основні положення теорії роботи електрообладнання електрорухомого складу, математичне моделювання для дослідження швидкості зростання струму під час перехідних процесів у силових колах електрорухомого складу за різних режимів з використанням чисельних методів Рунге-Кутта; визначення закону розподілу швидкості зростання струму у разі короткого замикання з використанням критерію Пірсона. Також були використані методи теорії імовірності та математичної статистики для визначення значень параметрів уставки захисних пристроїв. Оброблення статистичних даних та теоретичних досліджень проведено за допомогою сучасних персонально-обчислювальних машин.

Використання вищевказаних достовірних теорій та методів, дослідження за допомогою адекватних математичних моделей із застосуванням сучасної комп'ютерної техніки підтверджують обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, отриманих у роботі.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вперше пропонується зменшити час від моменту виникнення короткого замикання до початку спрацьовування захисних пристроїв у силових колах тягових електродвигунів електрорухомого складу постійного струму від коротких замикань не за принципом контролювання значення струму, а за принципом контролювання швидкості зміни струму на початку процесу короткого замикання. Для більш точного і швидкого контролювання значення швидкості зміни струму пропонується запатентований автором захисний пристрій на базі сучасних мікроконтролерів.
2. Вперше досліджено вплив вихрових струмів та динамічної індуктивності обмоток збудження тягових електродвигунів на значення швидкості зростання струму короткого замикання і проведена його кількісна оцінка. Доведено, що цей вплив є суттєвим; більш суттєвим є вплив динамічної індуктивності.
3. Встановлена закономірність розподілу швидкостей зростання струму короткого замикання в залежності від точки його виникнення з метою розробки рекомендацій по визначенню уставки запропонованих захисних пристроїв на базі сучасних мікроконтролерів. Підтверджено, що цей розподіл відповідає нормальному закону.
4. Розроблено метод визначення уставки запропонованих пристроїв за швидкістю зростання струму для доповнення існуючого захисту силових кіл електрорухомого складу постійного струму від струмів короткого замикання.

Практичне значення отриманих результатів

Запропонований метод дослідження швидкості зростання струму у разі аварійних режимів, спосіб вибору параметрів спрацьовування пристроїв захисту, рекомендації для впровадження захисних пристроїв на новій елементній базі та інші результати дозволяють:

- 1) підвищити ефективність пристроїв захисту силових кіл тягових електродвигунів електрорухомого складу постійного струму за рахунок збільшення їх швидкодії та уніфікації;
- 2) зменшити експлуатаційні витрати на ремонт електрообладнання електровозів та електропоїздів.

Результати досліджень дисертації впроваджені на Державному підприємстві «Науково-виробничий комплекс «Електровозобудування» та у навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Особистий внесок здобувача

Мета роботи та задачі дослідження сформульовані разом із науковим керівником. Наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження у дисертаційній роботі виконані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

- аналіз реле різних типів із метою уніфікації цих реле для підвищення ефективності утримання рухомого складу [15, 91];
- аналіз швидкодії існуючих апаратів захисту електричних кіл електрорухомого складу залізниць від коротких замикань та перевантажень [16, 29, 90];
- ідея роботи [28];
- збирання та аналіз даних для визначення середніх показників уніфікації реле різних типів по мережі залізниць України [34];
- апроксимація кривої намагнічування [60];

– розроблення математичної моделі перехідного процесу з урахуванням вихрових струмів та без них у разі короткого замикання в силових колах електровозів постійного струму, знаходження за результатами моделювання швидкостей зростання аварійного струму [80];

– розроблення математичної моделі та дослідження з її допомогою перехідного процесу під час перевантаження в силових колах електровозів постійного струму [99].

Роботи [14, 30, 61, 79, 81, 88, 97, 98] написані автором без співавторів.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати роботи доповідались та отримали схвалення на таких міжнародних науково-технічних конференціях: «Трансбалтика 2009», Вільнюс 2009 р.; «Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро – 2010», Місхор 2010 р.; 67, 70, 72-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2007, 2010-2012 роки відповідно.

Публікації

Основні наукові результати дисертаційної роботи опубліковано в 18 друкованих працях, із них: 10 – статті, опубліковані в фахових наукових виданнях, що входять до обов’язкового переліку; 6 – матеріали міжнародних науково-технічних конференцій; 2 – патенти на корисну модель.

Структура й обсяг дисертації

Повний обсяг дисертації складає 227 сторінок друкованого тексту, до складу яких входять 131 сторінка основної частини та 85 сторінок додатків. Основна частина складається зі вступу, п’яти розділів, загальних висновків та списку використаних джерел (102 найменування на 11 сторінках). Таблиці і рисунки розташовані на окремих сторінках, займають три сторінки. Дисертаційна робота містить 15 додатків, 46 рисунків, 21 таблицю.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРЕДМЕТУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Порівняльний аналіз захисних реле різних видів

У теперішній час для захисту електрообладнання електрорухомого складу від різних аварійних режимів використовується в основному електромагнітна релейна апаратура (нормальні та швидкодіючі реле). Ці реле в основному виконують свої функції, але їх ефективність відносно невелика.

Найменш надійними елементами вказаних реле є контакти. Якірні електромеханічні реле також мають низьку швидкодію. У них значний час спрацьовування, більший ніж 0,15 с. Навіть у швидкодіючих реле цей час складає не менше 0,05 с [2, 3]. Такий великий час спрацьовування не сприяє їх застосуванню в багатьох пристроях захисту.

Питанням захисту силових кіл рухомого складу присвячені роботи таких вчених як Тихменьев Б. М., Трахтман Л. М., Захарченко Д. Д., Ісаєв І. П., а також вчених ДПТУ: Костіна М. О., Вісіна М. Г., Кійко А. І. та ін. [4-7].

Причиною повільної дії захисних електромеханічних реле є наявність в їх конструкції рухомого якоря з відносно великою масою, яка зумовлює інерційність рухомої системи. Однією з причин труднощів при експлуатації таких реле є необхідність їх періодичної перевірки, що зумовлено забрудненням та зносом рухомих частин, корозією контактів та ін. Для обслуговування вказаних реле потрібна значна кількість обслуговуючого персоналу досить високої кваліфікації.

Суттєве підвищення ефективності та терміну служби комутаційних елементів в системах захисту можливо у разі застосування магнітокерованих контактів (герконів) і реле на їх основі [2, 8].

Реле з магнітокерованими контактами мають наступні переваги над електромеханічними: високу надійність комутації; довготривалий термін служби (до $10^6 - 10^7$ спрацьовувань); високу швидкодію (час спрацьовування

0,5-2 мс); малу вартість; високу стійкість до короточасних перенапруг (5-6-ти кратні значення номінальної напруги); малу масу та габарити; високу стабільність контактного опору.

Напівпровідникові реле в порівнянні з електромеханічними мають наступні переваги: значно менші величини використання потужності в колах струму та напруги; більш висока надійність (не мають рухомих частин); підвищені вихідні параметри: чутливість, швидкодія; зменшення розмірів та ваги реле [9-11].

Напівпровідникові реле мають і недоліки: при виконанні схем реле на напівпровідникових пристроях необхідно враховувати більш низькі рівні струмів в колах цих схем, значний вплив різних збурень, які виникають в схемах електрорухомого складу; схеми реле мають велику кількість пайок, що потребують ретельного виконання. Для перевірки та випробувань окремих елементів вузлів та повних схем на напівпровідниках необхідні прилади і апаратура з більш високими параметрами, ніж це потрібно для звичайних електромеханічних реле. Також недоліком всіх вище вказаних реле є їх низька уніфікація.

В електромеханічних реле є ряд переваг по відношенню до напівпровідникових: великий діапазон струмів і напруг, що комутуються, від мікроамперів і мікрвольт до амперів та вольт; низький контактний опір в замкнутому стані і високий опір ізоляції в розімкненому стані; стійкість і надійність при експлуатації в суворих умовах; стійкість до електромагнітних перешкод; відносно низька вартість; надійна гальванічна (електрична) розв'язка.

Співпоставляючи вказані переваги та недоліки, можна сказати, що недоліки напівпровідникових реле менш суттєві, ніж їх переваги. До того ж, недоліки напівпровідникових пристроїв захисту в основному проявляються в процесі виготовлення, де їх простіше подолати, а переваги – в період експлуатації, що особливо важливо.

Мікропроцесори в системах захисту почали застосовувати набагато пізніше, ніж в інших галузях електротехніки. Перші пристрої захисту на базі мікропроцесорів випустили на початку 80-х років 20-го сторіччя фірми Siemens та ABB. Саме до цього часу з'явилися процесори, що були здатні прийняти необхідну кількість сигналів про стан схем, які потрібно захистити, та перетворити їх.

Функції пристроїв захисту ЕРС у разі використання електромеханічних пристроїв і мікропроцесорних аналогічні. Але перевагами останніх, як в порівнянні з електромагнітними, так і в порівнянні з напівпровідниковими реле, є суттєве збільшення швидкодії, можливість уніфікації, зменшення маси та габаритів, скорочення числа обслуговуючого персоналу, зменшення витрат на експлуатацію.

Принциповим вирішенням вказаних вище проблем є застосування в схемах ЕРС захисних пристроїв, які не вимагають за своїми технічними даними поточних ремонтів, оглядів і дозволяють істотно поліпшити показники швидкодії та уніфікації в порівнянні з якірними. Такими апаратами можуть бути герконові, напівпровідникові пристрої, а у теперішній час також пристрої на базі мікроконтролерів, враховуючи, що вартість їх стала майже однаковою з вартістю традиційної елементної бази [12]. Але при освоєнні нової елементної бази для захисної апаратури ЕРС необхідно враховувати специфічні умови експлуатації останньої. Це пояснюється тим, що в схемах не тільки захисту, а всього ЕРС застосовуються так звані тягові апарати, які повинні відповідати спеціальним вимогам. Це обумовлено тим, що умови роботи електричних пристроїв в схемах ЕРС по комутаційних, кліматичних і механічних чинниках відрізняються від загальнопромислових умов. Також тягові захисні апарати мають обмеження по габаритних розмірах і масі.

Вимоги до електроапаратури, яка використовується на ЕРС, викладені в ДСТУ-2773-94 [13].

1.2 Ефективність захисної релейної апаратури на діючому електрорухомому складі залізниць України

В даній дисертаційній роботі автор розглядає можливість підвищення ефективності низьковольтних захисних пристроїв від струмів КЗ в силових електричних колах ЕРС за рахунок підвищення таких їх показників як швидкодія та уніфікація [5, 14, 15].

Швидкодія є одним з найважливіших показників ефективності для пристроїв захисту, особливо захисту від КЗ, оскільки вона сприяє зменшенню значення струму короткого замикання, що проходить по колу до його вимкнення [16]. ПЗ обмежують наслідки дії струмів КЗ тим ефективніше, чим більша їх швидкодія.

На сьогоднішній день на електрорухомому складі постійного струму слід розрізняти два види короткого замикання: повне та неповне.

При повному короткому замиканні в колі ТЕД швидкість зростання аварійного струму досягає 600-800 А/мс, а його усталене значення – 20-30 кА [4]. Це відбувається у разі виникнення КЗ на ділянці між струмоприймачем та якорем першого тягового електродвигуна, коли пускові резистори виведені. Тому зростання струму визначається тільки параметрами кола від струмоприймача до точки короткого замикання (точка 0 на рис. 1.1). Для розриву силових кіл у цьому випадку використовують прямий захист з допомогою швидкодіючих вимикачів, які за декілька відсотків секунди розривають коло [1]. При цьому струм короткого замикання майже досягає усталеного значення.

На рис. 1.1:

M1-M8 – обмотки якоря тягових електродвигунів;

O31-O38 – обмотки збудження (OЗ) тягових електродвигунів;

0-15 – варіанти виникнення короткого замикання в силовому колі ЕРС;

U_M – напруга тягової контактної мережі.

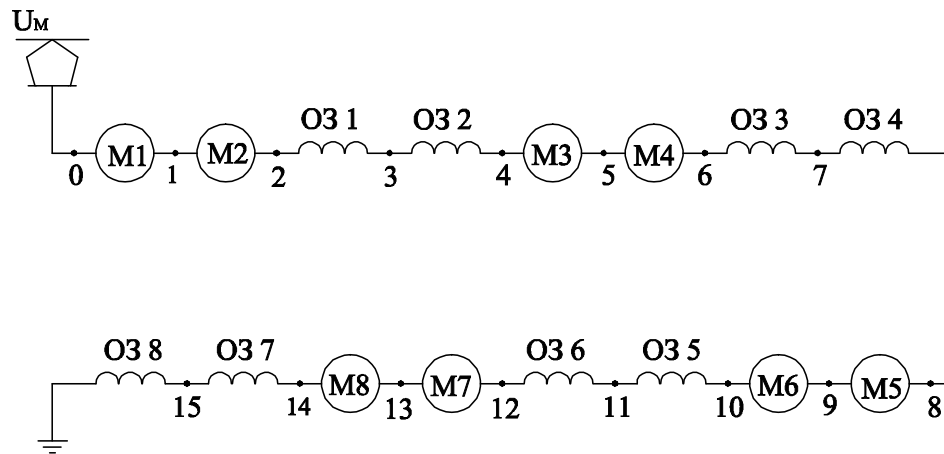


Рис. 1.1. Схема варіантів виникнення короткого замикання при послідовному з'єднанні тягових електродвигунів восьмивісних електровозів постійного струму

У випадку неповного короткого замикання, коли між струмоприймачем та точкою КЗ ввімкнена якась кількість обмоток якоря та збудження, струм досягає усталеного значення за час, значно більший, ніж у попередньому випадку, внаслідок появи в колі індуктивності обмоток тягових електродвигунів. Цей час t_0 показаний на прикладі залежності $I_{\text{КЗ}} = f(t)$, яка побудована за умови, що коротке замикання виникло після першої обмотки якоря тягового електродвигуна (точка 1 на рис. 1.1). Це самий важкий варіант КЗ з точки зору значення усталеного струму та його швидкості зростання. Для прикладу залежність $I_{\text{КЗ}} = f(t)$ (рис. 1.2) при КЗ побудовано для одного з базових електровозів постійного струму ДЕ1 [17]. Відповідні розрахунки наведені у додатку А.

Тривалість часу t_0 визначається індуктивністю електричного кола. Час від моменту досягнення струмом значення уставки до моменту початку розходження контактів називається власним часом спрацьовування вимикача ($t_{\text{вл}}$ на рис. 1.2). Для ШВ, які встановлені на ЕРС постійного струму у теперішній час, власний час спрацьовування дорівнює 0,0015-0,003 с. Загальний час відключення аварійного струму ($t_{\text{заг}}$ на рис. 1.2) швидкодіючим вимикачем – 0,01-0,05 с [1, 18].

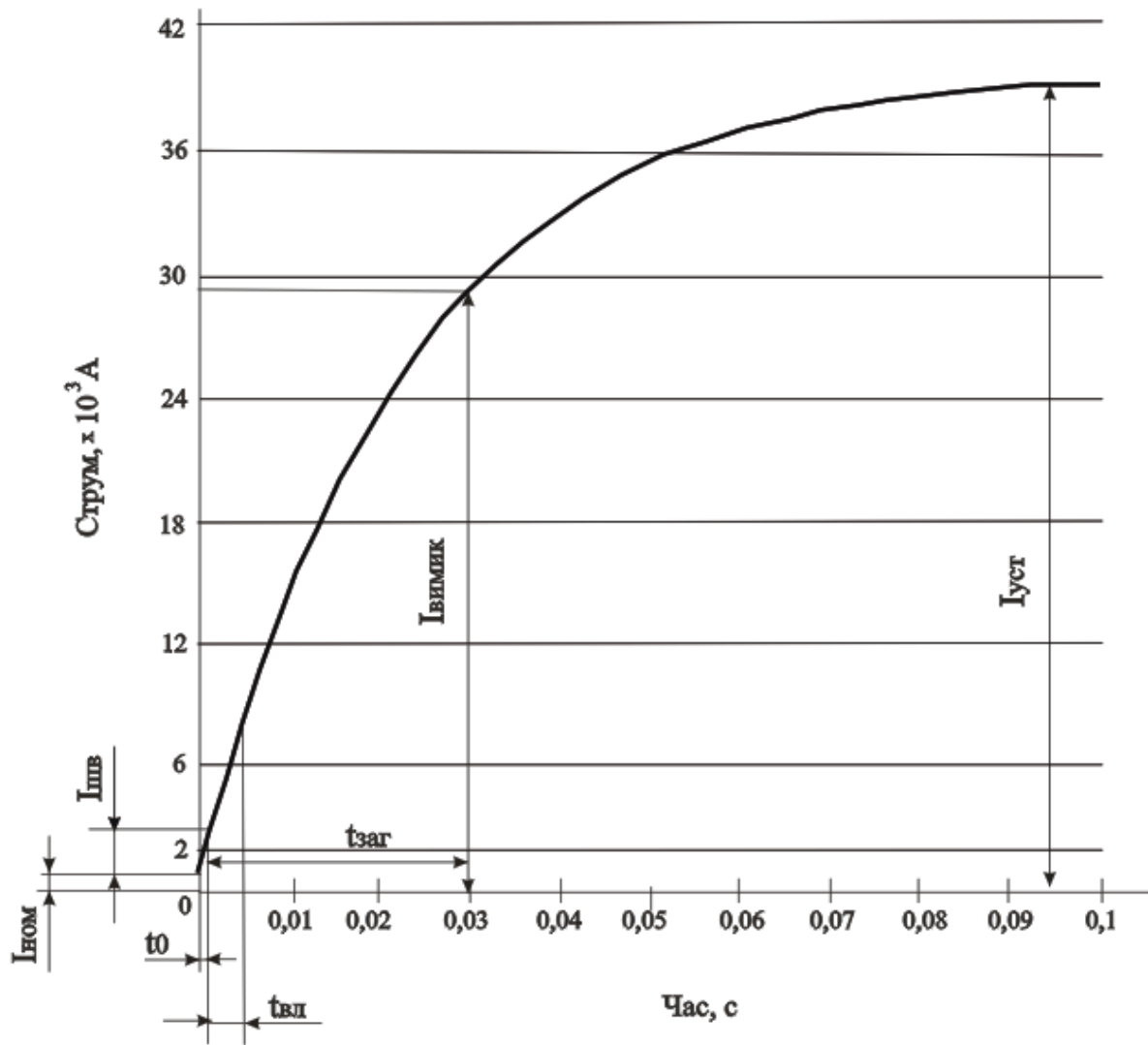


Рис. 1.2. Крива неповного короткого замикання після першої обмотки якоря

На рис. 1.1:

t_0 – час до досягнення струмом величини уставки ШВ;

$t_{\text{вл}}$ – власний час спрацьовування ШВ;

$t_{\text{заг}}$ – загальний час спрацьовування ШВ;

$I_{\text{ном}} = 565 \text{ A}$ – номінальний струм у колі;

$I_{\text{шв}}$ – струм уставки швидкодіючого вимикача.

$I_{\text{уст}} = 39000 \text{ A}$ – усталене значення струму короткого замикання;

$I_{\text{вимик}} = 29000 \text{ A}$ – максимальний струм, коли починають розмикатися контакти ШВ.

Виникнення неповного короткого замикання є більш несприятливим варіантом з точки зору забезпечення захисту. У цьому випадку аварійний струм може не досягти величини уставки ШВ, або досягти її за більший час, ніж у разі повного КЗ.

Захист від коротких замикань у цьому разі виконується за допомогою не тільки ШВ, а ще й диференційного реле (ДР), яке має відносно великий час спрацьовування. Як відзначалося вище, зменшення часу спрацьовування пристрою, що виконує функції ДР, можна досягнути за рахунок використання сучасних мікроконтролерів.

Котушки диференційних реле вмикають на початку силового кола безпосередньо за ШВ та в його кінці [20].

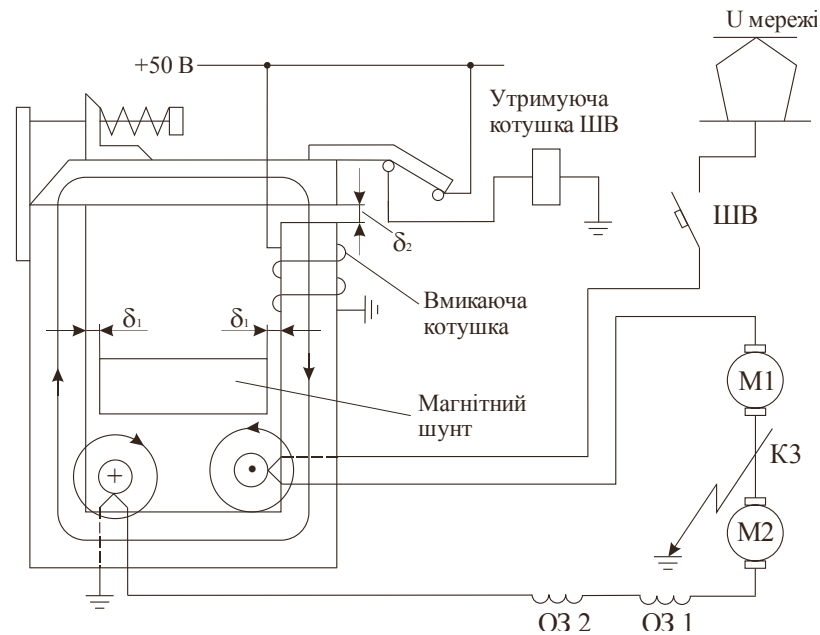


Рис. 1.3. Схема захисту силових кіл ЕРС постійного струму від неповних коротких замикань за допомогою ДР

Схема на рис. 1.3 пояснює принцип захисту від неповних коротких замикань за допомогою диференційних реле та швидкодіючого вимикача [1, 19].

В нормальному режимі магніторушійні сили котушок ДР діють зустрічно і взаємно врівноважуються. При виникненні КЗ в будь-якій точці

схеми, яка підлягає захисту, струм в першій котушці диференційного реле змінює свій напрям або взагалі зникає. Це і викликає спрацювання реле.

На даний момент, наприклад, на електровозі ДЕ1 для захисту силових кіл від струмів КЗ використовується диференційне реле клапанного типу (рис. 1.4). Струм спрацювання (струм небалансу) такого реле складає не більше 150 А, а власний час спрацювання при швидкості зростання струму вище $0,6 \cdot 10^6$ А/с не більше 0,009 с [17].

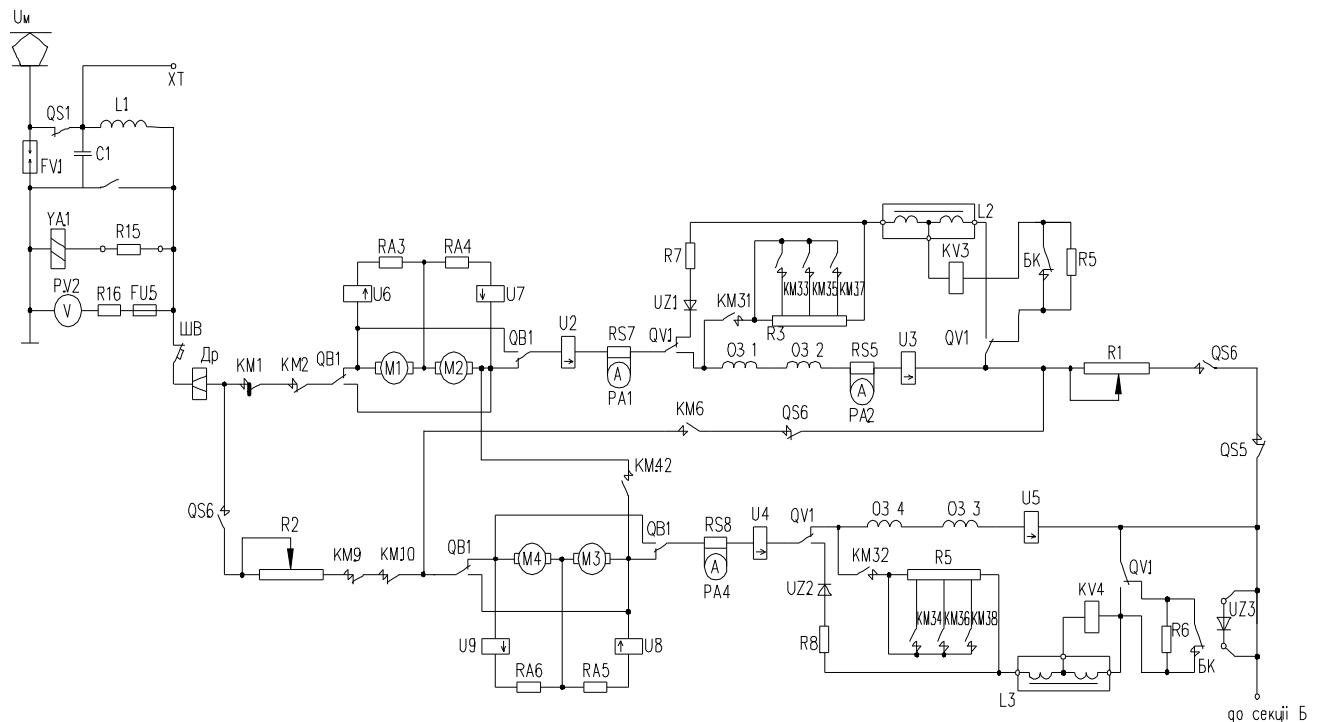


Рис. 1.4. Схема захисту від коротких замикань та перевантажень однієї секції електровозу ДЕ1

На електровозі ВЛ8 для захисту силових кіл від струмів КЗ використовується теж диференційне реле клапанного типу. Струм спрацювання його складає не більше 100 А, а власний час спрацювання при швидкості зростання струму вище 10^5 А/с не більше 0,0065 с (рис. 1.5) [20]. При зменшенні швидкості зростання аварійного струму час спрацювання такого реле збільшиться.

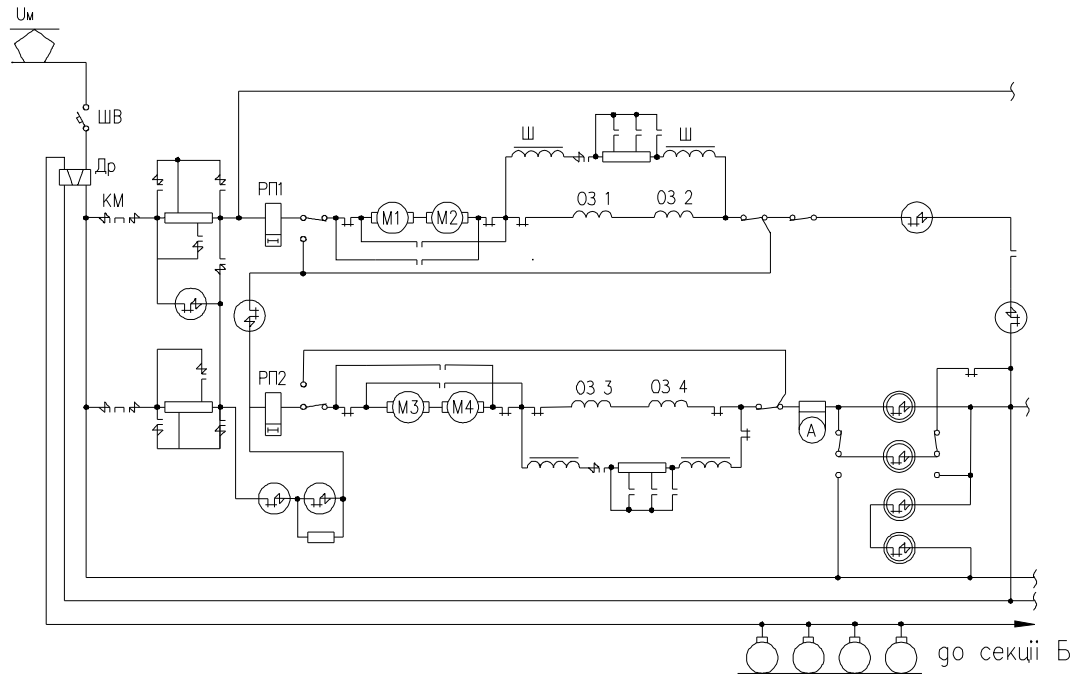


Рис. 1.5. Схема захисту від коротких замикань та перевантажень секції електровозу ВЛ8

Захист від коротких замикань на електровозі ЧС2, який поки що використовується на залізницях України, виконується по аналогії з попереднім прикладом, але захисними електромагнітними диференційними реле інших типів (рис. 1.6) [21]. Аналогічний принцип захисту від режиму КЗ мають і сучасні російські електровози ЕП-2К [22].

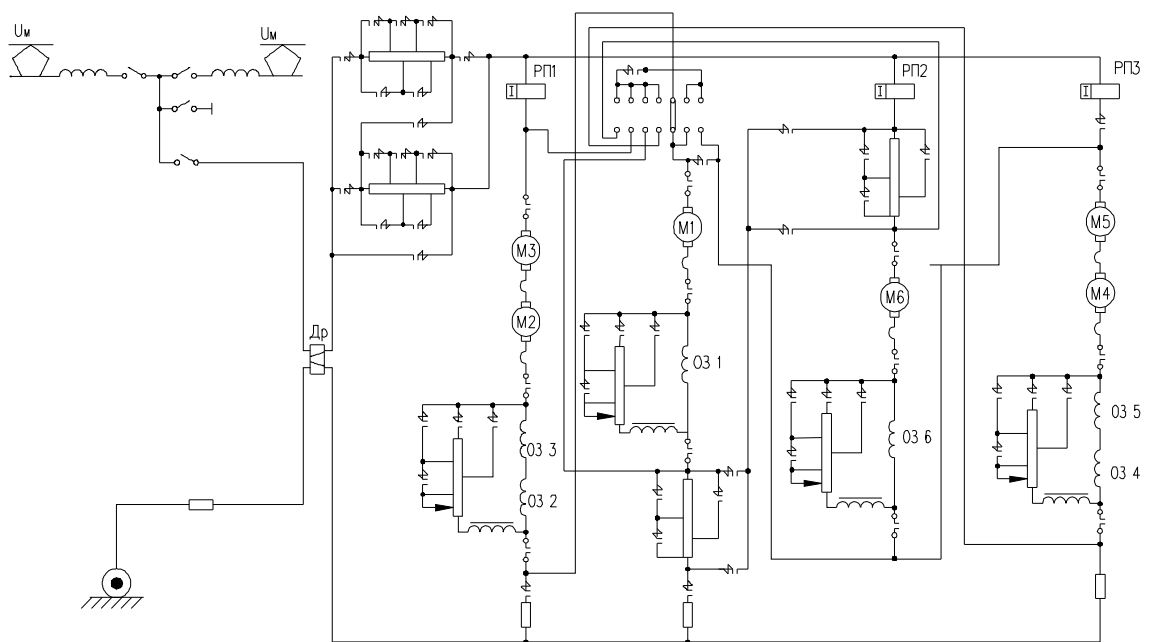


Рис. 1.6. Схема захисту від коротких замикань та перевантажень електровозу ЧС2

На електропоїздах ЕР2 такий захист виконується у відповідності до рис. 1.7 за допомогою диференційних реле електромагнітного типу [23].

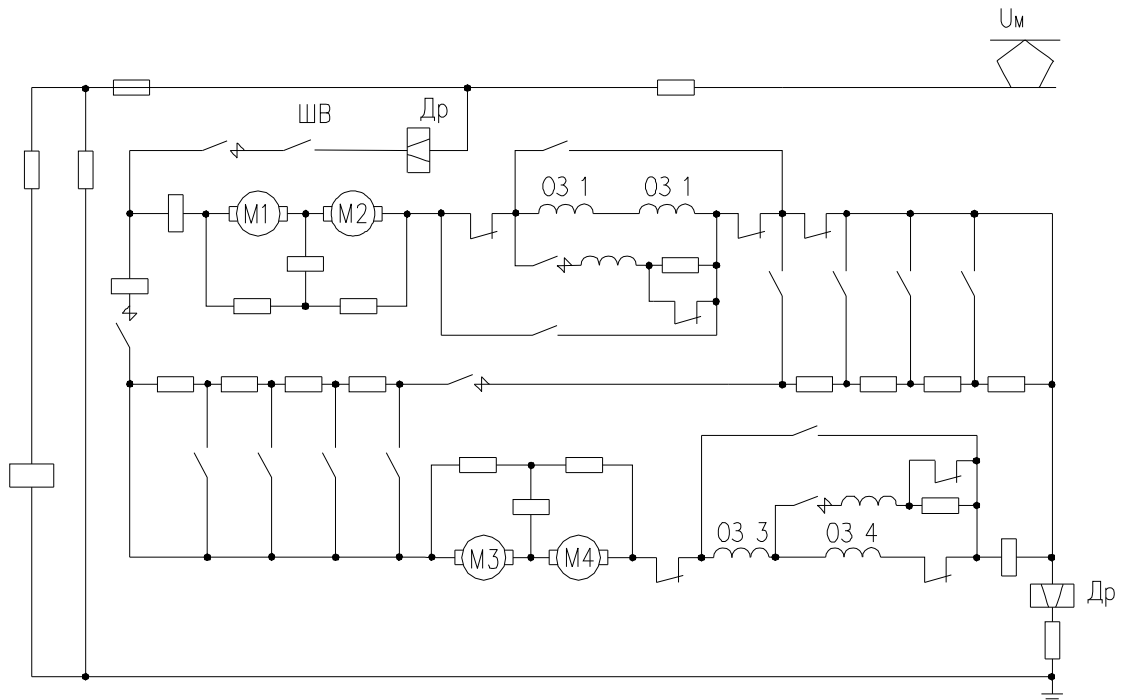


Рис. 1.7. Схема захисту від коротких замикань та перевантажень моторного вагону електропоїзду ЕР2

На нових електропоїздах, наприклад ЕПЛ2Т, захист від струмів короткого замикання виконують ДР на основі герконів [24]. Призначення та принцип дії таких реле співпадає з традиційними, а конструкція відрізняється.

На представлених вище схемах (рис. 1.4-1.7):

М – тягові електродвигуни постійного струму;

ШВ – швидкодіючий вимикач;

ДР – диференційне реле;

КМ – контакти контакторів;

РП – реле перевантаження.

Захист від перевантажень в колах тягових електродвигунів електровозів постійного струму виконується за допомогою реле перевантаження, що ввімкнені в кожен паралельну гілку силового кола у разі паралельного з'єднання ТЕД (рис. 1.4-1.6) [17, 20, 21].

При перевантаженнях в силовому колі електровоза на трьох останніх ступенях ослаблення збудження спрацьовують реле перевантаження. Це призводить до розімкнення контактів контакторів, що знаходяться в шунтуючому колі обмоток збудження. Наприклад, на електровозах ДЕ1, ВЛ8 та ЧС2 вони позначені на схемі (рис. 1.4-1.6) як КМ3 та КМ4 [17, 20, 21]. Після цього встановлюється повне поле тягових електродвигунів та одночасно з цим загорасться червона сигнальна лампа. У разі руху електровозу на повному полі або на першій ступені ослаблення збудження спрацьовування реле перевантаження викликає тільки загорання сигнальної лампи.

Надійність таких захисних реле відносно низька за рахунок того, що вони електромагнітного виду, мають низьку швидкодію та значну кількість типів, що застосовуються на електрорухомому складі сьогодні [25, 26].

При використанні пристроїв захисту на мікропроцесорній елементній базі ці недоліки можливо усунути [27-30].

Як видно з рис. 1.4-1.7, в схемах захисту силових кіл тягових електричних двигунів на різному електрорухомому складі використовуються тягові захисні реле багатьох типів, які виконують однакову функцію – захист від аварійних режимів (табл. 1.1). Їх експлуатація ускладнюється необхідністю мати на складі запасні частини до кожного типу. Тому одним із методів підвищення ефективності роботи систем захисту, який до теперішнього часу застосовувався в незначній мірі, є уніфікація елементів захисних пристроїв і самих пристроїв.

В табл. 1.1 представлені пристрої захисту від аварійних струмів короткого замикання та перевантаження кіл тягових електродвигунів електровозів та електропоїздів постійного струму, що до теперішнього часу використовуються на залізницях [17, 20-24, 31-33].

Таблиця 1.1

**Пристрої захисту від коротких замикань та перевантажень тягових
електродвигунів ЕРС постійного струму**

Тип ЕРС постійного струму	Тип реле для захисту від перенавантажень	Тип реле для захисту від струмів короткого замикання	Сумарна кількість реле перенавантаження та диференційних
ДЕ1		РДЗ-216	5
ВЛ8	РТ-502	Д-4	5
ВЛ23	РТ-406В	Д-4	4
ВЛ10	РТ-502	РДЗ-504	5
ВЛ11м	РТ-502	РДЗ-61	5
ЧС2	14СМ	15СВ	4
ЕП-2К	РТ-57-01	РДЗ-61	4
ЕПЛ2Т	РТ-16-01	1Р.006	3
ЕР2	Р-103	Р-104Б	3

В загальному розумінні уніфікація – це раціональне скорочення числа елементів однакового функціонального призначення.

В схемах захисту ЕРС під уніфікацією прийнято розуміти приведення різних видів захисних апаратів, що виконують однакові функції, до найменшого числа, наприклад, використання однакового типу уніфікованого захисного пристрою для захисту від короткого замикання на будь-якому виді ЕРС постійного струму.

Низька уніфікація приводить до ускладнень в організації ремонту ЕРС, виникає необхідність індивідуального ремонту реле, підвищується доля ручної праці обслуговуючого персоналу.

Для оцінки рівня уніфікації захисних реле в силових схемах електрорухомого складу в дисертаційній роботі пропонується застосовувати наступні коефіцієнти, котрі використовуються в інших галузях техніки [34]:

1. Частота використання реле даного типу:

$$K_N = \frac{N_j}{N}, \quad (1.1)$$

де N_j – сумарна кількість захисних реле даного типу на досліджуваному електрорухомому складі;

N – загальна кількість захисних реле в силових схемах на досліджуваному ЕРС.

Для розрахунку вказаних коефіцієнтів взято електрорухомий склад постійного струму, що використовується на залізницях (табл. 1.1) [17, 20-24, 31-33].

$$K_{N \min} = \frac{1}{38} = 0,026, \quad K_{N \max} = \frac{3}{38} = 0,079.$$

2. Коефіцієнт повторюваності:

$$K_{\Pi} = \frac{N}{M}, \quad (1.2)$$

де M – число типів захисних реле в силових схемах на досліджуваному ЕРС.

$$K_{\Pi} = \frac{38}{13} = 2,92.$$

3. Частота використання захисних реле даного типу з урахуванням кількості типів реле:

$$K_M = \frac{1}{M}, \quad (1.3)$$

$$K_M = \frac{1}{13} = 0,077.$$

Із розрахунків видно, що для діючого ЕРС чисельні значення вказаних коефіцієнтів відносно малі і дорівнюють відповідно: $(0,026...0,079)$; 2,92; 0,077.

Проаналізувавши значення отриманих коефіцієнтів можна сказати, що рівень уніфікації реле захисту від перевантажень та струмів короткого замикання відносно низький. Це приводить до складнощів при експлуатації таких реле та при ремонті, коли потрібно не тільки багато обслуговуючого персоналу, а й багато запасних частин, що виготовляються тільки для окремого типу реле.

1.3 Аналіз методів досліджень електромагнітних перехідних процесів у колах тягових електродвигунів

Електричне обладнання електрорухомого складу розраховано на роботу при певних умовах (напрузі, режимах навантаження). Для підтримки електрообладнання в робочому стані виконують необхідні огляди, ремонти. Але навіть при дотриманні всіх цих умов в електричних колах можуть з'явитися такі шкідливі режими, котрі, якщо буде відсутній надійний захист, призведуть до значного пошкодження обладнання. Такими небезпечними режимами є режими короткого замикання в колах ЕРС, перенапруги, перенавантаження тягових електродвигунів та допоміжних електричних машин, буксування колісних пар тощо. В дисертаційній роботі автором розглядаються два з таких режимів, а саме – виникнення короткого замикання та перенавантаження в колах ТЕД.

Розрізняють внутрішнє та зовнішнє коротке замикання [35, 36]. Під внутрішнім КЗ розуміють аварійний режим, при виникненні якого замикаються накоротко окремі елементи тягового електродвигуна: якір, обмотка головних полюсів (ГП) чи додаткових полюсів (ДП) тощо. У разі

виникнення зовнішнього короткого замикання замикається накоротко весь тяговий електродвигун.

В роботі автором розглядаються обидва режими короткого замикання.

З точки зору значень струму найбільш небезпечним аварійним режимом на електрорухомому складі є коротке замикання на початку кола ТЕД. Важливо забезпечити найбільш швидке розмикання кола до моменту досягнення аварійним струмом усталеного значення.

Для застосування в цьому випадку захисних апаратів на сучасній елементній базі потрібно провести дослідження перехідних процесів при цих режимах з метою визначення характеру перехідних процесів, усталеного значення аварійного струму та уставки апаратів захисту. Для правильного налагодження захисту, згідно з пропозиціями автора, необхідно знати не тільки максимальні струми аварійних режимів, а й швидкість їх зростання di/dt , особливо на початку процесу короткого замикання.

Запропоновані автором методи визначення розрахунку перехідних процесів при короткому замиканні в колі ТЕД постійного струму базуються на результатах аналізу теоретичних та експериментальних досліджень багатьох авторів [35-50].

В реальних умовах при нестационарних струмових режимах в сталевих ділянках магнітного кола електричних машин виникають вихрові струми. Розрахунок перехідних процесів з урахуванням вихрових струмів більш повний і відповідає реальним фізичним процесам. Тому ряд авторів наукових робіт розглядають перехідні процеси з врахуванням цих струмів, наприклад, Р. Рюдєнберг [41].

М. З. Жиц в [42, 43] теж аналітично розв'язує лінійну систему рівнянь, що описує перехідні процеси в двигунах послідовного збудження, з урахуванням вихрових струмів.

Структурні схеми для математичного моделювання двигунів та генераторів представлені в [44].

В роботі [45] розроблений спрощений аналітичний метод визначення максимального струму якоря і відповідного йому значення струму збудження тягових електродвигунів постійного струму без урахування вихрових струмів. Але в ній також розглянуто врахування нелінійності індуктивності згладжуючого реактора, індуктивного шунта та обмотки якоря.

Метод розрахунку граничної величини якірного струму електричних машин постійного струму в режимі короткого замикання представлено і в [46].

Аналітичний метод розрахунку нелінійних диференціальних рівнянь при перехідних процесах в колах машин постійного струму використовує і Карібов С. І. [47].

В роботі [48] спрощене врахування вихрових струмів виконане з достатньою точністю при використанні схеми заміщення з одним контуром вихрових струмів, параметри якого, – активні та індуктивні опори – незмінні.

Перехідні процеси в електричних машинах постійного струму незалежного збудження з урахуванням і реакції якоря, і дії вихрових струмів розглянуто в роботі [49].

Перехідні процеси під час короткого замикання у силовому колі електровоза постійного струму ДЕ1 з урахуванням вихрових струмів досліджені у роботі [50]. Але при цьому швидкість зміни струму для підвищення надійності (ефективності) захисту силових кіл тягових електродвигунів не враховувалась.

Вивчення перехідних процесів дуже часто проводилось або аналітичним методом при значних припущеннях, бо часто урахування вихрових струмів та динамічної індуктивності було дуже спрощене, або взагалі без урахування вихрових струмів. Визначення максимальних значень аварійних струмів проводилось для конкретного виду електрорухомого складу. Загальної моделі не було. Не зверталась увага і на швидкість зростання струму при аварійних режимах.

У проаналізованих літературних джерелах не було знайдено порівняння швидкості зростання струму при КЗ з урахуванням вихрових струмів, без них та з наявністю чи без динамічної індуктивності. Такий аналіз представлений автором вперше.

1.4 Постановка задачі досліджень

Із урахуванням вищенаведеного, постановка задачі формується наступним чином: підвищити ефективність захисту силових кіл електрорухомого складу залізниць постійного струму шляхом зменшення часу спрацьовування захисних апаратів, покращення показників їх уніфікації і, відповідно, зменшення витрат на утримання електрообладнання електровозів та електропоїздів. Потрібно провести дослідження, на базі яких розробити відповідні методи та рекомендації.

Така задача ставиться вперше.

1.5 Висновки до першого розділу

1. Швидкодія існуючих захисних апаратів на електрорухомому складі постійного струму відносно низька. Так, щоб повністю розімкнути силове коло електровозу ДЕ1 при виникненні неповного короткого замикання, потрібно приблизно 0,039 с при швидкості зростання струму $6 \cdot 10^6$ А/с. При меншій швидкості зростання власний час розімкнення кола пристроями захисту збільшиться.
2. Рівень уніфікації реле захисту на діючому електрорухомому складі дуже низький. Розрахунок коефіцієнтів (частоти використання, повторюваності та частоти використання захисних реле даного типу з урахуванням кількості типів реле) показує, що значення цих коефіцієнтів складають відповідно лише (0,026...0,079); 2,92; 0,077.
3. Розвиток напівпровідникової елементної бази, як силової, так і мікропроцесорної техніки, об'єктивно дав можливість будувати

уніфіковані високонадійні, швидкодіючі апарати захисту електричних кіл електрорухомого складу з високим класом точності. Але для цього потрібно провести відповідні теоретичні та експериментальні дослідження з урахуванням специфічних умов експлуатації електрорухомого складу.

4. В проаналізованих літературних джерелах не було знайдено порівняння швидкості зростання струму при короткому замиканні з урахуванням вихрових струмів, без них та з наявністю чи без динамічної індуктивності. Такий аналіз представлений автором вперше.

РОЗДІЛ 2

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ В СИЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГОСТРУМУ

2.1. Створення математичної моделі, яка описує процеси в силовому колі електрорухомого складу постійного струму, та перевірка її адекватності

З метою дослідження перехідних процесів та визначення швидкості зростання струму при коротких замиканнях у силових колах тягових електричних двигунів електровозів постійного струму розроблена математична модель у формі системи диференціальних рівнянь. Адекватність розробленої математичної моделі перевірена автором шляхом порівняння характеристик режимів пуску базового електровоза ДЕ1 згідно з заводською документацією з характеристиками, отриманими за допомогою розробленої моделі.

Модель розроблено на базі електромеханічної системи приводу однієї колісної пари (рис. 2.1) та схем принципової і заміщення (рис. 2.2, 2.3) [51]. Мається на увазі тяговий електродвигун постійного струму послідовного збудження, що має компенсаційну обмотку (КО) та додаткові полюси.

Прийняті наступні основні припущення:

- 1) до короткого замикання тягові електродвигуни працюють у номінальному режимі;
- 2) нехтується значенням насичення як по контуру основного магнітного потоку, так і по контуру розсіювання;
- 3) не враховується поки що вплив контуру вихрових струмів;
- 4) машина цілком скомпенсована, тобто вплив реакції якоря відсутній [52, 53];
- 5) всі параметри схеми заміщення сталі.

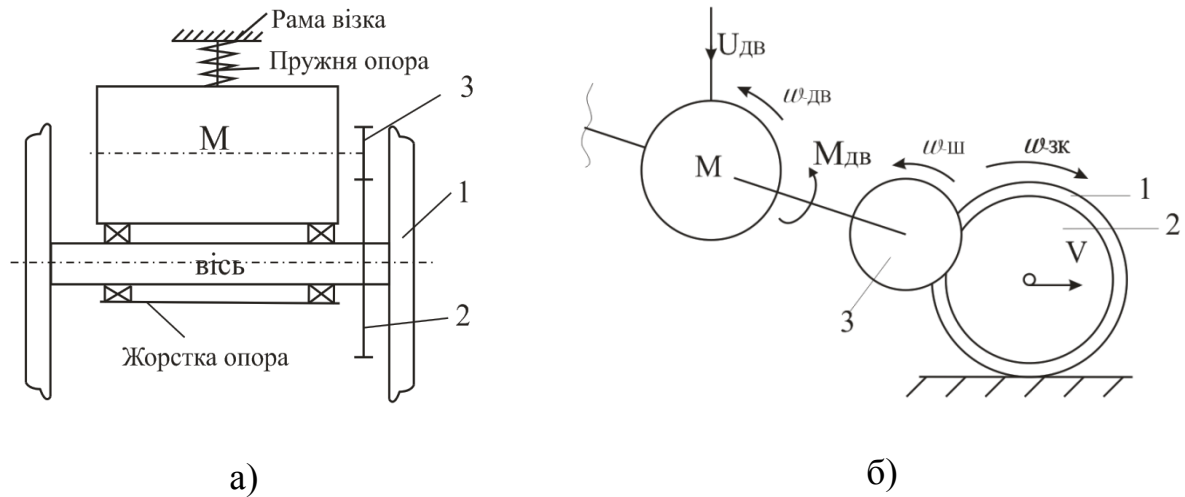


Рис. 2.1. Електромеханічна система приводу однієї колісної пари

На рис. 2.1:

M – тяговий електродвигун постійного струму послідовного збудження;

1 – колісна пара;

2 – зубчате колесо редуктора;

3 – шестерня редуктора;

$U_{дв}$ – напруга, що прикладена до якоря електродвигуна;

$\omega_{зк}$ – кутова швидкість обертання зубчатого колеса;

$\omega_{ш}$ – кутова швидкість обертання шестерні;

$\omega_{дв}$ – кутова швидкість обертання вала електродвигуна;

V – лінійна швидкість руху локомотива;

$M_{дв}$ – обертовий момент електродвигуна.

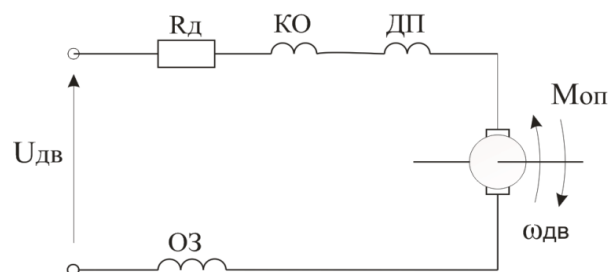


Рис. 2.2. Принципова схема тягового електродвигуна:

R_d – додатковий резистор; КО – компенсаційна обмотка; ДП – обмотка додаткових полюсів; ОЗ – обмотка збудження; $M_{оп}$ – момент опору на валу електродвигуна

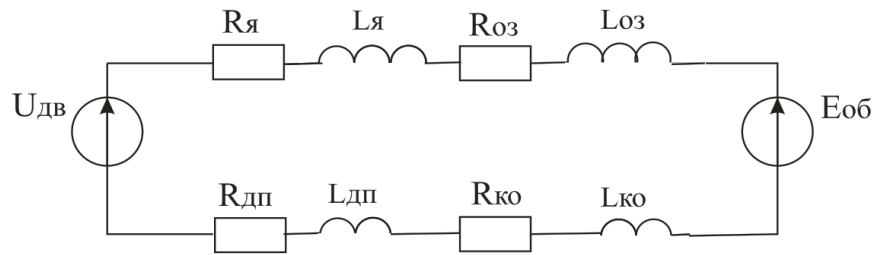


Рис. 2.3. Схема заміщення тягового електродвигуна

На рис. 2.3:

$E_{об}$ – електрорушійна сила (е.р.с.) обертання;

$L_{оз}$, $L_я$, $L_{дп}$, $L_{ко}$ – індуктивності послідовної обмотки збудження ТЕД, обмотки якоря, додаткових полюсів та компенсаційної обмотки відповідно;

$R_{оз}$, $R_я$, $R_{дп}$, $R_{ко}$ – активні опори послідовної обмотки збудження ТЕД, обмотки якоря, додаткових полюсів та компенсаційної обмотки відповідно.

Коли електродвигун працює в експлуатаційному перехідному режимі, струм в якорі, проти-е.р.с. та швидкість обертання можуть змінюватись. В цих умовах в колі якоря виникає е.р.с. самоіндукції $-L_{екв} \frac{di}{dt}$, де $L_{екв} = L_я + L_{дп} + L_{ко}$ – еквівалентна індуктивність кола якоря. Враховуючи напрямок проти-е.р.с. відносно напруги, отримано рівняння електричної рівноваги за 2-м законом Кірхгофа для одного ТЕД[51, 54]:

$$U_{дв} = c_e \Phi \omega_{дв} + (L_{екв} + L_{оз}) \frac{dI_я}{dt} + I_я (R_{екв} + R_{оз}), \quad (2.1)$$

де c_e – постійна електродвигуна;

Φ – основний магнітний потік, [Вб];

$L_{екв}$ – еквівалентна індуктивність обмотки якоря, допоміжних полюсів, компенсаційної обмотки ТЕД, [Гн];

$L_{оз}$ – індуктивність обмотки збудження, [Гн];

$R_{екв} = R_я + R_{дп} + R_{ко}$ – еквівалентний активний опір обмотки якоря, допоміжних полюсів, компенсаційної обмотки ТЕД, [Ом];

R_{03} – активний опір обмотки збудження, [Ом];

$I_{я}$ – струм у колі якоря, [А].

Постійну електродвигуна знайдено за формулою:

$$c_e = \frac{Np}{60a}, \quad (2.2)$$

де p – число пар головних полюсів ТЕД;

N – повна кількість провідників обмотки якоря;

a – число паралельних гілок обмотки якоря.

Повну індуктивність обмотки якоря ТЕД знайдено за наступною формулою [6, 52, 55]:

$$L_{я} = L'_{я} + L''_{я}, \quad (2.3)$$

де $L'_{я}$ – індуктивність обмотки якоря від потоку реакції якоря, [Гн];

$L''_{я}$ – індуктивність обмотки якоря від місцевих потоків розсіювання пазів, [Гн].

$$L'_{я} = 1,05\mu_0 \cdot \frac{w'_{я}{}^2 \cdot \alpha^3 \cdot l_{я} \cdot D_{я}}{k_{\delta} \cdot \delta} \cdot k_{\mu}, \quad (2.4)$$

де $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнітна проникність;

$w'_{я}$ – число витків обмотки якоря ТЕД на полюс;

α – коефіцієнт полюсного перекриття;

$l_{я}$ – довжина сталевих пакетів якоря, [м];

$D_{я}$ – діаметр якоря, [м];

$k_{\mu} = (0,3 - 0,4)$ – коефіцієнт насичення сталевих частин шляху потоку реакції якоря;

k_{δ} – коефіцієнт повітряного проміжку;

δ – повітряний проміжок, [м].

$$L_{\text{я}}'' = \frac{4 \cdot l_{\text{я}} \cdot \lambda_{\text{я}} \cdot w_{\text{я}}^2}{Z_{\text{я}}}, \quad (2.5)$$

де $\lambda_{\text{я}}$ – провідність розсіяння паза;

$w_{\text{я}}$ – кількість послідовно ввімкнених витків обмотки якоря ТЕД;

$Z_{\text{я}}$ – число пазів якоря.

Індуктивність $L_{\text{я}}' = 0$ в тому разі, коли тяговий електродвигун має компенсаційну обмотку.

Індуктивність компенсаційної обмотки розраховано за наступною формулою [55]:

$$L_{\text{ко}} = \frac{2 \cdot w_{\text{ко}}^2 \cdot l_{\text{я}} \cdot \lambda_{\text{ко}}}{p \cdot Z_{\text{ко}}}, [\text{Гн}], \quad (2.6)$$

де $w_{\text{ко}}$ – кількість витків компенсаційної обмотки, що ввімкнені послідовно;

$\lambda_{\text{ко}}$ – провідність розсіяння паза КО;

$Z_{\text{ко}}$ – число пазів КО на полюс.

Індуктивність обмотки допоміжних полюсів визначено повним магнітним потоком, що зчеплений з цією обмоткою, [55]

$$L_{\text{дп}} = 0,65 \frac{2 \cdot p \cdot \sigma_{\text{дп}} \cdot \Phi_{\text{дп}} \cdot w_{\text{дп}}}{I_{\text{я}}}, [\text{Гн}] \quad (2.7)$$

де $\sigma_{\text{дп}}$ – коефіцієнт розсіяння додаткового полюса;

$\Phi_{\text{дп}}$ – корисний магнітний потік ДП при струмі $I_{\text{я}}$, [Вб];

$w_{\text{дп}}$ – кількість витків котушки ДП.

Індуктивність обмотки збудження, [55]

$$L_{\text{оз}} = 2 \cdot p \cdot w_{\text{оз}} \cdot (\sigma - 1) \cdot \frac{d\Phi}{dI_{\text{я}}}, [\text{Гн}], \quad (2.8)$$

де w_{03} – кількість витків котушки збудження головного полюсу;

σ – коефіцієнт розсіювання головних полюсів.

Другим рівнянням математичної моделі є рівняння руху електроприводу електровозу, котре враховує взаємодію всіх зусиль і моментів у системі в будь-який час [56]:

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{дв}} - M_{\text{оп}}, \quad (2.9)$$

де $M_{\text{дин}}$ – динамічний момент тягового електродвигуна, що виникає тільки в перехідному режимі;

$M_{\text{дв}}$ – обертовий момент, що розвивається електродвигуном при роботі (прийнято додатним, бо він направлений у бік руху приводу);

$M_{\text{оп}}$ – момент опору руху, що створюється навантаженням (записаний зі знаком «мінус», бо він направлений проти руху поїзду).

За умови, що момент інерції $J = \text{const}$, динамічний момент має вигляд:

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt}, [\text{Н} \cdot \text{м}], \quad (2.10)$$

де J – момент інерції приводу однієї колісної пари, $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$.

На електровозах та електропоїздах постійного струму тяговий електродвигун приводить в дію колісну пару за допомогою редуктора. Всі ці елементи приводу (колісна пара, зубчате колесо, шестерня, ротор електродвигуна) рухаються з різною частотою обертання (рис. 2.1). При цьому кожен елемент кінематичного кола має пружність і деформується під дією сил та моментів, а в з'єднаннях елементів є повітряні проміжки. При розрахунках знехтувано пружністю і проміжками в передачах, механічні зв'язки прийнято абсолютно жорсткими, що в незначній мірі впливає на результат.

Момент інерції приведено до валу тягового електродвигуна з урахуванням ваги поїзда, що приходить на один електродвигун, тому $J = J_{\text{прив}}$,

де $J_{\text{прив}}$ – це приведений момент інерції до валу тягового електродвигуна.

У цьому випадку момент інерції при передатному відношенні передачі редуктора $i_{\text{ред}}$ і заданій масі поїзда визначається за розрахунковою схемою (рис. 2.1) і записується як [56,57]:

$$J_{\text{прив}} = J_{\text{дв}} + 2 \cdot J_{\text{ш}} + \frac{2 \cdot (J_{\text{зк}} + J_{\text{кп}})}{i_{\text{ред}}^2} + \frac{(P + Q) \cdot \rho^2}{n_{\text{дв}}}, [\text{кг} \cdot \text{м}^2] \quad (2.11)$$

де $J_{\text{дв}}$ – момент інерції якоря тягового електродвигуна, $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$;

$J_{\text{ш}}$ – момент інерції шестерні редуктора, $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$;

$J_{\text{зк}}$ – момент інерції зубчатого колеса редуктора, $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$;

$J_{\text{кп}}$ – момент інерції колісної пари, $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$;

P – маса електровоза, $[\text{кг}]$;

Q – маса поїзда, $[\text{кг}]$;

$n_{\text{дв}}$ – кількість вісей (тягових електродвигунів).

ρ – радіус приведення, що визначається за формулою:

$$\rho = \frac{V}{\omega_{\text{дв}}}, \quad (2.12)$$

де V – лінійна швидкість руху електровоза, $[\text{м/с}]$.

Рівняння (2.10) після використання (2.11) та (2.12) матиме вигляд:

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{прив}} \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt}. \quad (2.13)$$

Обертовий момент, що розвивається ТЕД при роботі, визначається як:

$$M_{\text{дв}} = c_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}, [\text{Н} \cdot \text{м}], \quad (2.14)$$

де $c_m = \frac{c_e}{2\pi}$ – постійна електродвигуна.

Момент опору знайдено за формулою:

$$M_{\text{оп}} = \frac{F \cdot r_{\text{кп}}}{i_{\text{ред}}}, \quad (2.15)$$

де $r_{\text{кп}}$ – радіус колісної пари, [м];

$$F = \frac{P}{n_{\text{дв}}} \cdot g \cdot (w'_0 + i_c) + \frac{Q}{n_{\text{дв}}} \cdot g \cdot (w''_0 + i_c), [\text{Н}], \quad (2.16)$$

де $g = 9,81$ – прискорення, $[\text{м/с}^2]$;

i_c – ухил профілю шляху;

w'_0 – основний питомий опір руху електровоза в режимі тяги [58, 59]:

$$w'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot V + 0,0003 \cdot V^2, [\text{Н/кН}]; \quad (2.17)$$

w''_0 – основний питомий опір руху чотиривісних вантажних вагонів з вантажем та підшипниками ковзання:

$$w''_0 = 0,7 + \frac{8 + 0,1 \cdot V + 0,0025 \cdot V^2}{q_0}, [\text{Н/кН}], \quad (2.18)$$

де $q_0 = 25$ т – максимальне навантаження на вісь для вантажного вагону.

Додатковий питомий опір руху від ухилів: $w_i = 4 [\text{Н/кН}]$.

Додатковий опір руху від кривих: $w_r = 0$.

Рівняння (2.9) переписано з урахуванням (2.13)-(2.15) і в результаті отримано:

$$J_{\text{прив}} \frac{d\omega}{dt} = c_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} - M_{\text{оп}}. \quad (2.19)$$

Рівняння (2.1) та (2.19) перетворені в канонічну форму:

$$\frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_{\text{м}} - c_{\text{е}} \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{екв}} + R_{\text{оз}})}{(L_{\text{екв}} + L_{\text{оз}})}, \quad (2.20)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{c_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} - M_{\text{оп}}}{J_{\text{прив}}}. \quad (2.21)$$

Конструктивна особливість тягового електродвигуна послідовного збудження полягає в тому, що магнітний потік є функцією струму якоря $c\Phi = f(I_{\text{я}})$, причому ця залежність нелінійна. В роботі розглядається двигун послідовного збудження, для якого $I_{\text{я}} = I_{\text{оз}}$. Тоді можна записати що $c\Phi = f(I_{\text{оз}})$.

Автором складено систему диференціальних рівнянь (2.22) з використанням рівняння електричної рівноваги при роботі ТЕД (2.20) та рівняння руху ротора (2.21), а також враховані рівняння кривих намагнічування. Останні з урахуванням сталих $c_{\text{е}}$ та $c_{\text{м}}$ запишуться у вигляді: $c_{\text{е}}\Phi = f(I_{\text{оз}})$, $c_{\text{м}}\Phi = f(I_{\text{оз}})$.

Враховано також умови ступінчастого реостатного пуску тягових електродвигунів за допомогою пускового реостату $R_{\text{пуск}}$.

В роботі прийнято, що параметри усіх ТЕД однакові.

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_{\text{м}} - n_{\text{дв}} \cdot c_{\text{е}} \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - I_{\text{я}} \cdot (n_{\text{дв}} \cdot (R_{\text{екв}} + R_{\text{оз}}) + R_{\text{пуск}})}{n_{\text{дв}} \cdot (L_{\text{екв}} + L_{\text{оз}})}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{c_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} - M_{\text{оп}}}{J_{\text{прив}}}; \\ c_{\text{е}}\Phi = f(I_{\text{оз}}); \\ c_{\text{м}}\Phi = f(I_{\text{оз}}). \end{cases} \quad (2.22)$$

Систему (2.22) складено для $n_{\text{дв}}$ тягових електродвигунів, що з'єднані послідовно:

$$n_{\text{дв}} = n_{\text{екв}} + n_{\text{оз}}, \quad (2.23)$$

де $n_{\text{екв}}$ – кількість обмоток якоря, компенсаційних обмоток та обмоток допоміжних полюсів ТЕД;

$n_{\text{оз}}$ – кількість обмоток збудження ТЕД.

Для використання кривої намагнічування потрібно провести її лінеаризацію. Найбільш розповсюдженим методом лінеаризації нелінійностей є частково-лінійна апроксимація, при якій за допомогою відомих чисельних методів підбирається аналітичний вираз для нелінійності.

У даному випадку вираз має наступний вигляд [60-62]:

$$c\Phi(I) = \begin{cases} c\Phi_{01} + k_{\Phi 1} \cdot I_{\text{оз}1} \\ c\Phi_{02} + k_{\Phi 2} \cdot I_{\text{оз}2} \\ \vdots \\ c\Phi_{0i} + k_{\Phi i} \cdot I_{\text{оз}i} \end{cases},$$

де $k_{\Phi i}$ – коефіцієнт, що залежить від форми кривої на i -й ділянці апроксимації

$$k_{\Phi i} = \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\varphi_i}{\lambda_i}. \quad (2.24)$$

Одним з базових електровозів при дослідженнях прийнято електровоз постійного струму ДЕ1.

На рис. 2.4 розглянуто апроксимацію кривої намагнічування тягового електродвигуна типу ЕД-141У1 цього електровоза[17].

Криву на рис. 2.4 розбито на вісім різних ділянок з такими інтервалами струму по вісі абсцис, які забезпечують майже прямолінійність кожної ділянки навіть на коліні кривої намагнічування. У відповідності з виразом (2.24) проведено апроксимацію цієї кривої, тобто записано значення $c\Phi_{0i}$, $K_{\Phi i}$ для кожної ділянки апроксимації.

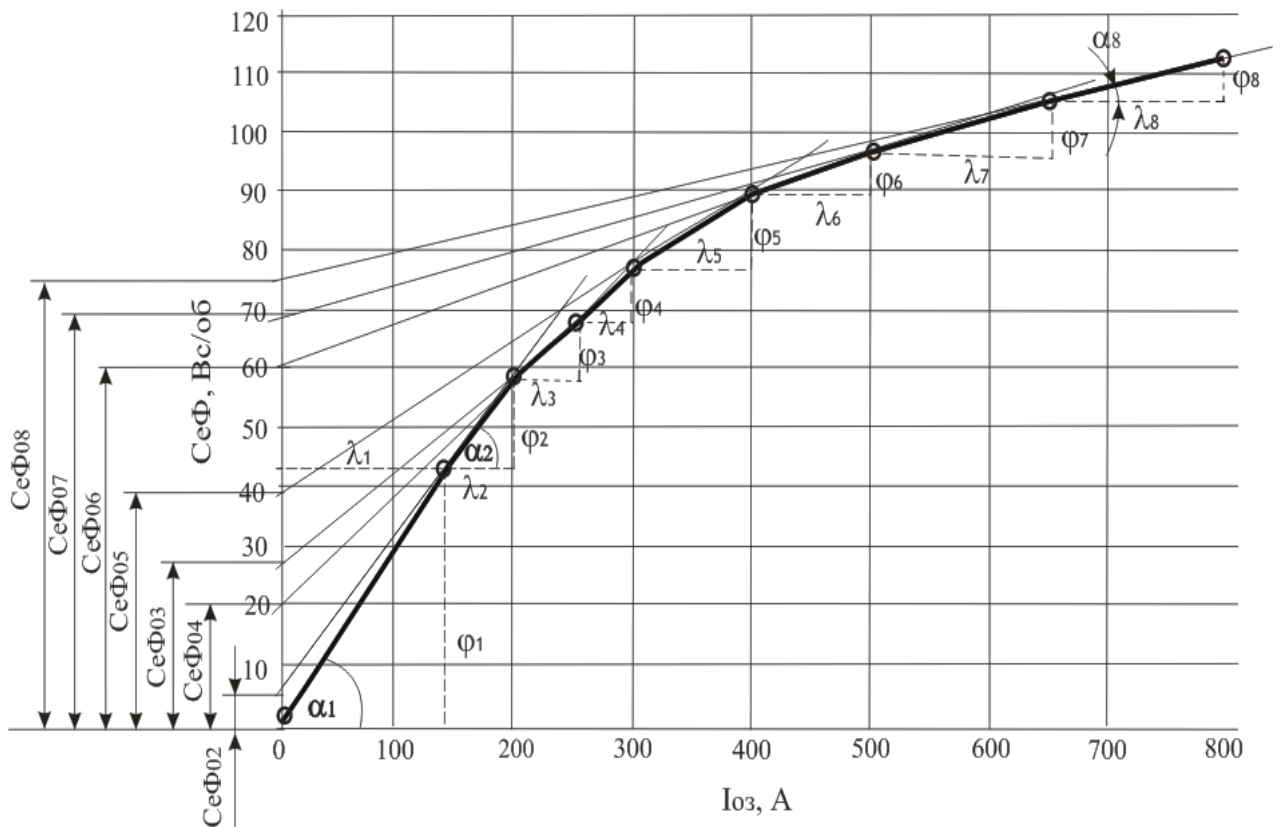


Рис. 2.4. Залежність $c_e \Phi = f(I_{03})$ для тягового електродвигуна типу ЕД-141У1

1 ділянка: $c_e \Phi_{01} = 0$; $K_{\Phi 1} = \frac{\varphi_1}{\lambda_1}$, $K_{\Phi 1} = \frac{43,4}{140} = 0,31$;

2 ділянка: $c_e \Phi_{02} = 4$; $K_{\Phi 2} = \frac{\varphi_2}{\lambda_2}$, $K_{\Phi 2} = \frac{15,7}{60} = 0,26$;

3 ділянка: $c_e \Phi_{03} = 26$; $K_{\Phi 3} = \frac{\varphi_3}{\lambda_3}$, $K_{\Phi 3} = \frac{8,4}{50} = 0,168$;

4 ділянка: $c_e \Phi_{04} = 49$; $K_{\Phi 4} = \frac{\varphi_4}{\lambda_4}$, $K_{\Phi 4} = \frac{9,3}{50} = 0,186$;

5 ділянка: $c_e \Phi_{05} = 69$; $K_{\Phi 5} = \frac{\varphi_5}{\lambda_5}$, $K_{\Phi 5} = \frac{12,6}{100} = 0,126$;

6 ділянка: $c_e \Phi_{06} = 99$; $K_{\Phi 6} = \frac{\varphi_6}{\lambda_6}$, $K_{\Phi 6} = \frac{7,4}{100} = 0,074$;

$$7 \text{ ділянка: } c_e \Phi_{07} = 68; K_{\Phi 7} = \operatorname{tg} \alpha_7 = \frac{\varphi_7}{\lambda_7}, K_{\Phi 7} = \frac{8,7}{150} = 0,058;$$

$$8 \text{ ділянка: } c_e \Phi_{08} = 74; K_{\Phi 8} = \operatorname{tg} \alpha_8 = \frac{\varphi_8}{\lambda_8}, K_{\Phi 8} = \frac{6,9}{150} = 0,046.$$

На рис. 2.5 апроксимовано залежність $c_m \Phi = f(I_{03})$ аналогічно $c_e \Phi = f(I_{03})$.

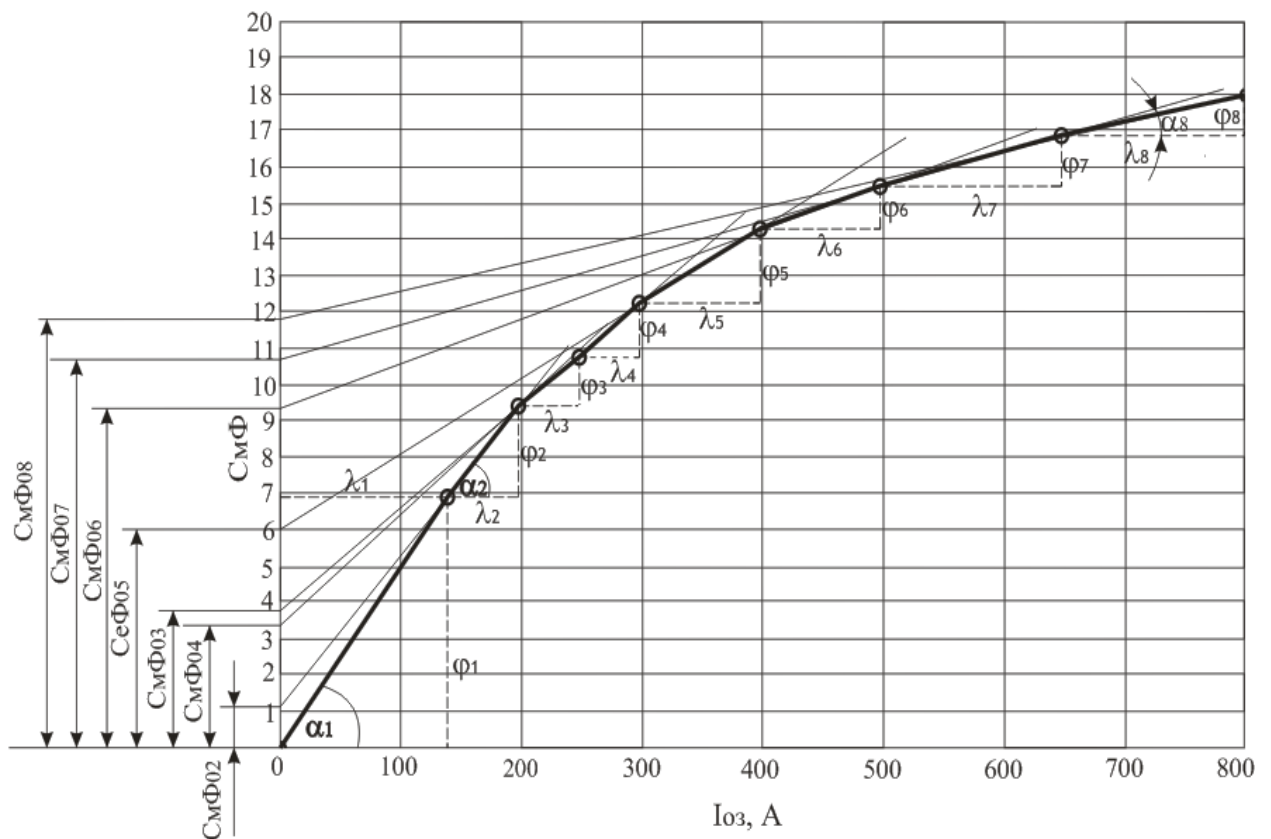


Рис. 2.5. Залежність $c_m \Phi = f(I_{03})$ для тягового електродвигуна типу ЕД-141У1

Апроксимацію кожної ділянки кривої $c_m \Phi = f(I_{03})$ проведено у відповідності з виразом (2.24):

$$1 \text{ ділянка: } c_m \Phi_{01} = 0; K_{\Phi 1} = \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\varphi_1}{\lambda_1}, K_{\Phi 1} = \frac{6,911}{140} = 0,049;$$

$$2 \text{ ділянка: } c_m \Phi_{02} = 1,1; K_{\Phi 2} = \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\varphi_2}{\lambda_2}, K_{\Phi 2} = \frac{2,5}{60} = 0,042;$$

$$3 \text{ ділянка: } c_m \Phi_{03} = 3,7; K_{\Phi 3} = \frac{\varphi_3}{\lambda_3}, K_{\Phi 3} = \frac{1,34}{50} = 0,027;$$

$$4 \text{ ділянка: } c_m \Phi_{04} = 3,3; K_{\Phi 4} = \frac{\varphi_4}{\lambda_4}, K_{\Phi 4} = \frac{1,48}{50} = 0,0296;$$

$$5 \text{ ділянка: } c_m \Phi_{05} = 6; K_{\Phi 5} = \frac{\varphi_5}{\lambda_5}, K_{\Phi 5} = \frac{2,01}{100} = 0,02;$$

$$6 \text{ ділянка: } c_m \Phi_{06} = 9,3; K_{\Phi 6} = \frac{\varphi_6}{\lambda_6}, K_{\Phi 6} = \frac{1,17}{100} = 0,012;$$

$$7 \text{ ділянка: } c_m \Phi_{07} = 10,7; K_{\Phi 7} = \frac{\varphi_7}{\lambda_7}, K_{\Phi 7} = \frac{1,39}{150} = 0,01;$$

$$8 \text{ ділянка: } c_m \Phi_{08} = 11,8; K_{\Phi 8} = \frac{\varphi_8}{\lambda_8}, K_{\Phi 8} = \frac{1,1}{150} = 0,008.$$

Математичну модель (2.22) з апроксимованими $c_e \Phi = f(I_{03})$ та $c_m \Phi = f(I_{03})$, використано для визначення $I_{\text{я}} = f(t)$ від моменту подачі напруги до кола електродвигунів до моменту виведення 11-ої ступені пускового реостату з метою порівняння значень пускових струмів, отриманих за допомогою цієї математичної моделі, і значеннями струмів відповідно до технічної документації (додаток Б).

При цьому вказаний процес розбито на два етапи:

- перший етап – виведення перших восьми ступенів пускового реостату;
- другий етап – виведення 9, 10 та 11-ї ступені.

Розрахунок проведено для тягових електродвигунів типу ЕД-141У1 базового електровоза ДЕ1.

При розрахунках прийнято, що:

- поїзд знаходиться на прямій, майже горизонтальній, ділянці;
- маса електровоза $P = 188 \cdot 10^3$ кг;
- маса потягу $Q = 4 \cdot 10^6$ кг;

- кількість тягових електродвигунів дорівнює восьми ($n_{\text{дв}} = 8$) – з'єднані послідовно;
- номінальний струм якоря $I_{\text{н}} = 565 \text{ А}$;
- активний опір обмотки збудження $R_{\text{оз}} = 0,0253 \text{ Ом}$;
- еквівалентний активний опір кола якоря $R_{\text{екв}} = 0,0674 \text{ Ом}$;
- індуктивність обмотки збудження $L_{\text{оз}} = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$;
- еквівалентна індуктивність кола якоря $L_{\text{екв}} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$;
- номінальна напруга електродвигуна $U_{\text{дв}} = 375 \text{ В}$;
- напруга контактної мережі $U_{\text{м}} = 3000 \text{ В}$.

Початкові умови для першого етапу пуску визначено при $t = 0$:

- початковий струм якоря $I_{\text{я.поч}} = 0$;
- лінійна швидкість руху електровоза в перший момент пуску $V = 0$, тобто і $\omega_{\text{дв}} = 0$.

Початкові умови для другого етапу пуску: значення t , $I_{\text{я}}$, $\omega_{\text{дв}}$ дорівнюють відповідно тим значенням, які мають місце після виведення перших восьми ступенів пускового реостату.

Для більш точного та менш трудомісткого вирішення поставленої задачі для розрахунків перехідних процесів під час пуску застосовано ПЕОМ (додаток В) [63-68].

Для розрахунку (2.22) автором використано метод Рунге-Кутта, який тривалий час застосовується для отримання рішень різних систем диференціальних рівнянь, тому результати, отримані з його допомогою, можна вважати достовірними.

Математична модель (2.22) може бути використана для будь-якого виду електрорухомого складу постійного струму з урахуванням його особливостей.

Результати, які отримані за допомогою запропонованої математичної моделі, у вигляді відповідних кривих показані на рис. 2.6 та рис. 2.7.

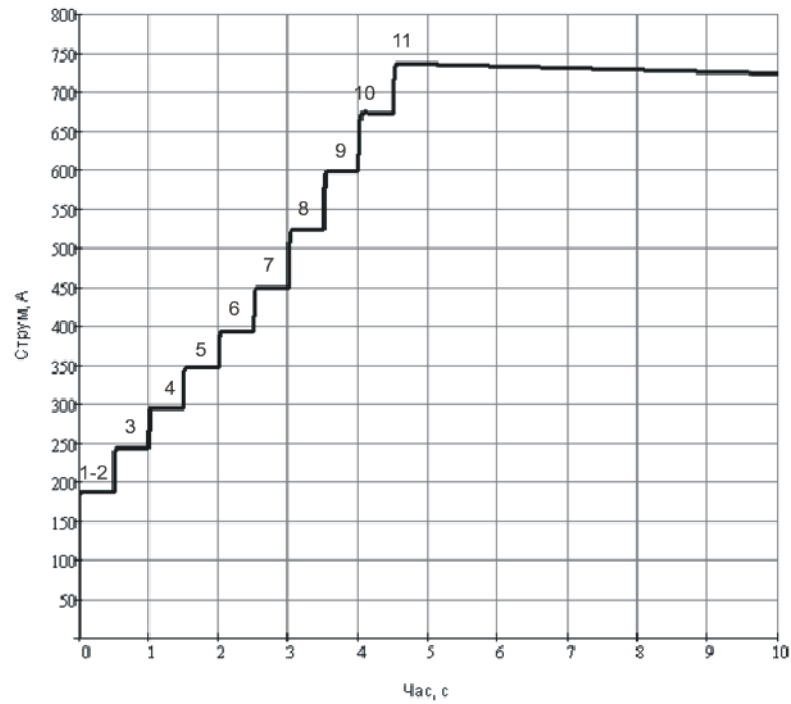


Рис. 2.6. Графік перехідного процесу $I_{\text{я}} = f(t)$ при пуску тягових електродвигунів ЕД-141У1 до моменту рушення

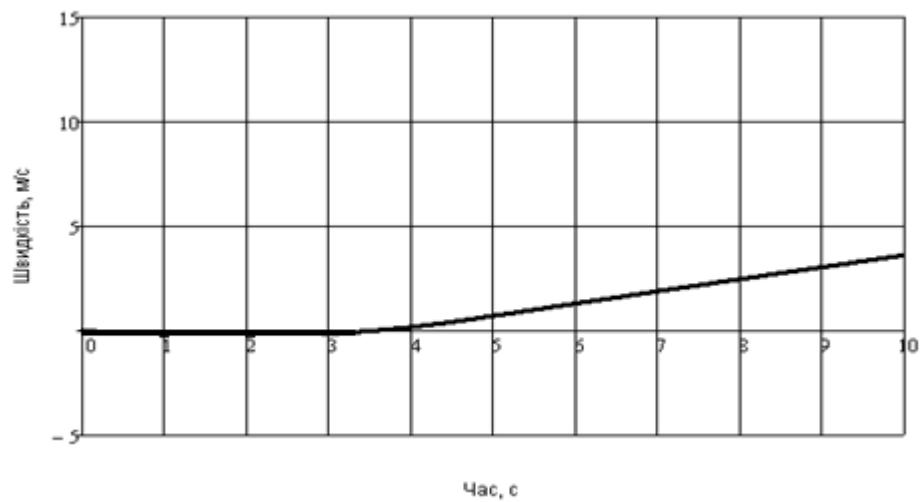


Рис. 2.7. Графік перехідного процесу $V = f(t)$ при пуску тягових електродвигунів ЕД-141У1 до моменту рушення

У пускових реостатах з моменту пуску до моменту рушення виводиться вісім ступенів (додаток Б). Лінійна швидкість руху електровозу при цьому дорівнює нулю. При виведенні першої та другої ступені реостату струм дорівнює 187 А, третьої ступені – 242 А, четвертої – 293 А і т. д., а при виведенні дев'ятої ступені струм пуску дорівнює 594 А.

Після дев'ятої ступені починає зростати лінійна швидкість, що підтверджує залежність $V = f(t)$ (рис. 2.7), яка отримана з допомогою ПЕОМ. В технічній документації електродвигуна (додаток Б) вказано, що швидкість починає зростати теж після виводу дев'ятої ступені пускового реостату.

З рис. 2.6 та табл. 2.1 видно, що струм при виведенні відповідних ступенів, визначений з допомогою математичної моделі, майже точно дорівнює значенням, вказаним вище, які визначені згідно з заводською документацією [17], що підтверджує адекватність запропонованої моделі.

Таблиця 2.1

Порівняння реальних та отриманих з допомогою математичної моделі значень струму при пуску ТЕД ЕД-141У1

№ ступенів пускових реостатів	$R_{\text{пуск}}, \text{ Ом}$	Швидкість руху електровозу, м/с	Реальні значення струму, А	Отримані з допомогою математичної моделі значення струму, А	Відхилення між реальним та розрахунковим струмами, %
1-2	15,288	-	187	189	1,1
3	11,608	-	242	245	1,2
4	9,448	-	293	296,3	1,11
5	7,928	-	344	348	1,2
6	6,9	-	390	394,6	1,2
7	5,948	-	446	450	0,9
8	4,9968	-	519	525	1,14
9	4,268	0,2	594	598	0,7
10	3,706	0,55	668	673	0,7
11	3,319	0,8	731	737	0,8

Результати, які наведені у табл. 2.1, у вигляді відхилення між реальним значенням струму в колі якоря та відповідним струмом, отриманим при дослідженні за допомогою математичної моделі (2.22) (рис. 2.6), дозволяють вважати, що запропонована математична модель задовільно описує процеси в

силовому колі електровоза, тобто математична модель (2.22) є адекватною і може бути використана в подальших дослідженнях.

Маючи залежність $I_a = f(t)$, можна визначити швидкість зростання струму у колі за певний проміжок часу. Цей проміжок часу прийнято у роботі 0,0001 с, що відповідає часу спрацьовування сучасних мікроконтролерів [69], використання яких дозволить зменшити час спрацьовування захисних пристроїв від аварійних струмів у силових колах ЕРС в порівнянні з діючими пристроями.

Швидкість di/dt пропонується визначати наступним методом. Першу ступінь зміни струму збільшено за масштабом (рис. 2.8), потім відкладено від нуля за шкалою часу час 0,0001 с, піднято перпендикуляр до кривої струму та отримано шукану величину струму.

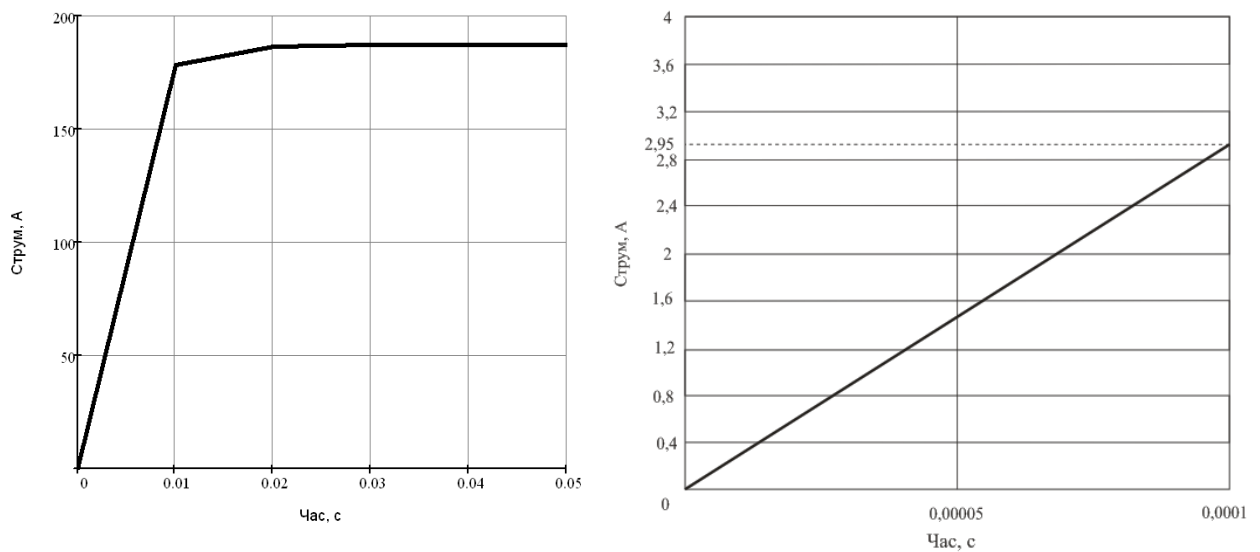


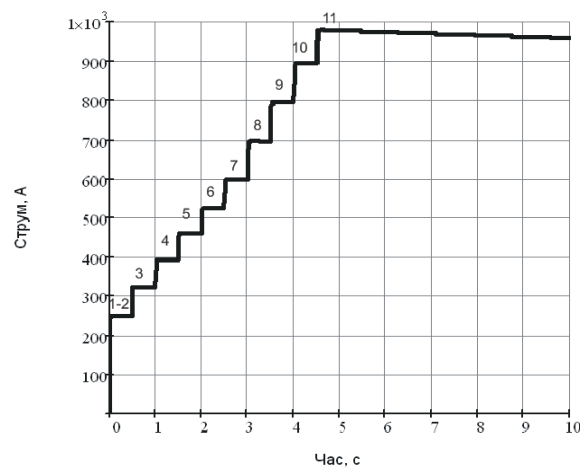
Рис. 2.8. Збільшена за масштабом перша ступінь зміни пускового струму при напрузі контактної мережі 3000 В

Для визначення di/dt потрібно поділити отримане значення струму на обраний час $t_{кз} = 0,0001$ с:

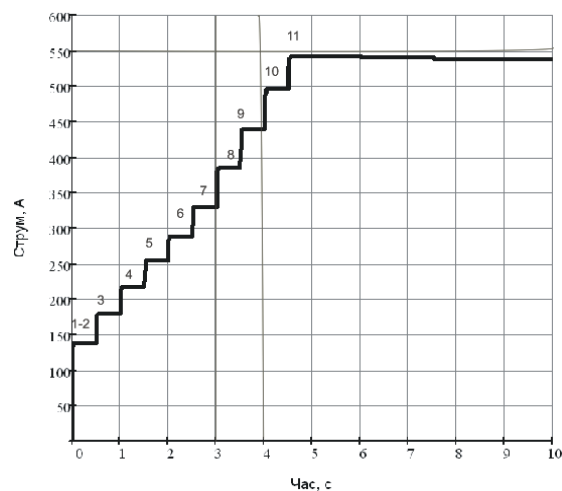
$$\frac{di}{dt} = \frac{2,95}{0,0001} = 29500 \text{ А/с.}$$

На ділянках залізниць, де використовується рекуперативне гальмування, найбільша напруга на струмоприймачі електрорухомого складу може досягати 4000 В. Найменше значення напруги на струмоприймачі ЕРС дорівнює 2200 В [70].

Для визначення di/dt під час пуску при різних напругах контактної мережі використана математична модель (2.22). Дослідження проведені аналогічно представленим в додатку В, зі зміною тільки напруги U_m відповідно. Результати цих досліджень представлені на рис. 2.9.

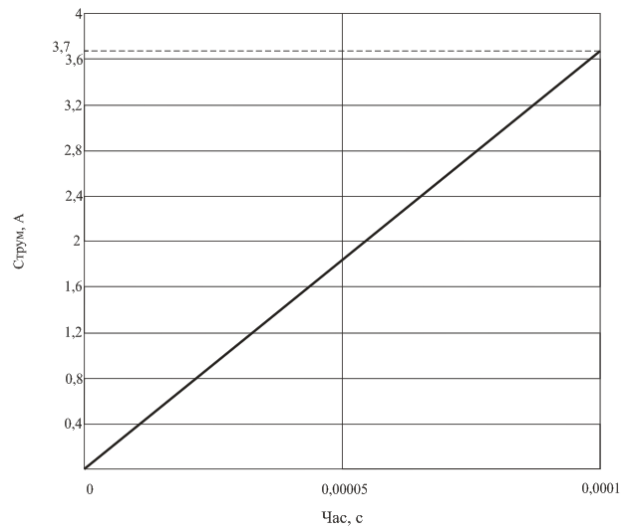


а)



б)

Рис. 2.9. Графік перехідного процесу $I_{\text{я}} = f(t)$ при пуску тягових електродвигунів ЕД-141У1 при напрузі контактної мережі 4000 В (а); 2200 В (б)



а)

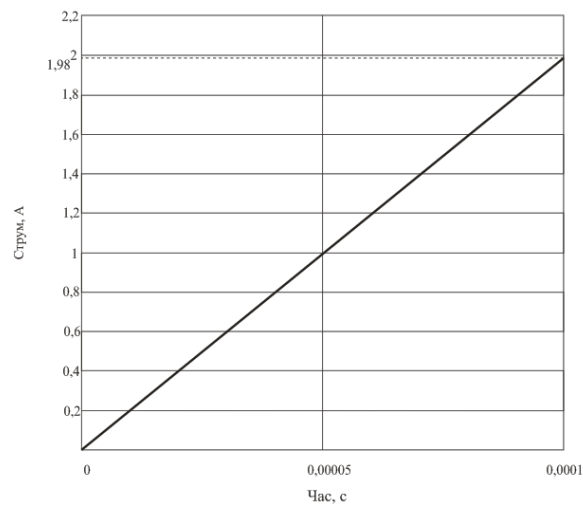


Рис. 2.10. Збільшена за масштабом перша ступінь зміни пускового струму при напрузі контактної мережі 4000 В (а); 2200 В (б)

Швидкість зміни струму при напрузі контактної мережі 4000 В та 2200 В знайдено відповідно до запропонованого вище методу. Так для $U_M = 4000$ В:

$$\frac{di}{dt} = \frac{3,7}{0,0001} = 37000 \text{ A/c};$$

для $U_M = 2200$ В:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1,98}{0,0001} = 19800 \text{ A/c}.$$

Таким чином, при розробці швидкодіючого пристрою захисту від струмів КЗ на сучасній мікропроцесорній базі потрібно забезпечити, щоб цей пристрій спрацьовував при: $\frac{di}{dt} > 29500 \text{ А/с}$ ($U_M = 3000 \text{ В}$); $\frac{di}{dt} > 37000 \text{ А/с}$ ($U_M = 4000 \text{ В}$); $\frac{di}{dt} > 19800 \text{ А/с}$ ($U_M = 2200 \text{ В}$). Наскільки $\frac{di}{dt}$ повинно бути більше вказаних значень потрібно встановити в результаті відповідних досліджень.

2.2. Дослідження перехідних процесів з урахуванням швидкості зміни струму при коротких замиканнях в силовому колі електровоза з допомогою створеної математичної моделі

2.2.1. Без врахування вихрових струмів та динамічної індуктивності

Електрична схема силових кіл електрорухомого складу передбачає роботу в режимах тяги та електричного гальмування. В даній дисертаційній роботі розглянуті перехідні процеси в силовому колі електровоза при КЗ в режимі тяги. Тяговий електропривод у цьому режимі може забезпечувати роботу ТЕД на трьох з'єднаннях: послідовному («С»), коли всі тягові електродвигуни електровоза з'єднані послідовно, послідовно-паралельному («СП»), коли половина ТЕД з'єднані послідовно в дві паралельні вітки та паралельному («П»), коли декілька віток з'єднані паралельно по два електродвигуни в кожній.

Відомо, що при роботі електрорухомого складу в його колах можуть виникати електромеханічні та електромагнітні перехідні процеси.

Електромеханічні перехідні процеси пов'язані зі зміною навантаження на валу тягового електродвигуна, що передбачає враховування зміни частоти обертів ТЕД.

Електромагнітні перехідні процеси розглядаються при постійній частоті обертів. Тривалість їх набагато менша, ніж електромеханічних перехідних процесів. Вони можуть бути як експлуатаційними, так і аварійними. До найбільш тяжких аварійних електромагнітних перехідних процесів відносять режим короткого замикання у силовому колі тягового електродвигуна, що й розглядається у роботі.

Тому під час короткого замикання можна вважати, що швидкість обертання ротора залишається незмінною, бо тяговий електродвигун зчеплений з великими інерційними масами і за час проходження КЗ швидкість поїзду значно змінитися не може [55, 71, 72]. Тому з урахуванням вищесказаного можна вважати, що при КЗ $\omega_{\text{дв}} = \text{const}$.

Після виведення пускового реостату ($R_{\text{пуск}} = 0$) математична модель при короткому замиканні (2.22) для $n_{\text{дв}}$ тягових електродвигунів перетвориться в систему диференціальних рівнянь виду:

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_{\text{м}} - n_{\text{дв}} \cdot c_{\text{е}} \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - n_{\text{дв}} \cdot (R_{\text{екв}} + R_{\text{оз}}) \cdot I_{\text{я}}}{n_{\text{дв}} \cdot (L_{\text{екв}} + L_{\text{оз}})}, \\ c_{\text{е}} \Phi = f(I_{\text{оз}}). \end{cases} \quad (2.25)$$

Позначення величин в системі (2.25) ті ж самі що і в (2.22).

За допомогою рис. 1.1 розглянуто залежність $I_{\text{кз}} = f(t)$ при виникненні неповного короткого замикання в різних точках силового кола восьмивісного електровоза постійного струму ДЕ1 при напрузі контактної мережі 3000 В, коли ТЕД з'єднані послідовно.

Ділянка кола від контактної мережі до якоря другого тягового електродвигуна (точка 2 на рис. 1.1) задовільно захищена швидкодіючим вимикачем і в роботі не розглядається.

Початкові умови для математичної моделі (2.25) визначаються параметрами, що характеризують роботу електровоза на природній швидкісній характеристиці: номінальний струм для тягових електродвигунів

дорівнює $I_H = 565$ А, кутова швидкість обертання вала ТЕД при даному їх з'єднанні – $\omega_{\text{ДВ}} = 19,22 \text{ с}^{-1}$ (додаток Д.1).

Повний розрахунок системи рівнянь (2.25) для різних варіантів виникнення короткого замикання в силовому колі електровоза ДЕ1 виконано за допомогою ПЕОМ та наведено в додатку Е.1.

Швидкість зростання струму di/dt для всіх випадків КЗ знайдено за методом, що запропонований в п. 2.1. Значення струму короткого замикання $I_{\text{КЗ}}$ виміряно за час 0,6 с після виникнення аварійного режиму.

Для прикладу на рис. 2.11 наведені криві залежності струму КЗ від часу при різних варіантах виникнення короткого замикання.

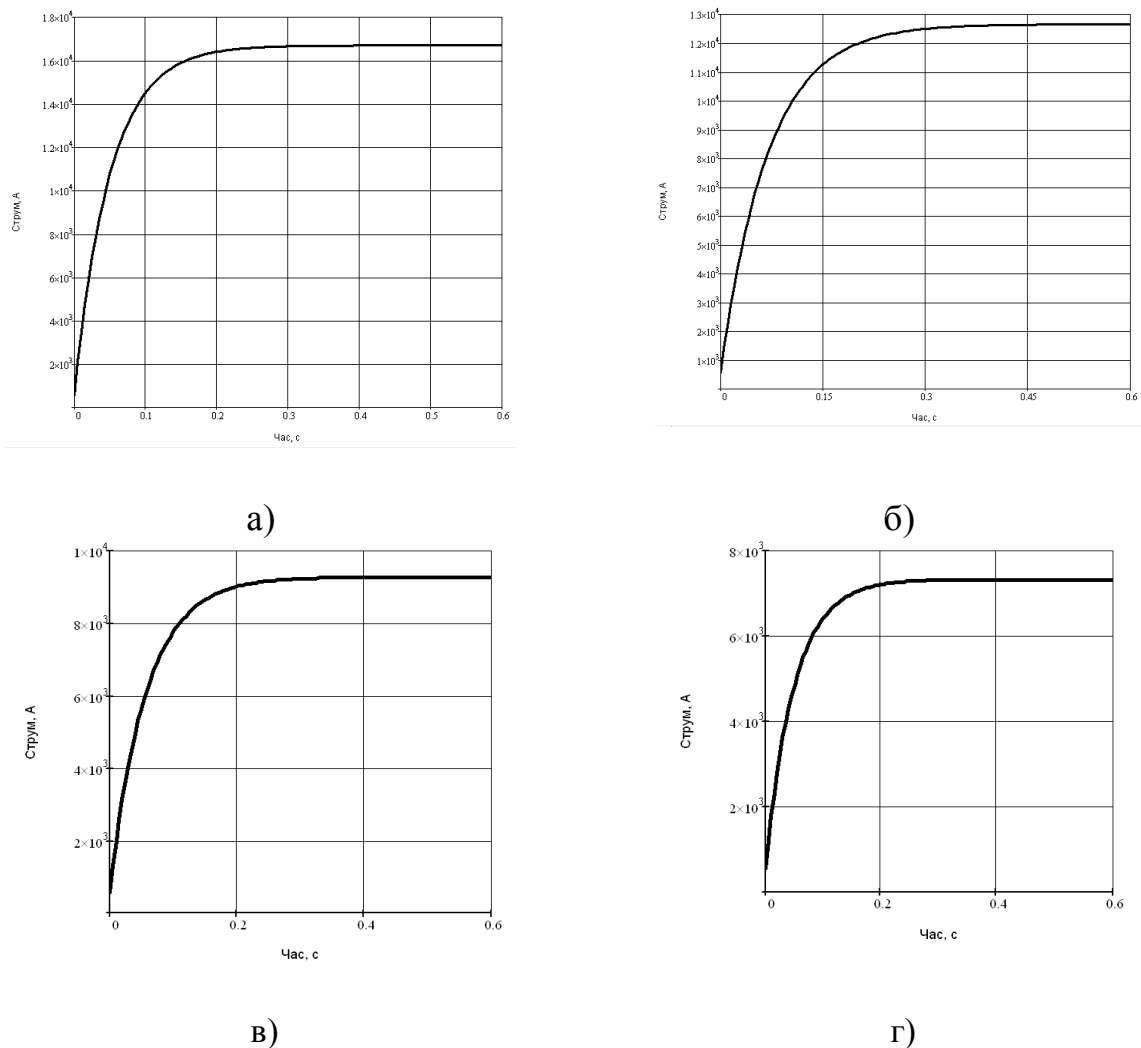


Рис. 2.12. Залежність струму КЗ від часу при «С» з'єднанні тягових двигунів

ЕД-141У1, напрузі мережі 3000 В і різних варіантах виникнення КЗ

На рис. 2.12:

- а) 1-й варіант (точка 3 на схемі рис. 1.1) – в колі з'являється обмотка збудження першого ТЕД (додаток Е.1.3);
- б) 2-й варіант (точка 4 на схемі рис. 1.1) (додаток Е.1.4);
- в) 3-й варіант (точка 5 на схемі рис. 1.1) (додаток Е.1.5);
- г) 4-й варіант (точка 6 на схемі рис. 1.1) (додаток Е.1.6).

Результати досліджень значень струмів короткого замикання та швидкості зміни струму з допомогою математичної моделі (2.25) для різних варіантів виникнення короткого замикання за умови послідовного з'єднання ТЕД представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Результати досліджень при «С» з'єднанні ТЕД

Варіант виникнення КЗ у колі (точки КЗ на схемі рис. 1.1)	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}, \text{А}$	$di/dt, \text{А/с}$
3	16800	308000
4	12700	170000
5	9300	150000
6	7360	131000
7	5850	86000
8	4600	57000
9	3880	53000
10	3350	50000
11	2600	32000
12	1900	19000
13	1700	18000
14	1510	17000
15	1000	7000

З рис. 2.11 та табл. 2.2 видно, що найбільш важким варіантом КЗ є перший (рис. 2.11 а), при якому значення струму дорівнює 16800 А, а

швидкість зростання струму – $\frac{di}{dt} = \frac{I_{\text{кз}} - I_{\text{ном}}}{t_{\text{кз}}}$, де $I_{\text{кз}}$ – значення струму короткого замикання при 0,6 с. $\frac{di}{dt} = \frac{595,8 - 565}{0,0001} = 308000 \text{ А/с}$ (додаток Е.1.3).

При введенні в коло еквівалентного опору обмотки збудження другого ТЕД (рис. 2.11 б) струм КЗ зменшується майже наполовину $I_{\text{кз}} = 12700 \text{ А}$,

а $\frac{di}{dt} = \frac{582 - 565}{0,0001} = 170000 \text{ А/с}$ (додаток Е.1.4). При введенні в коло

еквівалентного опору обмотки якоря третього ТЕД (рис. 2.11 в) значення струму короткого замикання зменшується до 9300 А, що відповідає реальним процесам. Також зменшується і швидкість зростання струму:

$\frac{di}{dt} = \frac{580 - 565}{0,0001} = 150000 \text{ А/с}$ (додаток Е.1.5). У разі четвертого варіанту КЗ

(рис. 2.11 г): $I_{\text{кз}} = 7360 \text{ А}$, $\frac{di}{dt} = \frac{578,1 - 565}{0,0001} = 131000 \text{ А/с}$ (додаток Е.1.6).

За рис. 2.12 та системою рівнянь (2.25) виконано дослідження перехідних процесів при короткому замиканні у разі послідовно-паралельного з'єднання ТЕД ЕД-141У1.

При всіх варіантах схем з'єднання номінальні струми та напруги залишаються однаковими. Змінюється значення кутової швидкості $\omega_{\text{дв}}$. У даному випадку $\omega_{\text{дв}} = 41,63 \text{ с}^{-1}$ (додаток Д.1) [17].

Результати дослідження за математичною моделлю (2.25) для послідовно-паралельного з'єднання ТЕД наведено в додатку Е.2.

Оскільки параметри всіх тягових електродвигунів прийняті абсолютно однаковими, то для прикладу розглянуто перехідні електромагнітні процеси тільки в одній паралельній вітці «СП» з'єднання. За умови «СП» з'єднання немає потреби розглядати КЗ в точці 8 (рис. 2.12), бо її електричний потенціал дорівнює потенціалу землі.

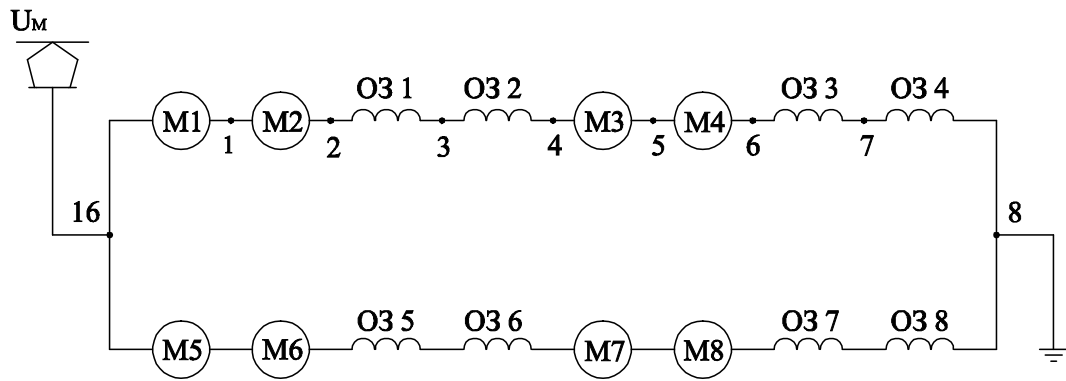


Рис. 2.12. Варіанти виникнення короткого замикання за умови послідовно-паралельного з'єднання ТЕД восьмивісного електровоза

Результати занесені до табл. 2.3.

Таблиця 2.3

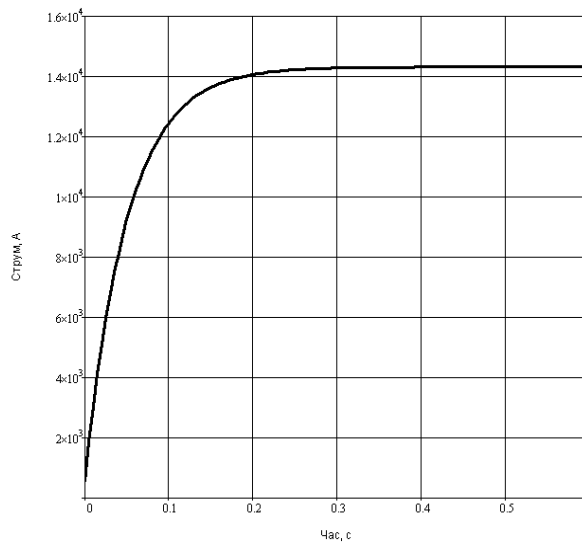
Результати досліджень при «СП» з'єднанні ТЕД

Варіант виникнення КЗ у колі (точки КЗ на схемі рис. 2.12)	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}, \text{А}$	$di/dt, \text{А/с}$
3	14400	264000
4	8600	114000
5	6300	98000
6	5000	86000
7	2550	35000

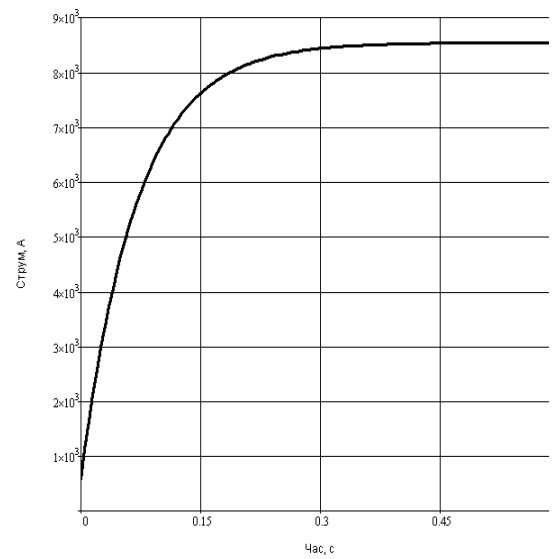
На рис. 2.13 показані, як приклад, криві залежності струму КЗ від часу при «СП» з'єднанні ТЕД та при виникненні чотирьох варіантів короткого замикання (точки 1-4 на рис. 2.12) в силовому колі електровоза ДЕ 1 (додаток Е.2).

На рис. 2.13:

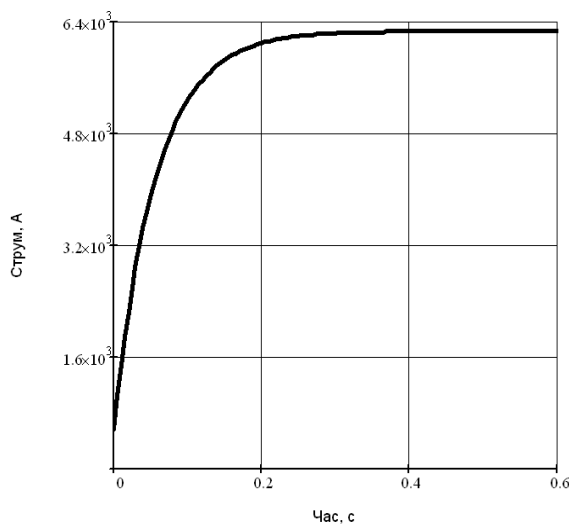
- а) 1-й варіант (точка 3 на схемі рис. 2.12);
- б) 2-й варіант (точка 4 на схемі рис. 2.12);
- в) 3-й варіант (точка 5 на схемі рис. 2.12);
- г) 4-й варіант (точка 6 на схемі рис. 2.12).



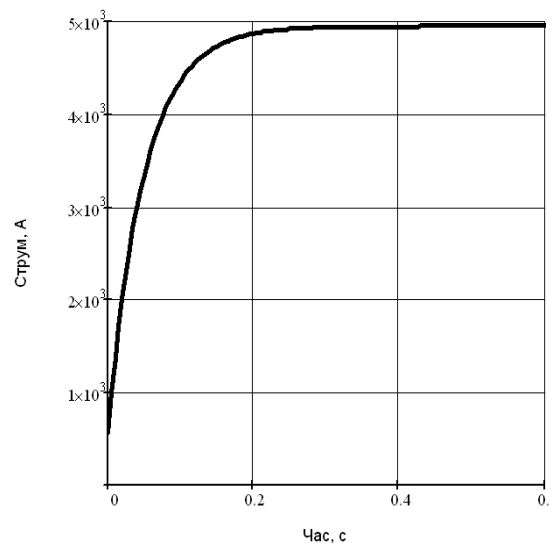
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.13. Залежність струму КЗ від часу при «СП» з'єднанні тягових двигунів

ЕД-141У1, напрузі мережі 3000 В і різних варіантах виникнення КЗ

В порівнянні з рис. 2.11 на рис. 2.13 при всіх варіантах короткого замикання значення струму КЗ зменшуються. Зменшуються і швидкості зростання струмів КЗ. Це пов'язане з тим, що лінійна швидкість руху електровоза і відповідно кутова швидкість руху тягових електродвигунів при «СП» з'єднанні збільшуються.

За математичною моделлю (2.25) виконано дослідження для паралельного з'єднання ТЕД ЕД-141У1 при повному збудженні (рис. 2.14). Початкові умови залишаються з попереднього розрахунку для «С» з'єднання ТЕД, а кутову швидкість обертання вала електродвигунів знайдено за швидкісною природною характеристикою при «П» з'єднанні $\omega_{\text{дв}} = 97 \text{ с}^{-1}$ (додаток Д.1).

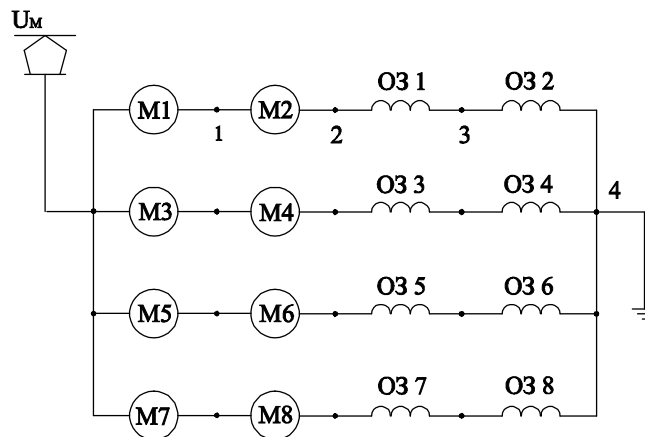


Рис. 2.14. Варіанти виникнення короткого замикання при паралельному з'єднанні ТЕД восьмивісного електровоза

Результати дослідження за математичною моделлю (2.25) для однієї з віток паралельного з'єднання ТЕД наведені в додатку Е.3.

На рис. 2.15 показана крива залежності струму КЗ від часу при «П» з'єднанні ТЕД та при виникненні короткого замикання в силовому колі електровоза (точка 3 на схемі рис. 2.14). При такому з'єднанні немає потреби розглядати КЗ в точці 4 (рис. 2.14) так як її електричний потенціал дорівнює потенціалу землі. Дослідження для трьох інших віток паралельного з'єднання тягових електродвигунів не проводилося, так як результат буде однаковий порівняно з першою гілкою, враховуючи те, що параметри всіх тягових електродвигунів однакові.

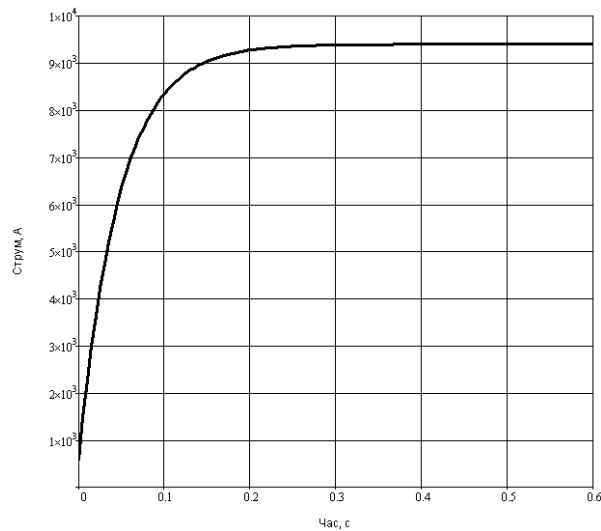


Рис. 2.15. Залежність струму КЗ від часу при «П» з'єднанні ТЕД

На рис. 2.15 показана крива залежності аварійного струму від часу (точка 3 на схемі рис. 2.14) при паралельному з'єднанні тягових електродвигунів, коли в колі з'являється обмотка збудження першого ТЕД (додаток Е.3.3).

Таблиця 2.4

Результати досліджень при «П» з'єднанні ТЕД

Варіант виникнення КЗ у колі при повному збудженні (точки КЗ на схемі рис. 2.14)	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}, \text{А}$	$\frac{di}{dt}, \text{А/с}$
3	9450	181000

Для збільшення швидкості електровозу паралельно обмотці збудження ТЕД вмикають резистор та індуктивний шунт, що приводить до відгалуження частини струму якоря у коло резистора та індуктивного шунта. Це приводить до ослаблення збудження.

На рис. 2.16:

$I_{\text{ш}}$ – струм у колі шунтування;

$I_{\text{оз}}$ – струм у колі обмоток збудження;

$R_{\text{ш}}$ – шунтувальний резистор у колі обмоток збудження;

ІІІ – індуктивний шунт.

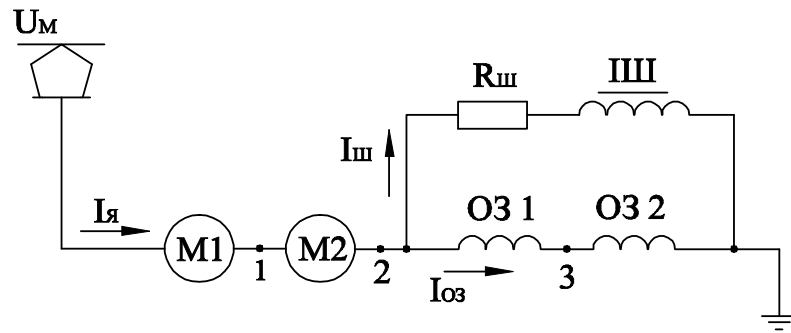


Рис. 2.16. Схема ослаблення збудження однієї вітки тягових електродвигунів при їх паралельному з'єднанні

Відношення струму в обмотках збудження I_{O3} , коли вони шунтуються резистором та індуктивним шунтом, до повного струму $I_{я}$ визначає ступінь збудження тягового електродвигуна [71, 73]:

$$\beta = \frac{I_{O3}}{I_{я}}. \quad (2.26)$$

У цьому випадку математична модель (2.25) прийме вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dI_{я}}{dt} = \frac{U_M - n_{ДВ} \cdot c_e \cdot \Phi \cdot \omega_{ДВ} - n_{ДВ} \cdot (R_{ЕКВ} + R_{O3}) \cdot I_{я}}{n_{ДВ} \cdot (L_{ЕКВ} + L_{O3})}, \\ L_{ш} \frac{dI}{dt} = U_{ш} - R_{ш} \cdot I_{ш}; \\ c_e \Phi = f(I_{O3}), \end{cases} \quad (2.27)$$

де $L_{ш}$ – індуктивність шунта;

$R_{ш}$ – активний опір ІІІ;

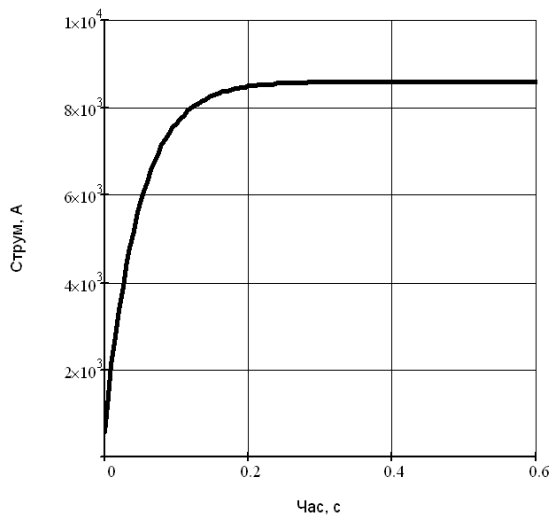
$U_{ш}$ – напруга, що прикладена до шунтувального кола.

Кутова швидкість обертання вала ТЕД при паралельному їх з'єднанні з різним ступенем ослаблення збудження визначено зі швидкісних характеристик при номінальному струмі 565 А (додаток Д.1).

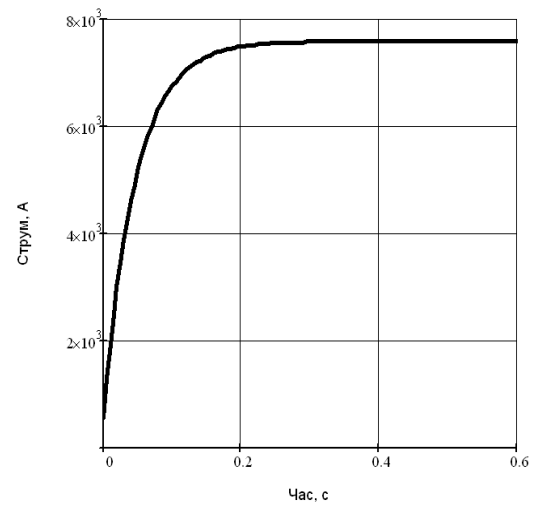
Дослідження за математичною моделлю (2.27), що не враховує вихрові струми та динамічну індуктивність, наведені в додатку Е.3.

На рис. 2.17 представлені залежності струму КЗ від часу при короткому замиканні (в колі дві еквівалентні обмотки якоря першого ТЕД) (точка 3 на рис. 2.16) при з'єднанні тягових електродвигунів «П» та напрузі контактної мережі 3000В при різних ступенях ослаблення збудження.

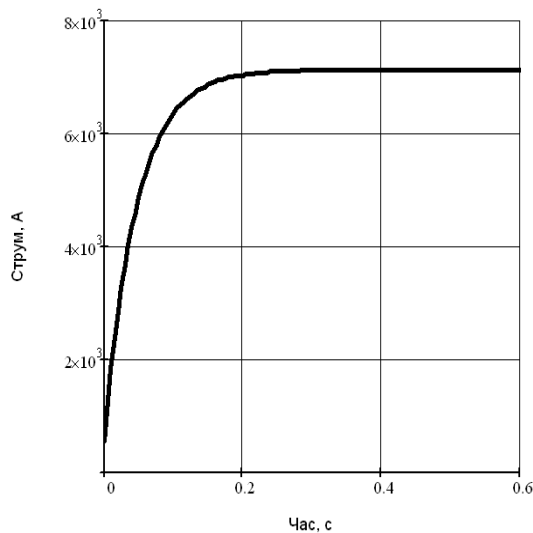
Тягові електродвигуни ЕД-141У1 мають чотири ступені ослаблення збудження.



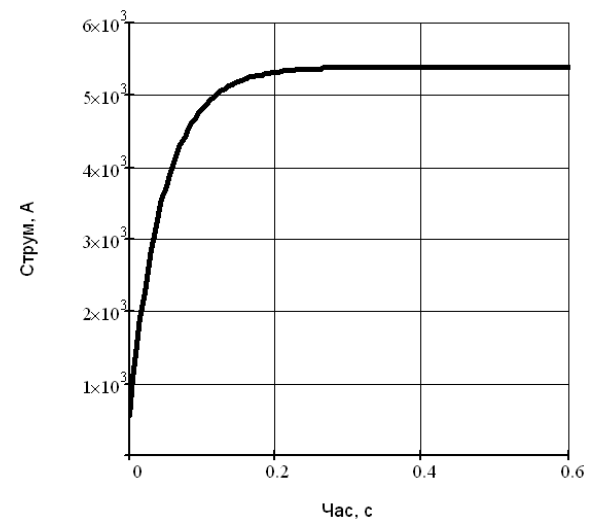
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.17. Залежність струму КЗ від часу при «П» з'єднанні тягових електродвигунів та при всіх ступенях ослаблення збудження

На рис. 2.17 показані залежності струму короткого замикання при різних ступенях ослаблення:

- а) рис. 2.17 а – для ослаблення збудження $\beta = 78 \%$;
- б) рис. 2.17 б – для ослаблення збудження $\beta = 65 \%$;
- в) рис. 2.17 в – для ослаблення збудження $\beta = 57 \%$;
- г) рис. 2.17 г – для ослаблення збудження $\beta = 43 \%$.

При порівнянні кривих $I_{\text{кз}} = f(t)$ рис. 2.15 та 2.17 видно, що значення струму КЗ зменшується при ослабленні збудження. Також зменшується і швидкість зростання струму.

Так при повному збудженні значення струму короткого замикання $I_{\text{кз}} = 9450 \text{ А}$, швидкість зростання струму $\frac{di}{dt} = \frac{583,1 - 565}{0,0001} = 181000 \text{ А/с}$ (рис. 2.15 а) (додаток Е.3); при першій ступені ослаблення збудження: $I_{\text{кз}} = 8610 \text{ А}$, $\frac{di}{dt} = \frac{581,5 - 565}{0,0001} = 165000 \text{ А/с}$ (рис. 2.17 а) (додаток Е.3).

Результати досліджень занесені до табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Результати досліджень при режимі ослаблення збудження

Варіант виникнення КЗ у колі (точки КЗ на схемі рис. 2.16)	Ступінь ослаблення збудження	Значення струму КЗ $I_{\text{кз}}, \text{ А}$	$\frac{di}{dt}, \text{ А/с}$
3	$\beta = 78 \%$	8610	165000
3	$\beta = 65 \%$	7620	146000
3	$\beta = 57 \%$	7160	137000
3	$\beta = 43 \%$	5400	104000

Значення струму короткого замикання знайдено за рис. 2.17 за проміжок часу 0,6 с як і при послідовному з'єднанні.

Швидкість зростання струму на початку виникнення КЗ знайдено за методом, що запропонований в п. 2.1.

Аналіз результатів досліджень перехідних процесів при короткому замиканні в силовому колі електровоза постійного струму показує, що на

швидкість зростання струму короткого замикання та його значення за час 0,6 с впливають як з'єднання ТЕД так і ступінь ослаблення збудження.

Для більш точного аналізу перехідних процесів при короткому замиканні потрібно враховувати дії вихрових струмів та динамічної індуктивності, що виконано нижче.

2.2.2. З врахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності

Відомо, що при нестационарних струмових режимах в сталевих ділянках магнітного кола тягових електричних машин виникають вихрові струми. Під дією цих струмів зростання магнітного потоку сповільнюється відносно зростання струму [55, 74, 75].

Математичну модель (2.25) в даному випадку доповнено рівняннями, які відображають вплив вихрових струмів у магнітопроводі ТЕД на магнітний потік головних полюсів. В роботі враховано лише основні хвилі вихрових струмів та потоку, вищі гармоніки потоку та вихрових струмів враховані сумарно [42, 43].

Початкові умови прийняті ті ж самі, що використані для попереднього випадку, коли вихрові струми не враховуються. На рис. 2.18 для прикладу показана апроксимація кривої намагнічування тягового електродвигуна ЕД-141У1 з урахуванням вихрових струмів.

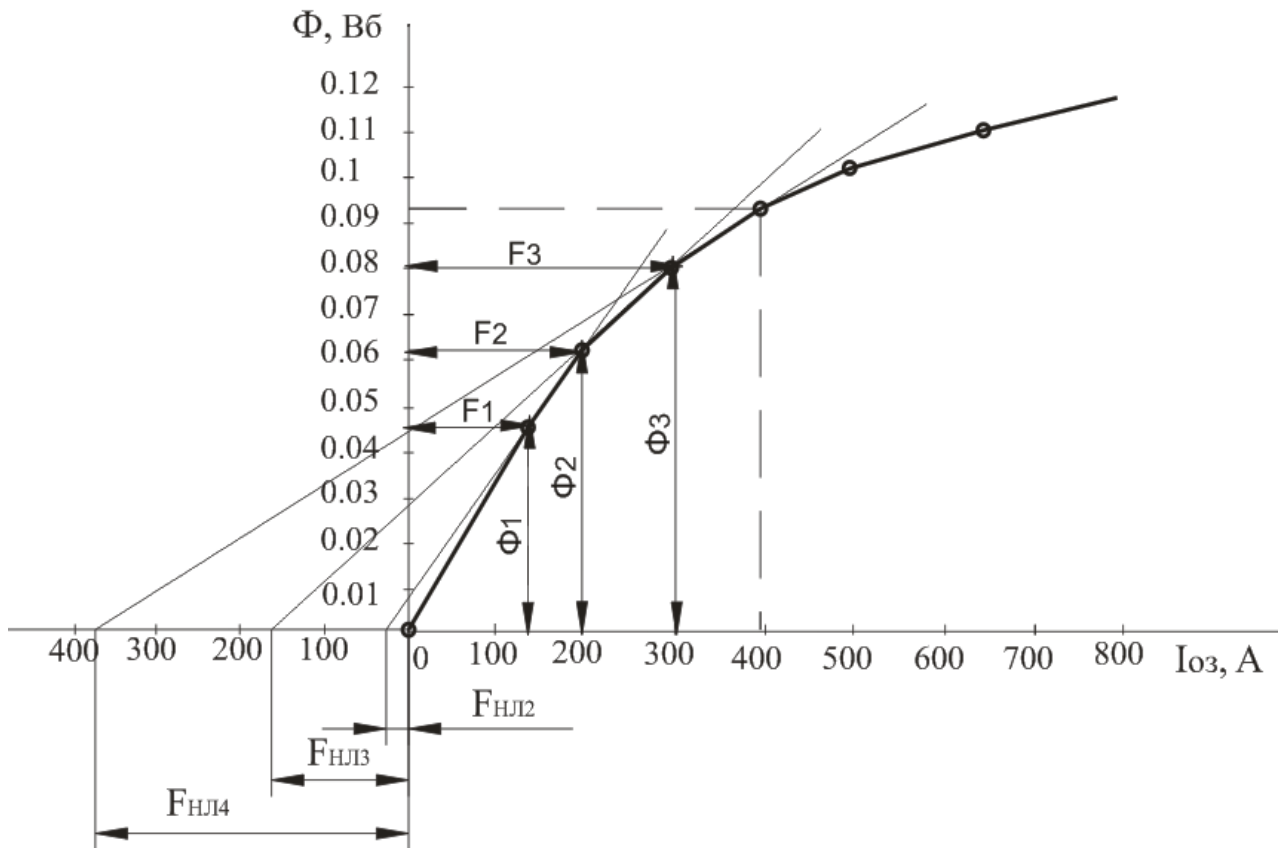


Рис. 2.18. Апроксимація кривої намагнічування двигуна ЕД-141У1 з урахуванням вихрових струмів

Крива намагнічування поділена на ділянки.

Диференціальний магнітний опір на кожній ділянці апроксимованої характеристики знаходиться як [43]:

$$R_{mi} = \frac{dF}{d\Phi}, \quad (2.28)$$

де $F = I_{oz} \cdot w_{oz}$ – намагнічуюча сила збудження головного полюса, А.

Алгоритм апроксимації для кожної ділянки характеристики намагнічування (рис. 2.18) наведено нижче.

Диференціальний магнітний опір для першої ділянки характеристики знаходиться за (2.27):

$$R_{m1} = \frac{I_{oz1} \cdot w_{oz}}{\Phi_1}, \quad R_{m1} = \frac{140 \cdot 16}{0,045} = 49777,8 \text{ Гн}^{-1}.$$

Рівняння R_m для другої ділянки характеристики:

$$R_{m2} = \frac{F_2 - F_1}{\Phi_2 - \Phi_1}, \quad R_{m2} = \frac{(200 - 140) \cdot 16}{0,062 - 0,045} = 56740 \text{ Гн}^{-1}.$$

Намагнічуюча сила, що враховує нелінійність магнітної характеристики полюсів для i -ї ділянки, геометрично представляє собою відрізки, які відсікаються на від'ємній напіввісі абсцис дотичними до кожної ділянки $F_{\text{нлі}} = I_{\text{нлі}} \cdot w_{\text{оз}}$ (рис. 2.18).

Визначити $F_{\text{нл}}$ можна також за наступною формулою:

$$F_{\text{нлі}} = \Phi_i \cdot R_{mi} - F_i. \quad (2.28)$$

$$F_{\text{нл}2} = \Phi_2 \cdot R_{m2} - F_2, \quad F_{\text{нл}2} = 0,062 \cdot 56740 - 200 \cdot 16 = 301.$$

$$\text{або } F_{\text{нл}2} = I_{\text{нл}2} \cdot w_{\text{оз}}, \quad F_{\text{нл}2} = 20 \cdot 16 = 320.$$

Різниця між знайденим значенням $F_{\text{нл}}$ графічно та за формулою (2.28) незначна: $\frac{320 - 301}{320} \cdot 100 = 5,9\%$, тому надалі для інших ділянок характеристики це значення визначено графічно.

$$3 \text{ ділянка: } R_{m3} = \frac{F_{\text{нл}3} + I_3 \cdot w}{\Phi_3}, \quad R_{m3} = \frac{160 \cdot 16 + 300 \cdot 16}{0,08} = 92000 \text{ Гн}^{-1}.$$

$$4 \text{ ділянка: } R_{m4} = \frac{F_{\text{нл}4} + I_4 \cdot w}{\Phi_4}, \quad R_{m4} = \frac{375 \cdot 16 + 400 \cdot 16}{0,093} = 133333,3 \text{ Гн}^{-1}.$$

$$5 \text{ ділянка: } R_{m5} = \frac{F_{\text{нл}5} + I_5 \cdot w}{\Phi_5}, \quad R_{m5} = \frac{900 \cdot 16 + 500 \cdot 16}{0,1} = 224000 \text{ Гн}^{-1}.$$

$$6 \text{ ділянка: } R_{m6} = \frac{F_{\text{нл}6} + I_6 \cdot w}{\Phi_6}, \quad R_{m6} = \frac{1600 \cdot 16 + 650 \cdot 16}{0,11} = 327272,7 \text{ Гн}^{-1}.$$

$$7 \text{ ділянка: } R_{m7} = \frac{F_{\text{нл}7} + I_7 \cdot w}{\Phi_7} \quad R_{m7} = \frac{2180 \cdot 16 + 800 \cdot 16}{0,117} = 407521,4 \text{ Гн}^{-1}.$$

Алгоритм врахування дії вихрових струмів [43]:

1) магнітний опір основної хвилі потоку:

$$R = \frac{(2k+1)^2 \cdot \pi^2}{8} \cdot R_{m1} \approx 1,23 \cdot R_{m1}; \quad (2.30)$$

2) магнітний опір вищим гармонікам потоку:

$$R_{\text{вг}} = \frac{R_{m1}}{1 - \frac{8}{\pi^2}} \approx 5,29 \cdot R_{m1}; \quad (2.31)$$

3) магніторушійна сила (МРС) вихрових струмів F_0 , що індукується в осерді і яка відповідає основній хвилі потоку:

$$F_0 = -g_\mu \cdot \frac{d\Phi_{0\text{дп}}}{dt}, \quad (2.32)$$

де $\Phi_{0\text{дп}}$ – основна хвиля корисного потоку додаткового полюса, [Вб];

g_μ – магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку, яка відіграє по відношенню до магнітного потоку таку ж роль, як індуктивність по відношенню до електричного струму, [См];

4) магніторушійна сила вихрових струмів для кожної вищої гармоніки:

$$F_{\text{вг}} = -0,477 \cdot g_\mu \cdot \frac{d\Phi_{\text{вг}}}{dt}, \quad (2.33)$$

де $\Phi_{\text{вг}}$ – магнітний потік вищих гармонік, [Вб].

Магнітна індуктивність основної хвилі потоку з масивним корпусом та масивними полюсами розраховується як:

$$g_{\mu} = \frac{\gamma \cdot h_j \cdot l_j}{16 \cdot a_j} + \frac{\gamma_1 \cdot a_p \cdot e_p \cdot l_p}{8 \cdot (a_p^2 + e^2)}, \quad (2.34)$$

де h_j , a_j , l_j – висота, повздовжня довжина та довжина магнітної лінії на один полюс в остові відповідно, [см];

γ – електрична провідність сталі остова, [1/Ом·м];

a_p , e_p , l_p – ширина, довжина та висота полюса відповідно, [см];

γ_1 – електрична провідність сталі полюса, [1/Ом·м];

Диференційні рівняння процесу зростання потоку на ділянці магнітної характеристики кола головних полюсів з диференційним опором R_{mi} будуть:

– з урахуванням основної гармоніки

$$1,23R_{m1}\Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{oz} \cdot I_{oz} + F_{нли}, \quad (2.35)$$

де $1,23R_{m1}$ – магнітний опір основній хвилі потоку;

Φ , Φ_1 – магнітний потік головних полюсів і його основна гармоніка відповідно;

R_{m1} , R_{mi} – еквівалентні магнітні опори першої та i -ї ділянки магнітної характеристики ГП;

$w_{oz} \cdot I_{oz}$ – магніторушійна сила збудження головних полюсів;

$F_{нли}$ – частина магніторушійної сили i -ї ділянки магнітної характеристики ГП, що створює магнітний потік головних полюсів.

– з сумарним урахуванням усіх вищих гармонік

$$5,29R_{m1}\Phi_{\Sigma} + 0,477g_{\mu} \frac{d\Phi_{\Sigma}}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{oz} \cdot I_{oz} + F_{нли}, \quad (2.36)$$

де $5,29R_{m1}$ – магнітний опір вищим гармонікам потоку;

$\Phi_{\Sigma} = (\Phi - \Phi_1)$ – сумарний магнітний потік вищих гармонік головних полюсів.

Рівняння (2.34) та (2.35) відображають залежність $c_e \Phi = f(I_{o3})$ з урахуванням дії вихрових струмів (потоків) як основних гармонік так і сумарної дії усіх вищих гармонік.

Дія реакції якоря при аварійних перехідних процесах враховується за допомогою еквівалентної кількості витків обмотки головних полюсів $w_{\text{екв}}$ [52, 76, 77]:

$$w_{\text{екв}} = w - w_{\text{ря}}(1 - V_{\text{ко}}), \quad (2.37)$$

де $w_{\text{ря}}$ – число витків обмотки якоря, віднесене до одного головного полюса

$$w_{\text{ря}} = \frac{k_p \cdot N}{8 \cdot a \cdot p};$$

$V_{\text{ко}}$ – степінь компенсації магніторушійної сили якоря $V_{\text{ко}} = \frac{F_{\text{ко}}}{F_{\text{ря}}}$,

де $F_{\text{ко}}$ – МРС компенсаційної обмотки;

$F_{\text{ря}}$ – МРС реакції якоря.

При використанні першого рівняння з математичної моделі (2.25) та рівнянь, які відображають вплив вихрових струмів у магнітопроводі тягових електродвигунів на магнітний потік головних полюсів (2.35), (2.36), отримано математичну модель (2.38) для дослідження перехідних процесів з урахуванням дії вихрових струмів при будь-якому варіанті виникнення короткого замикання в силовому колі електровозу постійного струму.

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_{\text{м}} - n_{\text{дв}} \cdot c_{\text{е}} \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - n_{\text{дв}} \cdot (R_{\text{екв}} + R_{\text{оз}}) \cdot I_{\text{я}}}{n_{\text{дв}} \cdot (L_{\text{екв}} + L_{\text{оз}})}, \\ 1,23R_{m1}\Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{оз}} + F_{\text{нлi}}; \\ 5,29R_{m1}\Phi_{\Sigma} + 0,477g_{\mu} \frac{d\Phi_{\Sigma}}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{оз}} + F_{\text{нлi}}, \end{cases} \quad (2.38)$$

Повний розрахунок перехідного процесу при короткому замиканні в послідовному колі ТЕД з врахуванням вихрових струмів але без урахування динамічної індуктивності ОЗ головних полюсів за системою диференціальних рівнянь (2.38) проведено з допомогою ПЕОМ [78-80] (додаток Ж).

Під динамічною індуктивністю обмотки збудження головних полюсів розуміється індуктивність цієї обмотки з урахуванням динаміки зміни струму збудження в режимі короткого замикання.

Щоб врахувати дію динамічної індуктивності в перше рівняння моделі (2.38) введено вираз для $L_{\text{оз}}$ відповідно формули (2.8). Після відповідних перетворень отримано математичну модель для дослідження перехідних процесів при врахуванні як вихрових струмів так і динамічної індуктивності у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_{\text{м}} - n_{\text{дв}} \cdot c_{\text{е}} \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - n_{\text{дв}} \cdot (R_{\text{екв}} + R_{\text{оз}}) \cdot I_{\text{я}}}{n_{\text{дв}} \cdot (L_{\text{екв}} + 2 \cdot p \cdot w_{\text{оз}} \cdot (\sigma - 1) \cdot \frac{d\Phi}{dI_{\text{я}}})}, \\ 1,23R_{m1}\Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{оз}} + F_{\text{нлi}}; \\ 5,29R_{m1}\Phi_{\Sigma} + 0,477g_{\mu} \frac{d\Phi_{\Sigma}}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{оз}} + F_{\text{нлi}}. \end{cases} \quad (2.39)$$

Дослідження перехідного процесу при короткому замиканні в колі тягових електродвигунів за системою диференціальних рівнянь (2.38) наведено в додатку 3.

В табл. 2.6 занесені для порівняння результати досліджень за (2.38) та (2.39) при послідовному з'єднанні ТЕД та різних умовах виникнення КЗ (з урахуванням дії вихрових струмів, але без динамічної індуктивності та з урахуванням дії як вихрових струмів так і динамічної індуктивності).

Таблиця 2.6

**Результати досліджень при «С» з'єднанні ТЕД (ЕД-141У1) та
напрузі мережі 3000 В**

Варіант виникнення короткого замикання (точки КЗ на схемі рис. 1.1)	З урахуванням вихрових струмів, але без динамічної індуктивності		З урахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності	
	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}, \text{A}$	$di/dt, \text{A/c}$	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}, \text{A}$	$di/dt, \text{A/c}$
3	17200	324000	16000	384000
4	12000	176000	12300	234000
5	9000	154000	9270	203000
6	7200	137000	7340	180000
7	5800	90000	5950	134000
8	4660	60000	4800	106000
9	4000	55000	4080	98000
10	3500	50000	3350	91000
11	2800	33000	2600	76000
12	2190	21000	2150	64000
13	1980	20000	1960	60000
14	1790	17000	1770	57000
15	1350	8000	1330	50000

Значення струму КЗ визначено через час 0,6 с після початку короткого замикання. У перших двох випадках КЗ (точки 1 та 2 на рис. 1.1) цей струм буде однакою величини. Величина di/dt в цих же випадках теж однакою, тому що в колі КЗ немає жодної обмотки збудження. Далі, коли в колі з'являється індуктивність обмоток збудження, значення di/dt у випадку

розрахунку з вихровими струмами та динамічної індуктивності збільшуються в порівнянні з випадком, коли динамічна індуктивність не враховується.

Зростання струму відбувається тим інтенсивніше, чим менше індуктивність кола короткого замикання [72]. Тому для підвищення точності при дослідженні перехідних процесів прийнято врахувати динамічний характер індуктивності.

Для дослідження перехідних процесів при аварійному режимі та раціонального вибору уставки для налагодження захисного пристрою далі в роботі використано математичну модель з урахуванням як вихрових струмів, так і динамічної індуктивності, як найбільш такої, що повно описує реальні фізичні процеси в силових колах ЕРС постійного струму в режимі короткого замикання.

З допомогою математичної моделі (2.39) нижче знайдено значення струму короткого замикання при 0,6 с та швидкості його зростання для тягових електродвигунів ЕД-141У1 та НБ-406Б [17, 20]. Відмічено, що $L_{\text{екв}} = 0,016$ Гн та $L_{\text{оз}} = 0,0073$ Гн для тягового електродвигуна НБ-406Б суттєво більші, ніж для ЕД-141У1 ($L_{\text{екв}} = 0,00156$ Гн та $L_{\text{оз}} = 0,0049$ Гн).

Дослідження перехідних процесів для «С», «СП», «П» з'єднання ТЕД при різних варіантах виникнення короткого замикання та при напрузі контактної мережі 3000 В проведено за допомогою ПЕОМ (додаток 3, И).

Результати визначення значень струмів короткого замикання та швидкості зміни струму представлені в табл. 2.7 (при послідовному та послідовно-паралельному з'єднанні ТЕД) та в табл. 2.8 (при паралельному з'єднанні ТЕД).

Таблиця 2.7

**Результати досліджень при «С» та «СП» з'єднаннях ТЕД та
напрузі мережі 3000 В**

Варіанти виникнення короткого замикання	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с
	ЕД-141У1		НБ-406Б	
Точки КЗ на схемі рис. 1.1	«С»з'єднання ТЕД			
3	17200	384000	10340	81000
4	12000	234000	7500	74000
5	9000	203000	5760	54000
6	7200	180000	4700	43000
7	5800	134000	3710	42000
8	4660	106000	2930	41000
9	4000	98000	2550	35000
10	3500	91000	2280	32000
11	2800	76000	1810	31000
12	2190	64000	1410	30000
13	1960	60000	1290	27000
14	1770	57000	1180	26000
15	1330	50000	905	25000
Точки КЗ на схемі рис. 2.12	«СП»з'єднання ТЕД			
3	12870	333000	8810	68000
4	7880	171000	5040	60000
5	6030	148000	3930	41000
6	4870	130000	3235	33000
7	2970	78000	1790	30000

Таблиця 2.8

Результати досліджень при «П» з'єднанні ТЕД та напрузі мережі 3000 В

Точки КЗ на схемі рис. 2.14, 2.16	Ступінь ослаблення збудження	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с	Ступінь ослаблення збудження	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с
	ЕД-141У1			НБ-406Б		
3	$\beta = 100\%$	7870	230000	$\beta = 100\%$	6350	52000
3	$\beta = 78\%$	7200	214000	$\beta = 75\%$	5780	48000
3	$\beta = 65\%$	6370	193000	$\beta = 55\%$	5030	42000
3	$\beta = 57\%$	6010	183000	$\beta = 43\%$	4320	37000
3	$\beta = 43\%$	4770	147000	$\beta = 36\%$	3320	28000

Менші значення $I_{\text{КЗ}}$ та менші значення di/dt для тягового електродвигуна НБ-406Б пояснюються більшими значеннями $L_{\text{екв}}$ та $L_{\text{оз}}$ цього ТЕД порівняно з тяговим електродвигуном ЕД-141У1.

При зміні напруги в контактній мережі змінюються лінійна швидкість руху і струм електрорухомого складу. Якщо відома природна швидкісна характеристика ТЕД з $\omega_{\text{ном}}$ при номінальній напрузі контактної мережі $U_{\text{ном}} = 3000$ В, можна знайти відповідну швидкість при будь-якому іншому значенні напруги U_i [55, 70]. Значення струму при цьому прийнято постійним.

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}} R}{c\Phi} \approx \frac{U_{\text{ном}}}{c_e \Phi}, \quad (2.40)$$

$$\omega_i = \frac{U_i - I_{\text{я.ном}}(R_{\text{екв}} + R_{\text{оз}})}{c\Phi} \approx \frac{U_i}{c_e \Phi}. \quad (2.41)$$

У формулах (2.40) та (2.41) значенням $I_{\text{я.ном}} R$ можна знехтувати за причиною їх незначного значення.

Тоді швидкість при напрузі U_i можна знайти за формулою:

$$\omega_i = \frac{U_i}{U_{\text{НОМ}}} \cdot \omega_{\text{НОМ}}, \quad (2.42)$$

де $U_{\text{НОМ}}$ – номінальна напруга в контактній мережі;

$\omega_{\text{НОМ}}$ – номінальна швидкість обертання при струмі $I_{\text{я}}$, що відповідає напрузі $U_{\text{НОМ}}$;

U_i – інша напруга в контактній мережі;

ω_i – швидкість обертання при струмі $I_{\text{я}}$, що відповідає напрузі U_i .

Відповідні розрахунки $\omega_{\text{ДВ}}$ при напрузі контактної мережі 4000 В та 2200 В для з'єднань тягових електродвигунів «С», «СП» та «П» наведені в додатку Д.

Дослідження перехідних процесів за математичною моделлю (2.39) при всіх з'єднаннях тягових електродвигунів типу ЕД-141У та НБ-406Б в режимі короткого замикання та напрузі контактної мережі 2200 В представлені у додатках К та Л.

Результати досліджень наведені в табл. 2.9 а (при послідовному та послідовно-паралельному з'єднанні ТЕД) та табл. 2.10 (при паралельному з'єднанні ТЕД).

Таблиця 2.9

**Результати досліджень при «С» та «СП» з'єднаннях ТЕД та
напрузі мережі 2200 В**

Варіант виникнення короткого замикання	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с
	ЕД-141У1		НБ-406Б	
Точки КЗ на схемі рис. 1.1	«С»з'єднання ТЕД			
3	11860	286000	7630	63000
4	9010	180000	5520	60000
5	6680	156000	4250	44000
6	5330	137000	3440	36000
7	4330	106000	2740	35000
8	3490	86000	2140	34000

Продовж. табл. 2.9				
9	2980	80000	1870	31000
10	2600	74000	1660	27500
11	2100	63000	1200	27000
12	1640	56000	1030	26000
13	1460	52000	950	25000
14	1330	49000	870	23000
15	1000	45000	660	22000
Точки КЗ на схемі рис. 2.12	«СП»з'єднання ТЕД			
3	9900	250000	6500	50000
4	6200	134000	3750	47000
5	4600	116000	3000	35000
6	3700	101000	2400	27000
7	2250	64000	1340	25000

Таблиця 2.10

Результати досліджень при «П» з'єднанні ТЕД при напрузі мережі 2200 В

Точки КЗ на схемі рис. 2.14, 2.16	Ступінь ослаблення збудження	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с	Ступінь ослаблення збудження	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с
	ЕД-141У1			НБ-406Б		
3	$\beta = 100\%$	7000	176000	$\beta = 100\%$	4580	40000
3	$\beta = 78\%$	6310	162000	$\beta = 75\%$	4270	38000
3	$\beta = 65\%$	5600	147000	$\beta = 55\%$	3700	34000
3	$\beta = 57\%$	5200	140000	$\beta = 43\%$	3150	30000
3	$\beta = 43\%$	3950	113000	$\beta = 36\%$	2270	24000

При порівнянні значень $I_{\text{КЗ}}$ та di/dt з табл. 2.7, табл. 2.8 та табл. 2.9, табл. 2.10 видно, що при зменшенні напруги контактної мережі з 3000 В до 2200 В природно зменшуються усталені значення струмів короткого замикання, а також зменшуються швидкості їх зростання при відповідних з'єднаннях ТЕД, що пов'язано зі зменшенням кутової швидкості обертання ротора $\omega_{\text{ДВ}}$.

Дослідження перехідних процесів за (2.39) при всіх з'єднаннях тягових електродвигунів типу ЕД-141У та НБ-406Б в режимі КЗ та напрузі контактної мережі 4000 В представлені в додатках М та Н.

Результати досліджень наведені в табл. 2.11 та табл. 2.12.

Таблиця 2.11

**Результати досліджень при «С» та «СП» з'єднаннях ТЕД та
напрузі мережі 4000 В**

Варіант виникнення короткого замикання	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с
	ЕД-141У		НБ-406Б	
Точки КЗ на схемі рис. 1.1	«С»з'єднання ТЕД			
3	21100	507000	13600	103000
4	15340	302000	9820	91000
5	11600	263000	7600	67000
6	9300	233000	6200	53000
7	7480	170000	4910	50000
8	6000	131000	3880	48000
9	5140	121000	3400	40000
10	4500	113000	3000	35000
11	3620	90000	2410	34000
12	2840	75000	1880	33000
13	2550	70000	1730	30000
14	2340	67000	1590	27000
15	1740	56000	1200	26000
Точки КЗ на схемі рис. 2.12	«СП»з'єднання ТЕД			
3	16240	440000	11760	90000
4	9900	218000	6800	68000
5	7580	190000	5300	50000
6	6200	167000	4400	40000
7	3720	94000	2490	32000

Таблиця 2.12

Результати досліджень при «П» з'єднанні ТЕД та напрузі мережі 4000 В

Точки КЗ на схемі рис. 2.13, 2.15	Ступінь ослаблення збудження	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с	Ступінь ослаблення збудження	Значення струму КЗ $I_{\text{КЗ}}$, А	di/dt , А/с
	ЕД-141У			НБ-406Б		
3	$\beta = 100\%$	9300	304000	$\beta = 100\%$	8300	65000
3	$\beta = 78\%$	8330	280000	$\beta = 75\%$	7400	60000
3	$\beta = 65\%$	7340	250000	$\beta = 55\%$	6480	52000
3	$\beta = 57\%$	6870	238000	$\beta = 43\%$	5650	45000
3	$\beta = 43\%$	5350	190000	$\beta = 36\%$	4290	34000

При порівнянні значень $I_{\text{КЗ}}$ та di/dt з табл. 2.7, табл. 2.8 та табл. 2.11, табл. 2.12 видно, що при збільшенні напруги контактної мережі з 3000 В до 4000 В дещо збільшуються значення струмів короткого замикання за час 0,6 с та швидкості їх зростання при відповідних з'єднаннях ТЕД, що пов'язано зі збільшенням кутової швидкості обертання ротора $\omega_{\text{ДВ}}$.

Так при 3-му варіанті виникнення КЗ та напрузі контактної мережі 3000 В швидкість зростання струму дорівнює 384000 А/с, при цьому ж варіанті КЗ, але при напрузі 4000 В: $\frac{di}{dt} = 507000$ А/с, що при порівнянні складає приблизно 24 %. При 4-му варіанті виникнення КЗ та напрузі контактної мережі 3000 В швидкість зростання струму дорівнює 234000 А/с, при цьому ж варіанті КЗ, але при напрузі 4000 В: $\frac{di}{dt} = 302000$ А/с, що при порівнянні складає приблизно 22,5 %.

2.2.3. Аналіз перехідних процесів при різних початкових умовах

В роботі порівняно залежності струму короткого замикання від часу для послідовного з'єднання тягових електродвигунів ЕД-141У1 при різних умовах: без урахування дії вихрових струмів (за моделлю 2.25) (додаток Е), з вихровими струмами, але без динамічної індуктивності (за моделлю 2.38) (додаток Ж) та з урахуванням як вихрових струмів так і динамічної індуктивності (за моделлю 2.39) (додаток З). Як приклад, напруга контактної мережі прийнята 3000 В. Для цього використано криві $I_{\text{кз}} = f(t)$ при короткому замиканні – перший варіант виникнення КЗ (точка 1 на схемі рис. 1.1) (рис. 2.19) та 4 варіант виникнення КЗ (точка 4 на схемі рис. 1.1) (рис. 2.20).

На рис. 2.19 та рис. 2.20:

- 1 – залежність $I_{\text{кз}} = f(t)$ без урахування вихрових струмів та динамічної індуктивності $L_{\text{оз}}$;
- 2 – залежність $I_{\text{кз}} = f(t)$ з урахуванням вихрових струмів при постійній індуктивності $L_{\text{оз}}$;
- 3 – залежність $I_{\text{кз}} = f(t)$ з урахуванням вихрових струмів і динамічної індуктивності $L_{\text{оз}}$.

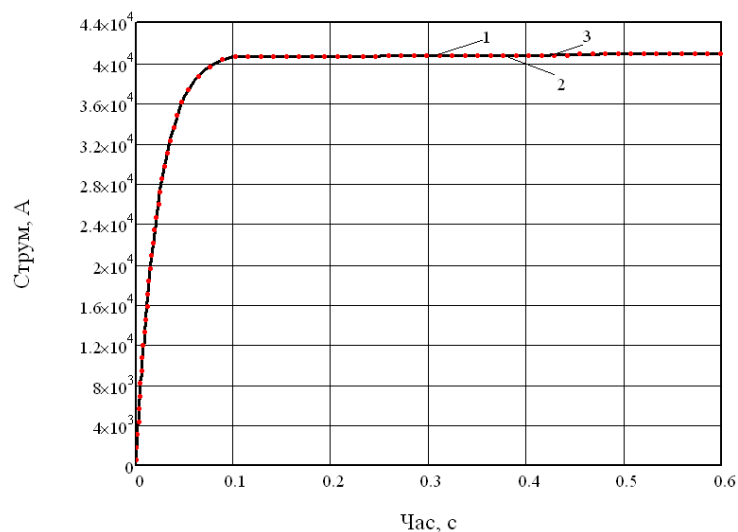


Рис. 2.19. Залежності струму КЗ від часу при короткому замиканні (точка 1 на схемі рис. 1.1) при різних умовах

З рис. 2.19 видно, що значення струму при часі 0,6 с та швидкості зростання струму на початковому періоді (приблизно 0,005 с після початку короткого замикання) швидкості зростання струму КЗ в випадках 1, 2 та 3 майже однакові, бо в колі немає жодної з обмоток збудження. Тому вплив вихрових струмів та динамічної індуктивності відсутній.

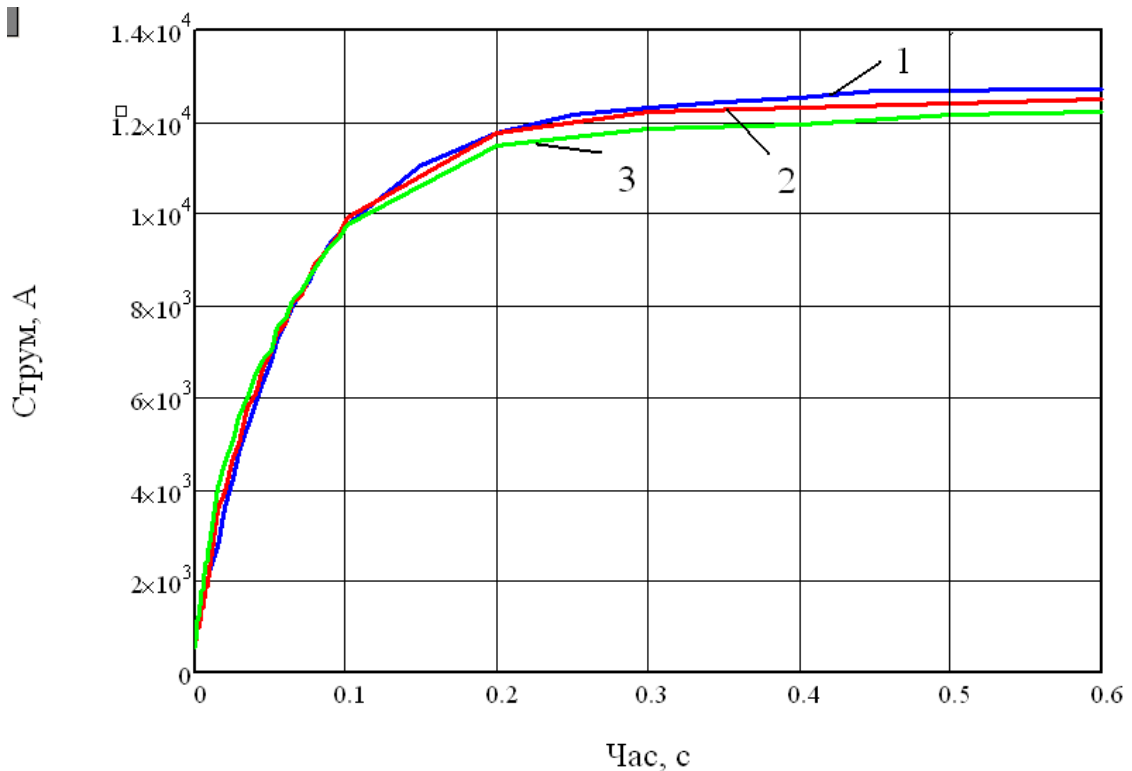


Рис. 2.20. Залежності струму КЗ від часу при короткому замиканні (точка 4 на схемі рис. 1.1) при різних умовах

Рис. 2.20 показує, що значення струму при часі 0,6 с у трьох випадках різні. Фізично це пояснюється зростанням індуктивності в колі обмоток збудження тягових електродвигунів та вихрових струмів зі зростанням магнітного потоку [73]. Усталене значення струму короткого замикання у представлених трьох випадках буде однаковим.

Таким чином, співвідношення між кривими на рис. 2.19 та 2.20 підтверджує достовірність розробленої моделі (2.39).

Для наглядності визначення та порівняння швидкості зміни струму при КЗ використано рис. 2.21, на якому показані збільшені за масштабом криві залежності струму короткого замикання від часу (за рис. 2.20) протягом

0,0001 с (час спрацьовування сучасних мікроконтролерів) після початку виникнення короткого замикання.

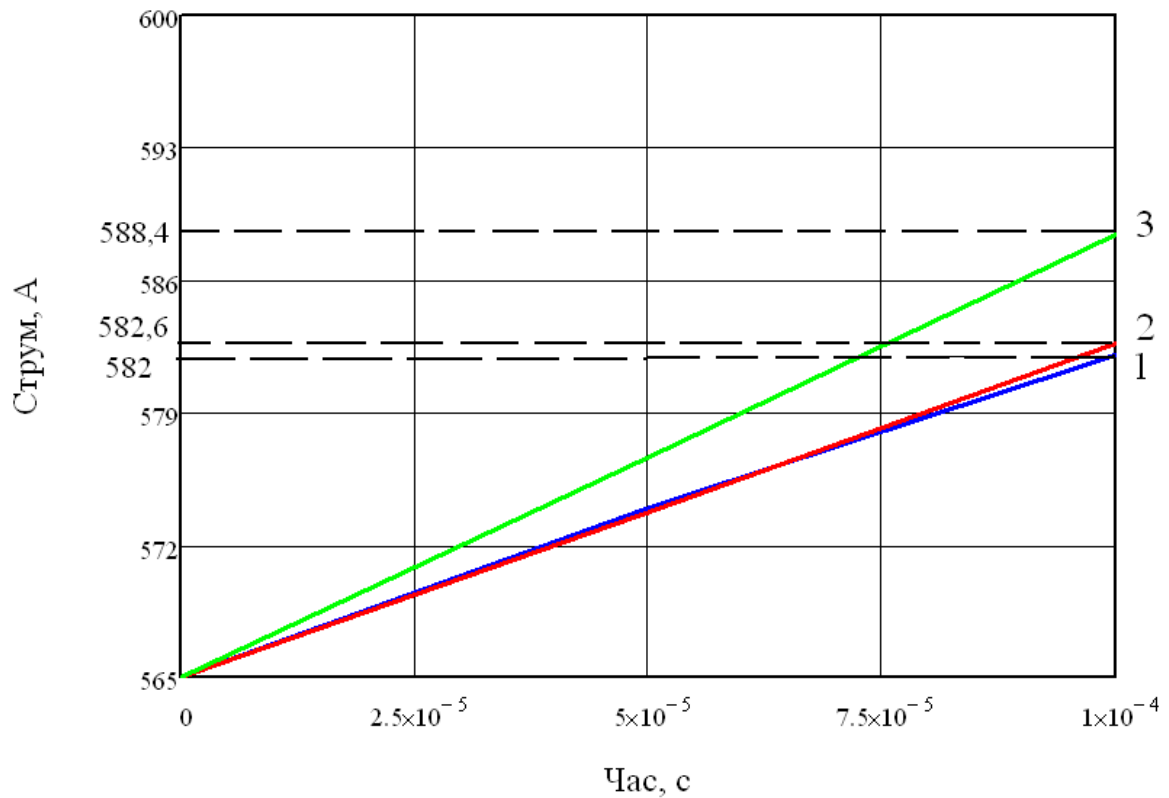


Рис. 2.21. Визначення швидкості зміни струму при короткому замиканні

Значення $\frac{di}{dt}$ знайдено на інтервалі часу від 0 до 0,0001 с., який прийнятий як час реагування пристроїв захисту.

- 1) Без урахування дії вихрових струмів в магнітопроводі ТЕД та динамічної індуктивності обмоток збудження:

$$\frac{di}{dt} = \frac{582 - 565}{0,0001} = 170000 \text{ А/с};$$

- 2) З урахуванням дії вихрових струмів але без динамічної індуктивності:

$$\frac{di}{dt} = \frac{582,6 - 565}{0,0001} = 176000 \text{ А/с};$$

- 3) З урахуванням дії як вихрових струмів так і динамічної індуктивності;

$$\frac{di}{dt} = \frac{588,4 - 565}{0,0001} = 234000 \text{ A/c};$$

Різниця $\frac{di}{dt}$ першому та другому варіантах складає:

$$\frac{176000 - 170000}{176000} \cdot 100 = 3,4 \%, \text{ що несуттєво.}$$

Різниця $\frac{di}{dt}$ при першому та третьому варіантах складає:

$$\frac{234000 - 170000}{234000} \cdot 100 = 27,4 \%, \text{ що суттєво.}$$

Аналогічно визначена різниця швидкості зростання струму при різних точках виникнення короткого замикання в колі ТЕД (рис. 1.1). Наприклад, різниця $\frac{di}{dt}$ при першому та другому варіантах (без врахування дії вихрових струмів, без динамічної індуктивності обмоток збудження та з врахуванням дії тільки вихрових струмів, але без динамічної індуктивності відповідно) складає:

4,9 % – точка 3 на схемі рис. 1.1;

2,6 % – точка 5 на схемі рис. 1.1;

4,4 % – точка 6 на схемі рис. 1.1;

4,4 % – точка 7 на схемі рис. 1.1.

Різниця $\frac{di}{dt}$ при першому та третьому варіантах (з врахуванням дії тільки вихрових струмів, але без динамічної індуктивності та з врахуванням дії як вихрових струмів, так і динамічної індуктивності відповідно) складає:

15,6 % – точка 3 на схемі рис. 1.1;

21,4 % – точка 5 на схемі рис. 1.1;

23,9 % – точка 6 на схемі рис. 1.1;

32,8 % – точка 7 на схемі рис. 1.1.

Як видно, на значення $\frac{di}{dt}$ на початку КЗ в основному впливає динамічна індуктивність.

Отримані результати показують необхідність враховувати при налагодженні захисної апаратури на базі мікропроцесорів вплив як вихрових струмів, так і динамічної індуктивності.

2.3. Вплив індуктивності контактної мережі на значення швидкості зміни струму при короткому замиканні

Для дослідження впливу індуктивності контактної мережі на значення швидкості зміни струму під час короткого замикання в колі тягових електродвигунів постійного струму в математичну модель (2.38), що враховує вплив дії як вихрових струмів в магнітопроводі ТЕД так і динамічної індуктивності обмоток збудження, введене значення L_M . В результаті отримана наступна модель (2.43) [81]:

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_M - n_{\text{дв}} \cdot c_e \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - n_{\text{дв}} \cdot (R_{\text{екв}} + R_{\text{оз}}) \cdot I_{\text{я}}}{n_{\text{дв}} \cdot (L_{\text{екв}} + 2 \cdot p \cdot w_{\text{оз}} \cdot (\sigma - 1) \cdot \frac{d\Phi}{dI_{\text{я}}}) + L_M}, \\ 1,23R_{m1}\Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{оз}} + F_{\text{нл}i}; \\ 5,29R_{m1}\Phi_{\Sigma} + 0,477g_{\mu} \frac{d\Phi_{\Sigma}}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{оз}} + F_{\text{нл}i}, \end{cases} \quad (2.43)$$

де L_M – індуктивність контактної мережі.

Індуктивність контактної мережі постійного струму визначається як [82]:

$$L_M = L_0 \cdot l, \quad (2.44)$$

де $L_0 = 0,12 \text{ мГн/км}$ – питома індуктивність контактної мережі [83];

$l = 10 \text{ км}$ – розрахункова відстань від тягової підстанції до електровоза.

$$L_M = 0,12 \cdot 10 = 1,2 \text{ мГн.}$$

Для порівняння прийняті два варіанти:

- коротке замикання виникло у певній точці кола тягових електродвигунів електровоза постійного струму при номінальній напрузі на струмоприймачі (3000 В), тобто у цьому випадку перехідний процес досліджено за умови, що напругою джерела живлення є напруга на струмоприймачі і індуктивність контактної мережі не враховується;
- коротке замикання виникло у тій же точці при номінальній напрузі на шинах тягової підстанції (3300 В) (напругою джерела живлення вважається напруга на шинах підстанції). Тобто, у цьому випадку перехідний процес досліджено з урахуванням індуктивності контактної мережі.

Для прикладу взято електровоз постійного струму ДЕ1 при послідовному ввімкненні його восьми ТЕД.

Прийнято, що коротке замикання виникло у той момент, коли тягові електродвигуни вийшли на природну швидкісну характеристику. При цьому струм та частота обертів вала ТЕД дорівнюють номінальному значенню. Точка виникнення КЗ за схемою рис. 1.1 – 4 (після двох тягових електродвигунів).

Після дослідження за допомогою математичної моделі (2.39) отримані криві залежності струму короткого замикання від часу. Для визначення швидкості зростання струму при КЗ на самому початку виникнення цього режиму отримані криві збільшено за масштабом (рис. 2.22).

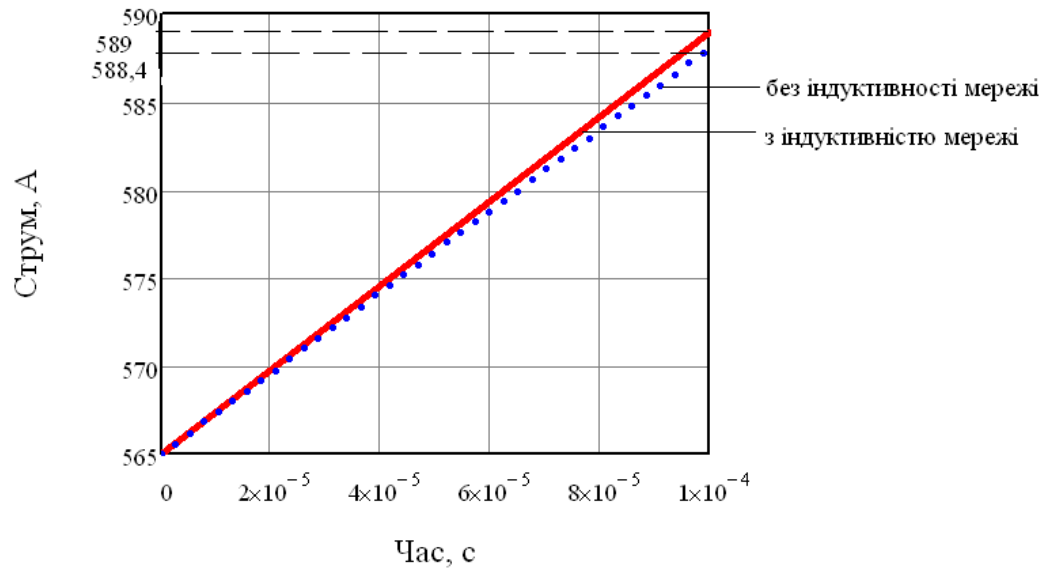


Рис. 2.22. Визначення швидкості зміни струму при короткому замиканні

$$\frac{di}{dt} = \frac{589 - 565}{0,0001} = 240000 \text{ А/с} - \text{з індуктивністю мережі};$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{588,4 - 565}{0,0001} = 234000 \text{ А/с} - \text{без індуктивності мережі}.$$

Дослідження показали, що вплив індуктивності контактної мережі на значення швидкості зміни струму перехідного процесу на початку виникнення короткого замикання в колі тягових електродвигунів електровозу постійного струму складає приблизно 2,5 %. Можна зробити висновок, що цей вплив незначний.

2.4.Висновки до другого розділу

1. Розроблена математична модель для дослідження перехідних процесів у колах тягових електродвигунів при різних режимах.
2. Проведені дослідження показали, що запропонована математична модель задовільно описує процеси, які відбуваються при пуску тягових електродвигунів в силовому колі базового електровоза постійного струму. Так, значення струмів на ступенях при виведенні пускових реостатів за технічною документацією та за результатами проведеного дослідження відрізняються не більше ніж на 5 %, що є несуттєвим. Це підтверджує достовірність математичної моделі.
3. Доведено, що запропонована математична модель задовільно описує перехідні процеси в режимі короткого замикання у силовому колі електрорухомого складу при різних умовах і може бути використана для дослідження цих процесів у колі будь-якого виду та типу ЕРС постійного струму з урахуванням його особливостей.
4. При налагодженні датчиків пристроїв захисту силових кіл електрорухомого складу постійного струму від струмів короткого замикання швидкість зміни струму потрібно визначати з урахуванням дії вихрових струмів в магнітопроводі ТЕД та динамічної індуктивності обмоток збудження, бо при цих умовах перехідний процес відповідає реальним фізичним процесам. Інтервал часу потрібно брати від початку короткого замикання до 0,0001 с. Наприклад, при короткому замиканні у точці після двох тягових електродвигунів різниця $\frac{di}{dt}$ знайденого без урахування вихрових струмів та без динамічної індуктивності і з урахуванням вихрових струмів, але теж без динамічної індуктивності складає 3,4%, що несуттєво. Різниця $\frac{di}{dt}$ без урахування вихрових струмів та без динамічної індуктивності і з урахуванням вихрових струмів і з динамічною індуктивністю складає 27,4 %, що суттєво.

5. Також потрібно враховувати, що значення $\frac{di}{dt}$ при пуску та короткому замиканні суттєво відрізняються. Це дає змогу захисному пристрою, виконаному на мікроконтролері, відрізнати аварійний режим від експлуатаційного.
6. Виконані дослідження впливу індуктивності контактної мережі на значення швидкості струму при короткому замиканні, які показали, що цей вплив незначний.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО СТВОРЕННЮ ЗАХИСНИХ ПРИСТРОЇВ ВІДПОВІДНО ДО ПОСТАВЛЕНОЇ МЕТИ

Використання запропонованої математичної моделі (2.25) для режимів короткого замикання у колах електровозів постійного струму дозволило отримати досить велику кількість (масив) значень швидкості зміни струму di/dt в колах тягових електродвигунів. Однозначне налаштування захисного пристрою за отриманими даними неможливе через велику розбіжність останніх.

Тому метою даного розділу є встановлення закону розподілу швидкості зростання струму та розробка методу визначення мінімального значення уставки спрацьовування мікропроцесорних пристроїв захисту від коротких замикань кіл тягових електродвигунів ЕРС постійного струму по критерію – швидкість зростання струму. А також наведення прикладів чисельного визначення уставки захисних мікропроцесорних пристроїв від коротких замикань для конкретних типів електрорухомого складу.

3.1. Визначення закону розподілу швидкості зростання струму при короткому замиканні в колах тягових електродвигунів ЕРС постійного струму

Для визначення закону розподілу швидкості зростання струму при короткому замиканні в колах тягових електродвигунів ЕРС постійного струму використані елементи теорії імовірності та математичної статистики.

Спочатку встановлюється закон розподілу швидкості зростання струму за допомогою критерію погодженості. Для цього застосовано критерій погодженості χ^2 («хі квадрат») Пірсона, що найчастіше використовується на практиці [84-87].

Весь отриманий масив швидкостей зростання струму розбивається на часткові інтервали однакової довжини (X_i – початок часткового інтервалу, X_{i+1} – кінець часткового інтервалу) – $100 \cdot 10^n$ А/с. Приймається гіпотеза про нормальний розподіл кількості випадків $\frac{di}{dt}$ певного значення для даного масиву.

Визначається кількість випадків, коли $\frac{di}{dt}$ відповідає значенню в обраному частковому інтервалі.

З усього масиву досліджуваних значень, поділеного на часткові інтервали однакової довжини (X_i, X_{i+1}), знаходяться середини (вибіркові варіанти) цих інтервалів:

$$X_i^* = \frac{X_i + X_{i+1}}{2}. \quad (3.1)$$

Визначається відносна частота значень $\frac{di}{dt}$ на кожному інтервалі за наведеною нижче формулою:

$$n_i = \frac{n}{\sum n}, \quad (3.2)$$

де n – кількість випадків, коли $\frac{di}{dt}$ відповідає значенню на обраному інтервалі;

$\sum n$ – сумарна кількість випадків варіантів швидкості зростання струму на всіх часткових досліджуваних інтервалах (на всьому масиві).

Отримані результати проведених вище розрахунків заносяться до табл. 3.1. Дані цієї таблиці надалі будуть використовуватись для задання початкових умов подальших розрахунків.

Таблиця 3.1

**Знаходження кількості випадків швидкості зростання струму та розподілу
відносних частот**

Інтервали X_i , 10^n А/с.	Кількість випадків, коли $\frac{di}{dt}$ відповідає значенню на обраному інтервалі, n	Розподіл відносних частот, n_i	X_i^*
----------------------------------	---	-------------------------------------	---------

За даними табл. 3.1 потрібно побудувати діаграму розподілу відносних частот по інтервалам швидкості зростання струму в колі ТЕД.

За допомогою методу добутоків [84] виконується перехід від вибірових варіант X_i^* до умовних u_i , за наступним виразом:

$$u_i = \frac{X_i^* - C}{h}, \quad (3.3)$$

де h – крок зміни варіант

$$h = X_{i+1} - X_i,$$

C – удаваний нуль, за який можна приймати значення будь-якої з варіант X_i^* , що має найбільшу кількість випадків $\frac{di}{dt}$.

Для підтвердження гіпотези про нормальний закон розподілу відносних частот по частковим інтервалам $\frac{di}{dt}$ необхідно визначити вихідні параметри: емпіричні моменти першого і другого порядків (M_1^* , M_2^*), вибірову середню ($\bar{X}_B$), дисперсію (D_B) та вибірове середнє квадратичне відхилення (σ_B) випадкової величини $\frac{di}{dt}$ [84, 85].

Для зручності вихідні дані для розрахунку вказаних параметрів зводяться у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Розрахунок вихідних параметрів

X_i^*	n_i	u_i	$n_i u_i$	$n_i u_i^2$	$n_i (u_i + 1)^2$
1	2	3	4	5	6

Перевіряється правильність розрахунку за наступним виразом:

$$\sum n_i (u_i + 1)^2 = \sum n_i u_i^2 + 2 \cdot \sum n_i u_i + \sum n_i, \quad (3.4)$$

Збіг знайдених сум свідчить про те, що обчислення вихідних параметрів проведені вірно.

За отриманими даними визначаються вихідні параметри для масиву, починаючи з умовних емпіричних моментів першого і другого порядків M_1^* , M_2^* відповідно:

$$M_1^* = \frac{\sum n_i u_i}{\sum n_i}; \quad (3.5)$$

$$M_2^* = \frac{\sum n_i u_i^2}{\sum n_i}. \quad (3.6)$$

Далі за допомогою методу добутків визначаються вибіркова середня та дисперсія випадкової величини di/dt відповідно:

$$\bar{X}_B = M_1^* \cdot h + C. \quad (3.7)$$

$$D_B = [M_2^* - (M_1^*)^2] \cdot h^2. \quad (3.8)$$

За отриманим значенням дисперсії визначається вибіркове середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_B = \sqrt{D_B}. \quad (3.9)$$

Визначаються Z_i та Z_{i+1} , які потрібні для знаходження функцій Лапласа.

Z_i , Z_{i+1} – відповідно початок та кінець часткового інтервалу з урахуванням вибіркового середнього та вибіркового середнє квадратичного відхилення, знаходяться за наступними формулами:

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}_B}{\sigma_B}, \quad (3.10)$$

$$Z_{i+1} = \frac{X_{i+1} - \bar{X}_B}{\sigma_B}. \quad (3.11)$$

По знайденим значенням Z_i та Z_{i+1} за допомогою таблиць [85] знаходяться значення відповідних функцій Лапласа $\Phi(Z_i)$ та $\Phi(Z_{i+1})$.

Визначається вірогідність n_i' потрапляння відносних значень частот в інтервал (Z_i, Z_{i+1}) :

$$n_i' = \Phi(Z_{i+1}) - \Phi(Z_i), \quad (3.12)$$

Приклад визначення n_i' наведений у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

№ інтер валу	X_i	X_{i+1}	$X_i - \bar{X}_B$	$X_{i+1} - \bar{X}_B$	Z_i	Z_{i+1}	$\Phi(Z_i)$	$\Phi(Z_{i+1})$	$\Phi(Z_{i+1}) - \Phi(Z_i)$	n_i'
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
									$\Sigma 1$	$\Sigma 1$

Обчислюється умовно прийнята випадкова величина $\chi^2_{\text{сп}}$ («хі квадрат» спостережуване):

$$\chi^2_{\text{сп}} = \frac{(n_i - n_i')^2}{n_i}, \quad (3.13)$$

Вихідні дані для обчислення величини $\chi^2_{\text{сп}}$ визначаються по табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Визначення спостережуваного значення $\chi^2_{\text{сп}}$

№ інтервалу	n_i	n_i'	$n_i - n_i'$	$(n_i - n_i')^2$	$\frac{(n_i - n_i')^2}{n_i}$	n_i^2	$\frac{n_i^2}{n_i'}$
1	2	3	4	5	6	7	8
	$\sum n_i = 1$	$\sum n_i' = 1$	-	-	$\chi^2_{\text{сп}}$	$\sum n_i^2 = 1$	$\sum \frac{n_i^2}{n_i'}$

Правильність розрахунку табл. 3.4 перевіряється за наступним виразом:

$$\sum \frac{(n_i - n_i')^2}{n_i} = \sum \frac{n_i^2}{n_i'} - \sum n_i. \quad (3.14)$$

Чисельне підтвердження виразу (3.14) свідчить про те, що обчислення в табл. 3.4 проведені вірно.

Для перевірки гіпотези про нормальний розподіл частот значень швидкості зростання струму, визначається критичне значення критерію Пірсона $\chi^2_{\text{кр}}$ («хі квадрат» критичне), для чого попередньо потрібно визначити число ступенів свободи k .

$$k = s - 1 - r, \quad (3.15)$$

де r – число параметрів, що оцінюються,

s – кількість інтервалів.

Нормальне розподілення оцінюється двома параметрами: математичним очікуванням a та середнім квадратичним відхиленням σ (в якості математичного очікування прийнято вибірккову середню $\bar{X}_B$, а в якості середнього квадратичного відхилення – вибірккове σ_B). Тоді $r = 2$.

Далі, використовуючи таблицю критичних точок розподілу $\chi^2_{кр}$ при заданому рівню значимості $\alpha = 0,05$ та числі ступенів свободи k визначається:

$$\chi^2_{кр} = f(\alpha; k). \quad (3.16)$$

Нерівність $\chi^2_{сп} < \chi^2_{кр}$ підтверджує гіпотезу про нормальний розподіл кількості випадків di/dt певного значення для даного масиву.

3.2. Метод визначення уставки спрацьовування захисних мікропроцесорних пристроїв від струмів короткого замикання по критерію швидкості зростання струму

Запропонований метод визначення уставки спрацьовування захисних мікропроцесорних пристроїв від струмів короткого замикання по критерію швидкості зростання струму, що складається з трьох етапів [88]:

1. Визначається довірчий інтервал зміни di/dt при конкретних заданих умовах (напруга контактної мережі, варіанти виникнення КЗ згідно рис. 1.1, 2.12, 2.14, 2.16).

Цей інтервал показує граничні межі, в які потрапляє заданий параметр di/dt з заданим рівнем значимості γ у всьому масиві виникнення di/dt [85, 89].

Для розрахунку приймається рівень значимості $\gamma = 0,95$.

$$\bar{X}_B - t \cdot \frac{\sigma_B}{\sqrt{s}} < a < \bar{X}_B + t \cdot \frac{\sigma_B}{\sqrt{s}}, \quad (3.17)$$

де a – математичне очікування,

s – кількість інтервалів,

t – значення аргументу функції Лапласа, при якому $\Phi(t) = \frac{\gamma}{2}$, тоді

$$\Phi(t) = \frac{0,95}{2} = 0,475.$$

За таблицею значень функції $\Phi(t)$ [85, 86] знаходиться: $t = 1,96$.

Значення вибіркової середньої та середнього квадратичного відхилення для (3.17) розраховуються для різних значень напруги контактної мережі ($U_M = 3000$ В, $U_M = 2200$ В та $U_M = 4000$ В).

2. Графічне зображення спільного довірчого інтервалу при різних значеннях напруги контактної мережі.

3. Проводиться порівняння визначених довірчих інтервалів та визначається мінімальна межа di/dt . Значення цієї межі – це і є мінімальне значення уставки спрацьовування захисного пристрою від струмів КЗ по критерію швидкості зростання струму.

3.3. Визначення чисельних значень уставок захисних мікропроцесорних пристроїв для електровозів ДЕ1 та ВЛ8 з використанням запропонованого методу

Згідно розробленого методу нижче проведені відповідні дослідження з метою визначення значення уставки спрацьовування захисного пристрою по критерію di/dt для електровозів ДЕ1 та ВЛ8.

3.3.1. Електровоз ДЕ1

Для прикладу табл. 3.5 (за табл. 3.1) складена для електричних кіл тягових електродвигунів електровоза ДЕ1 з урахуванням результатів

досліджень значень $\frac{di}{dt}$ в цих колах при номінальній напрузі в контактній мережі 3000 В окрім першої та другої точки виникнення КЗ, так як захист в даному випадку виконується тільки за допомогою ШВ (табл. 2.7, 2.8).

У подальших чисельних прикладах використовуються дані також відносно електровоза ДЕ1.

Таблиця 3.5

**Знаходження кількості випадків швидкості зростання струму та розподілу
відносних частот**

Інтервали X_i , 10^3 A/c	Кількість випадків, коли $\frac{di}{dt}$ відповідає значенню на обраному інтервалі, n	Розподіл відносних частот, n_i	X_i^*
1	2	3	4
[0...100)	8	0,348	50
[100...200)	9	0,391	150
[200...300)	4	0,174	250
[300...400)	2	0,087	350
	$\Sigma n = 23$	$\Sigma n_i = 1$	

Загальна кількість інтервалів в табл. 3.5 $s = 18$.

$$h = 150 - 50 = 100;$$

В якості удаваного нуля прийнято $X_i^* = 150$, що має дев'ять випадків $\frac{di}{dt}$ (табл. 3.5).

За даними табл. 3.5 побудовано діаграму (рис. 3.1), з якої наглядно видно, що розподіл відносних частот $\frac{di}{dt}$ по інтервалам нагадує майже нормальний закон розподілу.

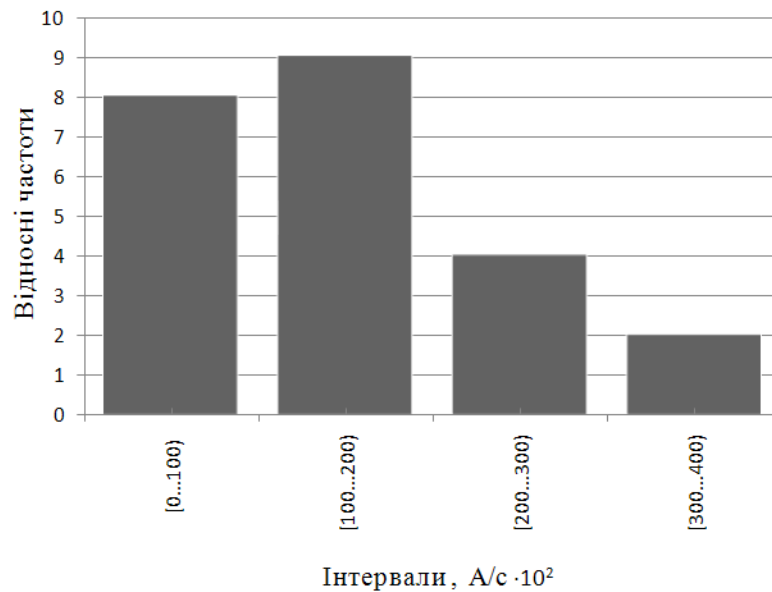


Рис. 3.1. Розподіл відносних частот по інтервалам швидкості зростання струму в колі ТЕД ЕД-141У при напрузі контактної мережі 3000 В

Для зручності вихідні дані для розрахунку вказаних параметрів зводяться у табл. 3.6, яка заповнена у відповідності з прикладом, що розглядається. У третьому стовпці табл. 3.6 записано: удаваний нуль при $X_i^* = 150$; під нулем записуються послідовно умовні частоти u_i 1, 2, 3,...; над нулем – -1 і т. д.

Таблиця 3.6

Розрахунок вихідних параметрів

X_i^*	n_i	u_i	$n_i u_i$	$n_i u_i^2$	$n_i (u_i + 1)^2$
1	2	3	4	5	6
50	0,348	-1	-0,348	0,348	0,000
150	0,391	0	0,000	0,000	0,391
250	0,174	1	0,174	0,174	0,696
350	0,087	2	0,174	0,348	0,783
	$\Sigma n_i = 1$		$\Sigma n_i u_i = 0$	$\Sigma n_i u_i^2 = 0,87$	$\Sigma n_i (u_i + 1)^2 = 1,87$

Перевіряється правильність розрахунку табл. 3.6 за виразом (3.4):

$$1,87 = 0,87 + 2 \cdot 0 + 1;$$

$$1,87 = 1,87.$$

Збіг знайдених сум свідчить про те, що обчислення вихідних параметрів в табл. 3.6 проведені вірно.

За отриманими даними визначаються вихідні параметри для масиву, починаючи з умовних емпіричних моментів першого і другого порядків M_1^* , M_2^* за формулами (3.5) та (3.6) відповідно:

$$M_1^* = 0;$$

$$M_2^* = \frac{0,87}{1} = 0,87.$$

Далі за допомогою методу добутоків визначаються вибіркова середня та дисперсія випадкової величини di/dt за (3.7) та (3.8) відповідно:

$$\bar{X}_B = 0 \cdot 100 + 150 = 150;$$

$$D_B = [0,87 - 0] \cdot 100^2 = 8700.$$

За отриманим значенням дисперсії визначено вибіркове середнє квадратичне відхилення (3.9):

$$\sigma_B = \sqrt{8700} = 93,3.$$

Визначаються Z_i та Z_{i+1} за (3.10) та (3.11), які потрібні для знаходження функцій Лапласа.

По знайденим значенням Z_i та Z_{i+1} за допомогою таблиць [85] знаходяться значення відповідних функцій Лапласа $\Phi(Z_i)$ та $\Phi(Z_{i+1})$.

Визначається вірогідність n_i' потрапляння відносних значень частот в інтервал (Z_i, Z_{i+1}) (3.12):

Чисельний приклад визначення n_i' наведений в табл. 3.7.

Таблиця 3.7

№ інтервалу	X_i	X_{i+1}	$X_i - \bar{X}_B$	$X_{i+1} - \bar{X}_B$	Z_i	Z_{i+1}	$\Phi(Z_i)$	$\Phi(Z_{i+1})$	$\Phi(Z_{i+1}) - \Phi(Z_i)$	n_i'
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	100	-	-50	-	-0,54	-0,5000	-0,2054	0,295	0,295
2	100	200	-50	50	-	0,54	-0,2054	0,2054	0,411	0,411
3	200	300	50	150	0,54	1,61	0,2054	0,4463	0,241	0,241
4	300	400	150	-	1,61	-	0,4463	0,5000	0,054	0,054
									$\Sigma 1$	$\Sigma 1$

Вихідні дані для обчислення умовно прийнятої випадкової величини $\chi^2_{\text{сп}}$ («хі квадрат» спостережуване) наведені в табл. 3.8 (згідно табл. 3.4 п. 3.1).

Величина $\chi^2_{\text{сп}}$ знаходиться за (3.13).

Таблиця 3.8

Визначення спостережуваного значення $\chi^2_{\text{сп}}$

№ інтервалу	n_i	n_i'	$n_i - n_i'$	$(n_i - n_i')^2$	$\frac{(n_i - n_i')^2}{n_i}$	n_i^2	$\frac{n_i^2}{n_i'}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,348	0,295	0,053	0,0028	0,010	0,121	0,411
2	0,391	0,411	-0,019	0,0004	0,001	0,153	0,373
3	0,174	0,241	-0,067	0,0045	0,019	0,030	0,126
4	0,087	0,054	0,033	0,0011	0,021	0,008	0,141
	$\Sigma n_i = 1$	$\Sigma n_i' = 1$	-	-	$\chi^2_{\text{сп}} = 0,05$	$\Sigma n_i^2 = 1$	$\Sigma \frac{n_i^2}{n_i'} = 1,05$

Правильність розрахунку табл. 3.8 перевіряється за виразом (3.14):

$$0,05 = 1,05 - 1,$$

$$0,05 = 0,05.$$

Остання тотожність підтверджує, що обчислення в табл. 3.8 проведені вірно.

Для перевірки гіпотези про нормальний розподіл частот значень швидкості зростання струму, визначається критичне значення критерію Пірсона $\chi^2_{кр}$ («хі квадрат» критичне), для чого попередньо визначено число ступенів свободи k .

Враховуючи, що число можливих варіант, тобто інтервалів значень di/dt , дорівнює $s = 4$, то число ступенів свободи за (3.15) буде:

$$k = 4 - 1 - 2 = 1.$$

Далі, використовуючи таблицю критичних точок розподілу $\chi^2_{кр}$ при заданому рівню значимості $\alpha = 0,05$ та числі ступенів свободи k [85] визначається $\chi^2_{кр}$ за (3.16):

$$\chi^2_{кр} = f(0,05;1) = 3,8.$$

Нерівність $\chi^2_{сп} = 0,05 < \chi^2_{кр} = 3,8$ підтверджує гіпотезу про нормальний розподіл кількості випадків di/dt певного значення для даного масиву, тобто підтверджує, що дана випадкова величина швидкості зростання струму короткого замикання в силовому колі електровозу ДЕ1 при напрузі контактної мережі 3000 В та при різних варіантах виникнення КЗ, розподілена за нормальним законом.

Для значень di/dt при напрузі в контактній мережі 2200 В та 4000 В розрахунки проведені аналогічно розглянутому випадку при напрузі в контактній мережі 3000 В. За табл. П.1.1, П.2.1 додатку П знайдено кількість випадків, коли di/dt відповідає значенню на обраному інтервалі, та розподіл відносних частот. Після цього побудовано діаграми розподілу відносних

частот по інтервалам швидкості зростання струму у колі ТЕД ЕД-141У (рис. 3.2, 3.3).

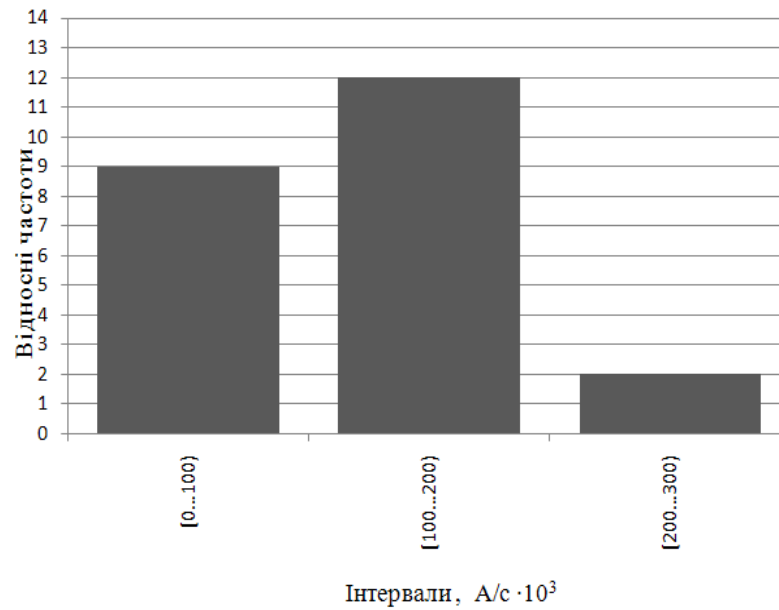


Рис. 3.2. Розподіл відносних частот по інтервалам швидкості зростання струму в колі ТЕД ЕД-141У при напрузі контактної мережі 2200 В

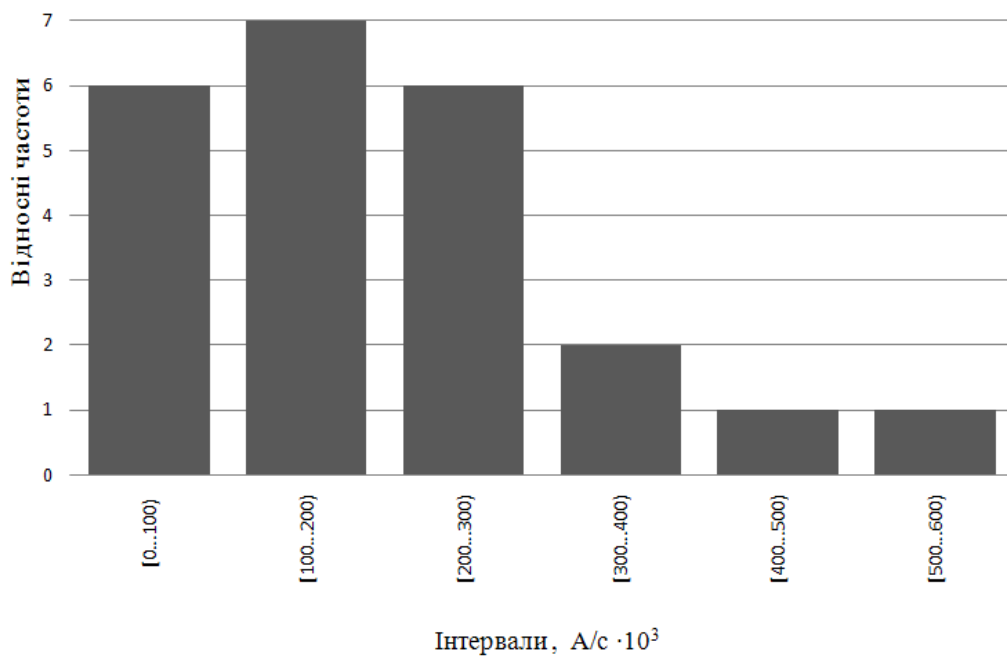


Рис. 3.3. Розподіл відносних частот по інтервалам швидкості зростання струму в колі ТЕД ЕД-141У при напрузі контактної мережі 4000 В

Умовні емпіричні моменти першого і другого порядків за (3.5) та (3.6) знайдено з розрахованих у додатку П табл. П.1.2, П.2.2:

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 2200 В

$$M_1^* = \frac{-0,304}{1} = -0,304;$$

$$M_2^* = \frac{0,478}{1} = 0,478;$$

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 4000 В

$$M_1^* = \frac{0,478}{1} = 0,478;$$

$$M_2^* = \frac{1,957}{1} = 1,957.$$

Шукана вибіркова середня та дисперсія випадкової величини $\frac{di}{dt}$ знайдені за (3.7) та (3.8) відповідно:

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 2200 В

$$\bar{X}_B = (-0,304) \cdot 100 + 150 = 120;$$

$$D_B = [0,478 - (-0,304)^2] \cdot 100^2 = 3855,8;$$

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 4000 В

$$\bar{X}_B = 0,478 \cdot 100 + 150 = 198;$$

$$D_B = [1,957 - (0,478)^2] \cdot 100^2 = 17285.$$

За отриманим значенням дисперсії визначено вибірконе середнє квадратичне відхилення (3.9):

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі $U_M = 2200$ В

$$\sigma_B = \sqrt{D_B} = \sqrt{3855,8} = 62;$$

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі $U_M = 4000$ В

$$\sigma_B = \sqrt{D_B} = \sqrt{17285} = 131,5$$

Розрахунок теоретичних частот та визначення спостережуваного значення $\chi^2_{\text{сп}}$ при напрузі контактної мережі 2200 та 4000 В виконано у табл. П.1.3, П.1.4, П.2.3, П.2.4 додатку П.

Число ступенів свободи k (3.14) при $U_M = 2200$ В та $U_M = 4000$ В відповідно:

$$k = 3 - 1 - 2 \approx 1;$$

$$k = 6 - 1 - 2 = 3.$$

Далі, використовуючи таблицю критичних точок розподілу $\chi^2_{\text{кр}}$, по заданому рівню значущості $\alpha = 0,05$ та числу ступенів свободи p маємо за (3.15) при $U_M = 2200$ В та $U_M = 4000$ В знайдено відповідно [85]:

$$\chi^2_{\text{кр}} = f(0,05;1) = 3,8; \quad \chi^2_{\text{сп}} = 0,002.$$

$$\chi^2_{\text{кр}} = f(0,05;3) = 7,8; \quad \chi^2_{\text{сп}} = 0,14.$$

В обох розрахованих випадках $\chi^2_{\text{сп}} < \chi^2_{\text{кр}}$. Тоді можна зробити висновок, що дана випадкова величина в цих випадках розподілена за нормальним законом.

3.3.2. Електровоз ВЛ8

Далі потрібно впевнитись, що швидкість зростання струму КЗ розподілена за нормальним законом розподілу для тягових електродвигунів електровоза ВЛ8. За табл. П.3.1, П.4.1, П.5.1 додатку П знайдено кількість випадків швидкості зростання струму короткого замикання та розподіл відносних частот. Після побудовано діаграми розподілу відносних частот по інтервалам швидкості зростання струму у колі ТЕД НБ-406Б при різних напрузі контактної мережі (рис. 3.4, 3.5, 3.6).

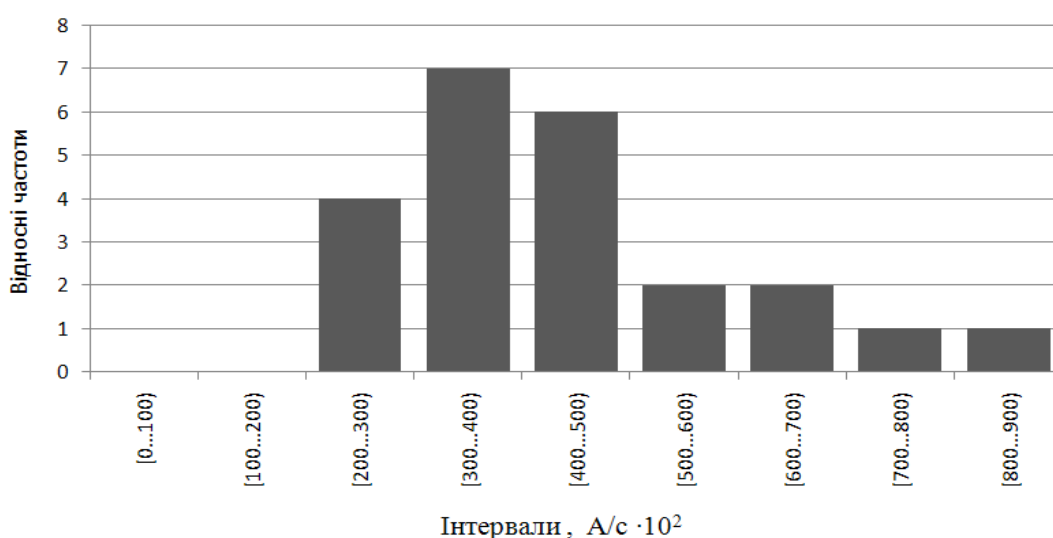


Рис. 3.4. Розподіл відносних частот по інтервалам швидкості зростання струму в колі ТЕД НБ-406Б при напрузі контактної мережі 3000 В

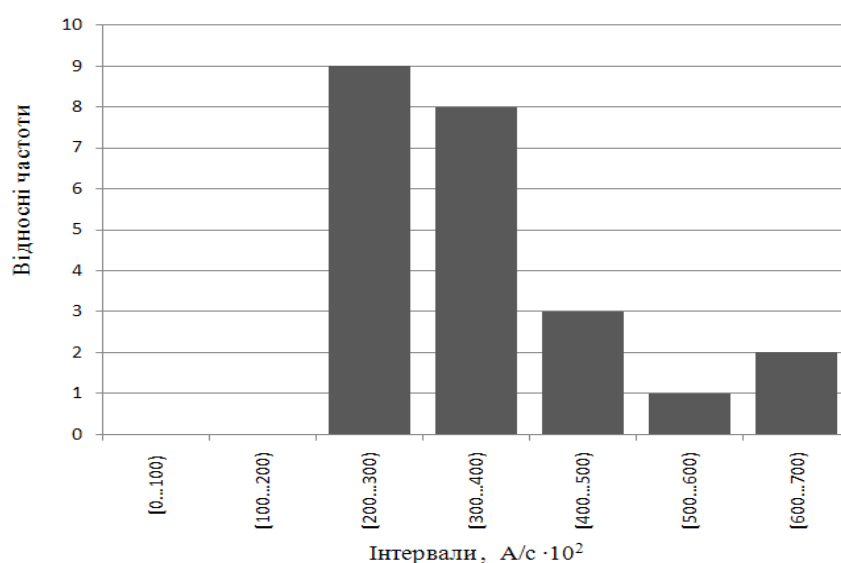


Рис. 3.5. Розподіл відносних частот по інтервалам швидкості зростання струму в колі ТЕД НБ-406Б при напрузі контактної мережі 2200 В

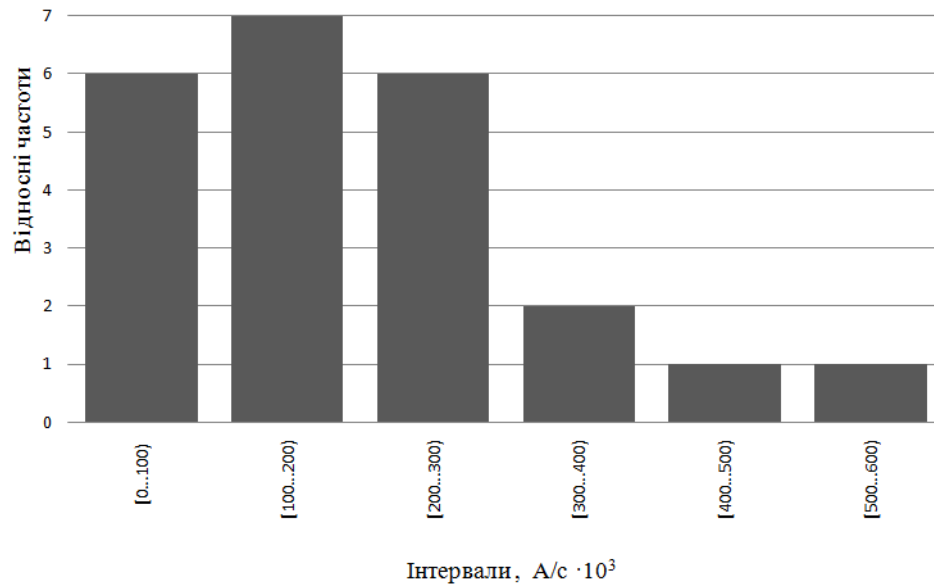


Рис. 3.6. Розподіл відносних частот по інтервалам швидкості зростання струму в колі ТЕД НБ-406Б при напрузі контактної мережі 4000 В

Умовні емпіричні моменти першого і другого порядків за (3.5) та (3.6) знайдено з розрахованих у додатку П табл. П.3.2, П.4.2, П.5.2:

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 3000 В

$$M_1^* = \frac{0,913}{1} = 0,913;$$

$$M_2^* = \frac{3,348}{1} = 3,348;$$

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 2200 В

$$M_1^* = \frac{1,087}{1} = 1,087;$$

$$M_2^* = \frac{2,652}{1} = 2,652;$$

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 4000 В

$$M_1^* = \frac{1,783}{1} = 1,783;$$

$$M_2^* = \frac{7,783}{1} = 7,783.$$

Шукана вибіркова середня та дисперсія випадкової величини $\frac{di}{dt}$ знайдена за (3.7) та (3.8) відповідно:

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 3000 В

$$\bar{X}_B = 0,913 \cdot 100 + 350 = 441,3;$$

$$D_B = [3,348 - (0,913)^2] \cdot 100^2 = 25144,3;$$

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 2200 В

$$\bar{X}_B = 1,087 \cdot 100 + 250 = 359;$$

$$D_B = [2,652 - (1,087)^2] \cdot 100^2 = 14704;$$

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 4000 В

$$\bar{X}_B = 1,783 \cdot 100 + 350 = 528,3;$$

$$D_B = [7,783 - (1,783)^2] \cdot 100^2 = 46039.$$

За отриманим значенням дисперсії визначено середнє квадратичне відхилення (3.9):

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 3000 В

$$\sigma_B = \sqrt{D_B} = \sqrt{25144,3} = 158,6;$$

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 2200 В

$$\sigma_B = \sqrt{D_B} = \sqrt{14704} = 121;$$

- для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 4000 В

$$\sigma_B = \sqrt{D_B} = \sqrt{46039} = 214,6$$

Розрахунок теоретичних частот та визначення спостережуваного значення $\chi^2_{\text{сп}}$ виконано у табл. П.3.3, П.3.4, П.4.3, П.4.4, П.5.3, П.5.4 додатку П.

Число ступенів свободи k (3.14) при $U_{\text{м}} = 3000 \text{ В}$, $U_{\text{м}} = 2200 \text{ В}$ та $U_{\text{м}} = 4000 \text{ В}$ відповідно:

$$k = 9 - 1 - 2 = 6,$$

$$k = 7 - 1 - 2 = 4,$$

$$k = 11 - 1 - 2 = 8.$$

Далі, використовуючи таблицю критичних точок розподілу $\chi^2_{\text{кр}}$ [85], по заданому рівню значущості $\alpha = 0,05$ та числу ступенів свободи k отримано за (3.15) при $U_{\text{м}} = 3000 \text{ В}$, $U_{\text{м}} = 2200 \text{ В}$ та $U_{\text{м}} = 4000 \text{ В}$ відповідно:

$$\chi^2_{\text{кр}} = f(0,05;6) = 12,6; \quad \chi^2_{\text{сп}} = 0,043;$$

$$\chi^2_{\text{кр}} = f(0,05;4) = 9,5; \quad \chi^2_{\text{сп}} = 0,496;$$

$$\chi^2_{\text{кр}} = f(0,05;11) = 19,7; \quad \chi^2_{\text{сп}} = 0,556.$$

Таким чином, в усіх розрахованих випадках $\chi^2_{\text{сп}} < \chi^2_{\text{кр}}$. Тоді можна зробити висновок, що швидкість зростання струму короткого замикання в силовому колі електровоза ВЛ8 за умови різних напруг контактної мережі розподілена за нормальним законом. Це дає змогу визначити за допомогою довірчого інтервалу мінімальне значення уставки по швидкості зростання аварійного струму для спрацьовування захисної апаратури силових кіл тягових електродвигунів.

За допомогою запропонованого в п. 3.2 методу визначені уставки спрацьовування захисних пристроїв від струмів КЗ по критерію – швидкість зростання струму.

1. Визначення довірчого інтервалу швидкості зростання струму при конкретних заданих умовах за виразом (3.17).

1.1 Довірчий інтервал для швидкості зростання струму силового кола ТЕД ЕД-141У:

- для значень di/dt при напрузі контактної мережі 3000 В

$$150 - 1,96 \frac{93,3}{\sqrt{4}} < a < 150 + 1,96 \frac{93,3}{\sqrt{4}},$$

$$58,6 \cdot 10^3 \text{ A/c} < a < 241,4 \cdot 10^3 \text{ A/c}.$$

- для значень di/dt при напрузі контактної мережі 2200 В

$$120 - 1,96 \frac{62}{\sqrt{3}} < a < 120 + 1,96 \frac{62}{\sqrt{3}},$$

$$50 \cdot 10^3 \text{ A/c} < a < 190 \cdot 10^3 \text{ A/c}.$$

- для значень di/dt при напрузі контактної мережі 4000 В

$$198 - 1,96 \frac{131,5}{\sqrt{6}} < a < 198 + 1,96 \frac{131,5}{\sqrt{6}},$$

$$93 \cdot 10^3 \text{ A/c} < a < 303 \cdot 10^3 \text{ A/c}.$$

1.2 Довірчий інтервал для швидкості зростання струму силового кола ТЕД НБ-406Б:

- для значень di/dt при напрузі контактної мережі 3000 В

$$441,3 - 1,96 \frac{121}{\sqrt{6}} < a < 441,3 + 1,96 \frac{121}{\sqrt{6}},$$

$$303 \cdot 10^2 \text{ A/c} < a < 579,5 \cdot 10^2 \text{ A/c}.$$

- для значень di/dt при напрузі контактної мережі 2200 В

$$359 - 1,96 \frac{121}{\sqrt{4}} < a < 359 + 1,96 \frac{121}{\sqrt{4}},$$

$$240 \cdot 10^2 \text{ A/c} < a < 477,6 \cdot 10^2 \text{ A/c}.$$

– для значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 4000 В

$$528,3 - 1,96 \frac{214,6}{\sqrt{8}} < a < 528,3 + 1,96 \frac{214,6}{\sqrt{8}},$$

$$380 \cdot 10^2 \text{ A/c} < a < 677 \cdot 10^2 \text{ A/c}.$$

Для випадків визначення довірчого інтервалу для $\frac{di}{dt}$ в силовому колі електровоза ВЛ8 швидкість зростання струму буде меншою (10^2 А/с) в порівнянні зі швидкістю зростання струму в силовому колі електровозу ДЕ1 (10^3 А/с).

2. На рис. 3.7, 3.8 показано графічно визначення спільного довірчого інтервалу для трьох випадків напруги тягової контактної мережі за наведеною нижче формулою [84, 85, 87, 88]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_B \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{(X_i^* - \bar{X}_B)^2}{2\sigma_B^2}\right)}, \quad (3.18)$$

де $f(x)$ – густина розподілу швидкості зростання струму при короткому замиканні.

На рис. 3.7, 3.8:

- 1 – крива нормального розподілу і межі довірчого інтервалу значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 2200 В;
- 2 – крива нормального розподілу і межі довірчого інтервалу значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 3000 В;

3 – крива нормального розподілу і межі довірчого інтервалу значень $\frac{di}{dt}$ при напрузі контактної мережі 4000 В.

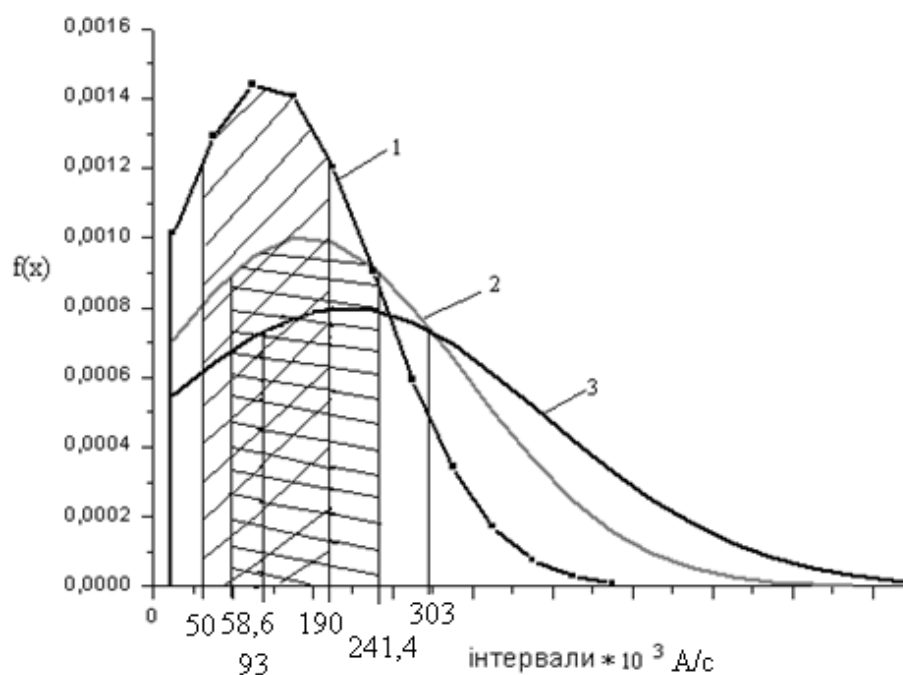


Рис. 3.7. Визначення довірчого інтервалу швидкості зростання аварійного струму силового кола ТЕД ЕД-141У

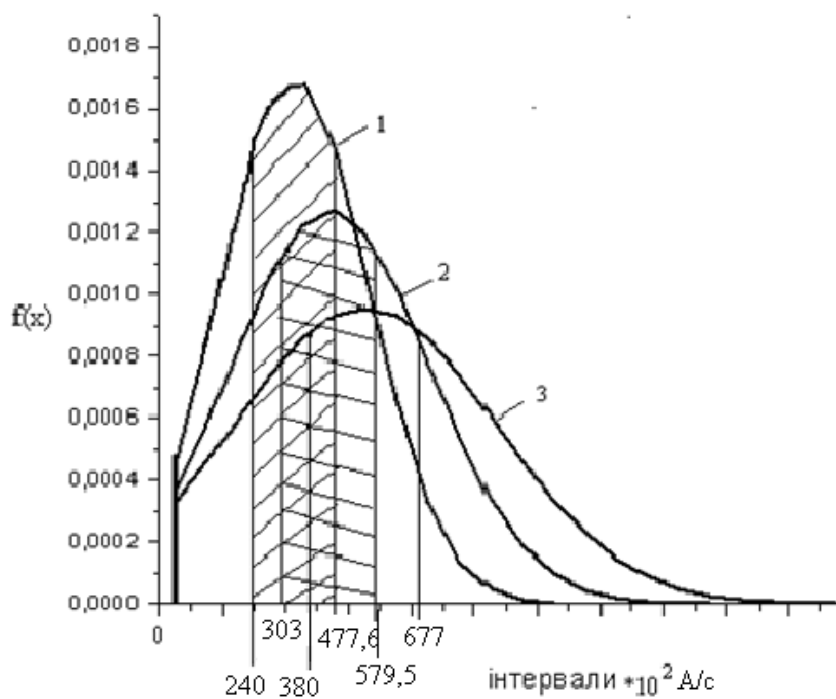


Рис. 3.8. Визначення довірчого інтервалу швидкості зростання аварійного струму силового кола ТЕД НБ-406Б

3. Порівняння визначених довірчих інтервалів та визначення мінімальної межі спрацьовування ПЗ по швидкості зростання струму.

З рис. 3.7 видно, що довірчі інтервали для трьох випадків напруги контактної мережі (3000; 2200; 4000 В) накладаються один на одного. Найбільш імовірним проміжком виникнення значень $\frac{di}{dt}$ є інтервал від $93 \cdot 10^3$ А/с до $190 \cdot 10^3$ А/с.

Для налагодження уставки спрацьовування пристроїв захисту від коротких замикань силового кола електровоза ДЕ1 потрібно брати мінімальну межу $50 \cdot 10^3$ А/с, що більша ніж при пуску тягових електродвигунів ($\frac{di}{dt} = 29500$ А/с).

З рис. 3.8 видно, що найбільш імовірним проміжком виникнення значень $\frac{di}{dt}$ в силовому колі електровоза ВЛ8 є інтервал від $380 \cdot 10^2$ А/с до $477,6 \cdot 10^2$ А/с.

Для налагодження уставки спрацьовування пристроїв захисту від коротких замикань силового кола електровоза ВЛ8 потрібно використовувати мінімальну межу довірчого інтервалу $240 \cdot 10^2$ А/с.

Запропонований метод може бути використаний для визначення уставки спрацьовування захисних мікропроцесорних пристроїв від струмів короткого замикання для будь-якого виду та типу ЕРС постійного струму.

3.4. висновки до третього розділу

1. Вперше з використанням елементів теорії імовірності та математичної статистики запропоновано метод визначення мінімального значення уставки спрацьовування мікропроцесорних пристроїв захисту кіл тягових електродвигунів електрорухомого складу постійного струму від коротких замикань по критерію – швидкість зростання струму.

Вказаний метод передбачає:

- визначення закону розподілу di/dt в усьому масиві значень цього параметру, який (масив) визначено за допомогою математичної моделі, запропонованої автором. Доведено, що розподіл di/dt в заданих інтервалах відповідає нормальному закону;
 - визначення довірчих інтервалів зміни di/dt при конкретних заданих умовах;
 - визначення мінімальної межі зміни di/dt , яка рекомендується в якості уставки захисного пристрою за критерієм – швидкість зміни струму.
2. З використанням запропонованого методу проведені відповідні теоретичні дослідження для електровозів ДЕ1 та ВЛ8 при напругах контактної мережі 3000 В, 2200 В та 4000 В.
 3. Знайдено найбільш імовірний для електровоза ДЕ1 проміжок виникнення di/dt : від $93 \cdot 10^3$ А/с до $190 \cdot 10^3$ А/с, для електровоза ВЛ8 – інтервал від $380 \cdot 10^2$ А/с до $477,6 \cdot 10^2$ А/с.
 4. Знайдені мінімальні значення di/dt в режимі короткого замикання при напрузі в контактній мережі 2200 В, які складають: для електровоза ДЕ1 – $50 \cdot 10^3$ А/с; для електровоза ВЛ8 – $240 \cdot 10^2$ А/с.

Доведено що вказав значення є суттєво більші, ніж $\frac{di}{dt}$ в режимах пуску, тобто мікропроцесорні пристрої захисту при пускових струмах у колі тягових електродвигунів спрацьовувати не будуть.

5. Для захисту силових кіл ЕРС постійного струму різних видів та типів від струмів короткого замикання доцільно використовувати уніфікований захисний пристрій. Для кожного типу електрорухомого складу значення уставки швидкості зростання струму буде своє.

РОЗДІЛ 4

УНІФІКОВАНІЙ ПРИСТРІЙ ЗАХИСТУ СИЛОВИХ КІЛ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА СУЧАСНІЙ МІКРОПРОЦЕСОРНІЙ БАЗІ

4.1 Розробка принципової схеми уніфікованого захисного пристрою

Для захисту силових кіл електрорухомого складу постійного струму від струмів короткого замикання автором розроблено уніфікований пристрій захисту на сучасній мікропроцесорній елементній базі [29, 30, 90, 91]. При цьому враховано результати досліджень перехідних процесів аварійного режиму КЗ при всіх можливих варіантах його виникнення (табл. 2.7-2.12).

Налаштування уставки нового пристрою захисту проведено за допомогою отриманого в третьому розділі мінімального значення уставки по швидкості зростання струму КЗ при відповідній напрузі контактної мережі.

Захист від такого аварійного режиму пропонується здійснювати з використанням датчика струму (ДС) та мікроконтролера (MCU), що реагує не тільки на значення аварійного струму, а й на швидкість його зростання. Окрім цих елементів схема захисту включає ще блок живлення (БЖ), генератор імпульсів (ГІ) та блок індикації (БІ) (рис. 4.1) [30].

Складові захисного пристрою повинні бути з такими характеристиками, щоб забезпечити високу точність роботи та швидкодію по вище вказаним критеріям.

Датчик струму використовується в якості елемента зчитування поточної інформації. Для цього обрано ДС на ефекті Холла. Такий вибір пояснюється перевагами останнього: відмінною точністю спрацьовування з похибкою не більше $\pm 0,7$ %; лінійністю характеристик; оптимальним часом затримки на спрацьовування не більше 1 мкс і т. ін. [92].

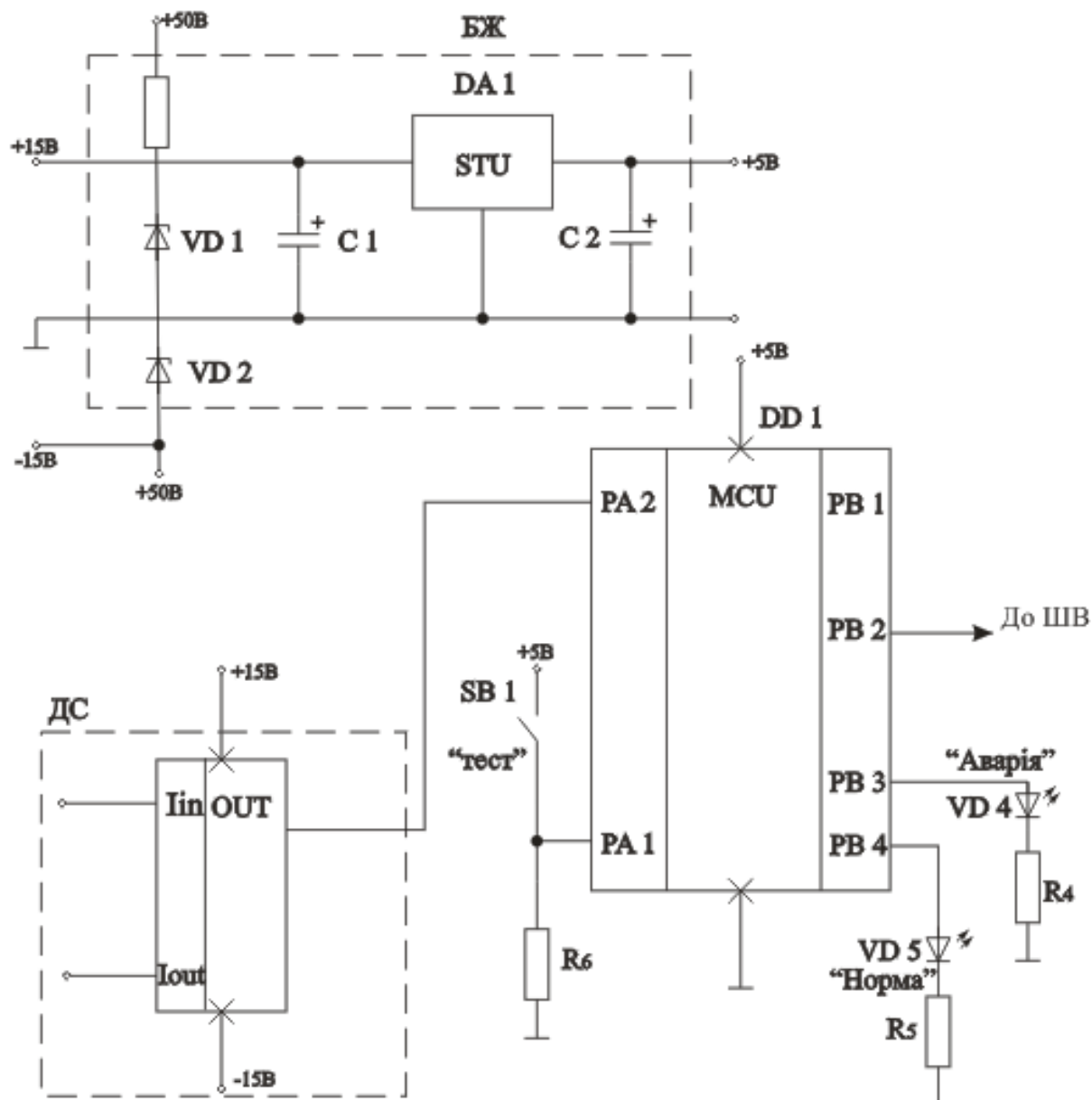


Рис. 4.1. Уніфікований пристрій захисту силового кола ЕРС від струмів КЗ

В якості елемента обробки поточної інформації, що надходить з датчика струму, виступає мікроконтролер, який в своєму складі має аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) для перетворення аналогової інформації в цифровий код. ПІ в схемі застосовано для підвищення швидкості обробки інформації.

Датчик струму та мікроконтролер отримують напругу від блоку живлення, який в свою чергу живиться електроенергією від бортової мережі ЕРС. ДС безперервно здійснює виміри струму на контрольованій ділянці кола та перетворює результати у пропорційну е.р.с. Холла. У визначені

проміжки часу, тривалість яких прийнята 0,0001 с, здійснюється зчитування вказаної е.р.с. за допомогою АЦП мікроконтролера. Мікроконтролер порівнює отримане значення сигналу у двійковому коді зі значенням уставки, що записана у мікроконтролері у вигляді такого ж коду.

Якщо швидкість зміни е.р.с., що пропорційна швидкості зростання струму у колі, менша, ніж значення уставки, то операція повторюється для наступного інтервалу часу. Вказаний процес повторюється безперервно. Якщо у колі режим короткого замикання відсутній, то пристрій захисту не дає команду з виходу PB2 мікроконтролеру на відключення швидкодіючого вимикача, а світлодіод VD5 отримує живлення від виходу PB4.

Якщо в якийсь момент часу у колі виникає КЗ, то швидкість зміни струму, що відповідає різниці е.р.с. зафіксованої датчиком струму, стає більше значення уставки. У цьому випадку з виходу PB2 подається сигнал до схеми керування ШВ, а з виходу PB3 отримує живлення світлодіод VD4. Час спрацьовування датчика струму складає $t_{дс} = 1$ мкс [92]. Час обробки одного сигналу мікроконтролером – $t_{мкк} = 28$ мкс [69]. Між обробкою сигналів є час паузи, що дорівнює $t_{п} = 2,8$ мкс.

Тоді час спрацьовування всієї схеми захисту $t_{заг}$ можна розрахувати як:

$$t_{заг} = t_{дс} + t_{мкк} + t_{п}, \quad (4.1)$$

$$t_{заг} = 1 + 28 + 2,8 = 31,8 \text{ мкс.}$$

На рис. 4.2 показана різниця при використанні електромеханічних диференціальних реле та запропонованого пристрою захисту на основі сучасного мікроконтролера для захисту силової схеми електрорухомого складу постійного струму від струмів короткого замикання.

Для прикладу взято криву залежності струму КЗ від часу при послідовному з'єднанні тягових електродвигунів ЕД-141У1, напрузі контактної мережі 3000 В і варіанті виникнення КЗ після другої обмотки

збудження (точка 4 на схемі рис. 1.1). Точка 4 обрана тому, що при КЗ у цій точці значення $\frac{di}{dt}$ приблизно дорівнює значенню $\frac{di}{dt}$ за паспортними даними диференційного реле типу РДЗ-216, що застосовується у теперішній час. Цей вибір дає право порівнювати час спрацьовування запропонованого захисного пристрою із часом спрацьовування ДР. Відповідне дослідження залежності струму короткого замикання від часу, що показаний на рис. 4.7, наведено в додатку 3.1.

Усталене значення струму при такому варіанті виникнення короткого замикання $I_{уст} = 12$ кА. У цьому випадку струм короткого замикання досягне уставки ШВ за час значно більший, ніж при повному КЗ. І тому при цьому для захисту в існуючих схемах ЕРС застосовується електромеханічне диференційне реле, час спрацьовування якого $t_{др} = 0,009$ с [17]. При використанні запропонованого пристрою захисту час спрацьовування зменшується на:

$$t_{др} - t_{заг} = 0,009 - 0,0000318 = 0,00879 \text{ с.}$$

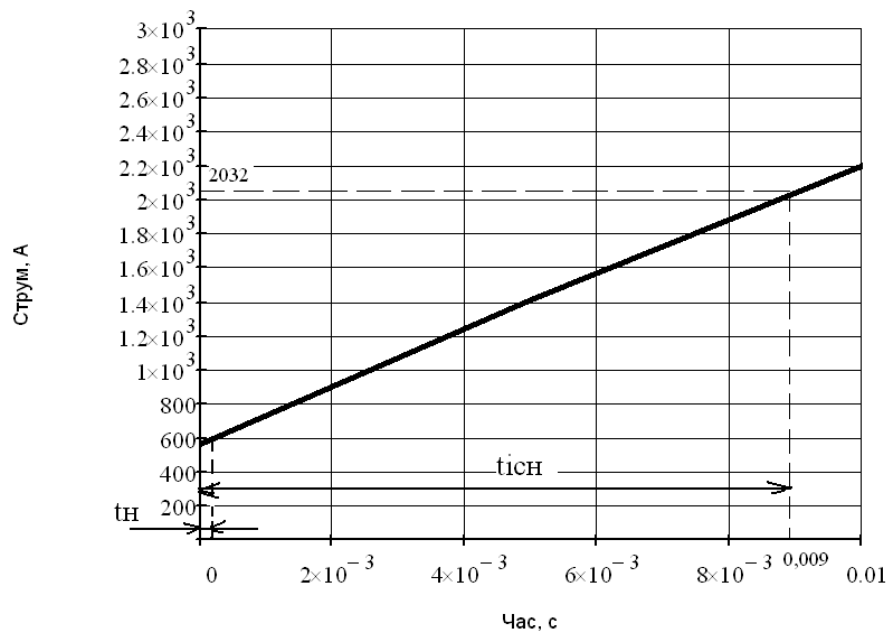


Рис. 4.2. Збільшений за масштабом графік часу спрацьовування захисту при виникненні КЗ після обмотки збудження другого тягового електродвигуна при їх послідовному з'єднанні

На рис. 4.2:

$t_{\text{існ}}$ – час спрацьовування існуючого захисту;

$t_{\text{н}}$ – час спрацьовування захисту на новій елементній базі.

Вказане скорочення часу суттєво зменшує значення струму короткого замикання, який розривається захисними апаратами. Значення вказаного струму суттєво сприяє зменшенню пошкоджень електрообладнання.

4.2. Створення стенду для перевірки уніфікованого захисного пристрою. Зняття осцилограм при перевантаженні стендового електродвигуна

Для практичної перевірки працездатності (реагування на певне значення di/dt) запропонованого пристрою захисту в лабораторних умовах створено експериментальний зразок стенду з двигуном постійного струму послідовного збудження.

Спрацьовування запропонованого захисного пристрою перевірено в режимі перевантаження.

В режимі перевантаження струм у колі тягових електродвигунів зростає у декілька разів більше номінального значення, що в багатьох випадках приводить до пошкодження або виходу з ладу електрообладнання.

Захист від перевантажень на електровозах постійного струму виконується за допомогою максимального струмового захисту, що виконаний на основі електромагнітних реле перевантаження. Кінцевим результатом захисту від цього аварійного режиму є спрацьовування швидкодіючого вимикача.

Захисні реле перевантаження вмикають у кожну паралельну гілку ТЕД з тим, щоб при виході з ладу будь-якого електродвигуна була можливість вимкнути не все коло, а окрему пошкоджену гілку.

Цей захист виконує свої функції, але час його спрацьовування відносно великий, а надійність відносно низька. Тому при застосуванні пропонуємого

захисного пристрою на сучасній елементній базі для захисту електрообладнання ЕРС від перевантажень можливо значно поліпшити ці показники.

При створенні експериментального зразка стенду в якості двигуна постійного струму використано електричний двигун типу П42 [93-96] та макетний зразок пропонує мого захисного мікропроцесорного пристрою.

Схема стенду показана на рис. 4.5 [97-99].

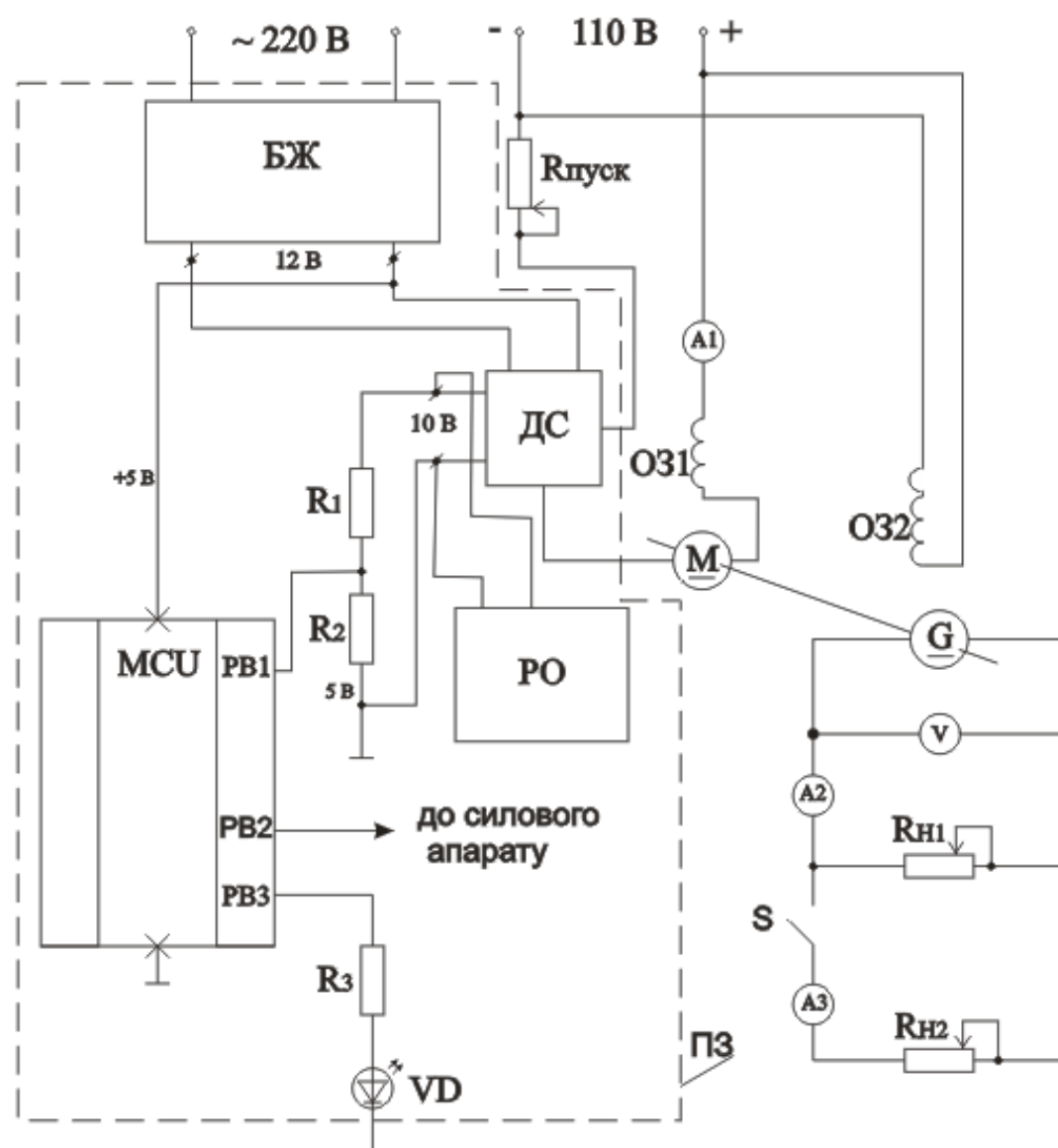


Рис. 4.5. Схема з двигуном послідовного збудження для випробування зразка захисного пристрою

На рис. 4.5:

M – двигун постійного струму послідовного збудження;

G – генератор постійного струму незалежного збудження;

$O31, O32$ – обмотки збудження двигуна та генератора відповідно;

$R_{\text{пуск}}$ – пусковий реостат;

R_{H1}, R_{H2} – навантажувальні реостати;

S – ключ;

$B3$ – блок захисту від перевантаження, що в свою чергу включає в себе:

MCU – мікроконтролер;

$ДС$ – датчик струму;

VD – світлодіод;

R_1, R_2 – подільник напруги;

PO – електронний осцилограф.

На валу двигуна для створення навантаження укріплено генератор постійного струму незалежного збудження.

Стенд дає можливість отримати залежності струму від часу при різних рівнях перевантажень електродвигуна.

При роботі стенда:

- напруга мережі постійного струму $U_M = 110 \text{ В}$;
- напруга мережі змінного струму 220 В – для подачі на блок живлення;
- струм якоря двигуна збільшився, починаючи від значення $I_{\text{ном}} = 6 \text{ А}$;
- Струм навантаження I_H двигуна під час експерименту збільшувався, змінюючись в інтервалі від значення $I_{\text{ном}} = 6 \text{ А}$ до 12 А .
- Значення початкового струму 6 А встановлюється з допомогою реостату R_{H1} . Збільшення струму в межах до 12 А здійснюється з допомогою реостату R_{H2} , підключеного паралельно до першого R_{H1} через ключ S . При різних значеннях R_{H2} буде різне значення швидкості зростання струму.

Також в роботі прийнято, що аварійний режим виник у той час, коли частота обертання електродвигуна була номінальною.

Реакція пристрою захисту на відповідне значення швидкості зростання струму і є перевіркою достовірності його роботи.

Структурна схема вказаного макетного зразка пропонуємого захисного пристрою показана на рис. 4.6.

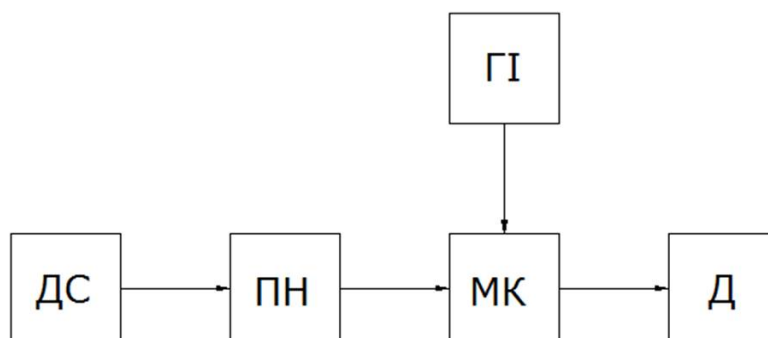


Рис. 4.6. Структурна схема макетного зразка захисного пристрою на базі мікропроцесорної техніки:

ГІ – генератор імпульсів; ДС – датчик струму; ПН – подільник напруги;
МК – мікроконтролер; Д – світлодіод

В якості елемента зчитування поточної інформації, а саме датчика струму, обрано датчик на ефекті Холла фірми LEM типу LA 100-P [92].

Поточна інформація, що надходить з датчика струму, обробляється за допомогою мікроконтролера. Саме тому вибір зупинено на мікроконтролері фірми Microchip – PIC12F675, що містить необхідний для забезпечення роботи всієї системи набір логічних елементів [69].

Для зменшення часу на обробку інформації до мікроконтролера передбачається підключення зовнішнього генератора тактових імпульсів з максимально дозволеною частотою 20 МГц (на схемі рис. 4.5 генератор тактових імпульсів не вказано). Це дозволяє отримати мінімально можливий час на обробку мікроконтролером одного пакету інформації – 36 мкс.

В якості індикатора спрацьовування пристрою захисту в даній схемі виступає світлодіод VD [100, 101].

Крім того схема, містить подільник напруги $R1 - R2$, який дозволяє знижувати напругу на вході каналу аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера до допустимого рівня – 5 В [69]. Застосовані в якості подільника напруги реостати.

Принцип роботи захисного пристрою полягає в наступному. Струм, який проходить по колу якоря електричного двигуна, фіксується у вигляді відповідної електрорушійної сили Хола (аналоговий сигнал) за допомогою датчика ДС, що пропорційна струму і магнітній індукції в проміжку магнітопроводу датчика. Мікроконтроллер, що під'єднаний до вихідних (1-2) клем датчика струму, за допомогою АЦП перетворює отриманий аналоговий сигнал у двійковий код – це перша точка відліку. Після обробки першої інформації операція повторюється безперервно. При цьому з допомогою мікроконтролера порівнюються швидкості зростання струму на проміжках заданого часу між сусідніми точками знімання інформації. Отримане значення різниці порівнюється з так званим еталонним значенням, уставкою. Уставка встановлюється з допомогою спеціально розробленої програми. Елемент програми для встановлення уставки наведено в додатку Р. У разі перевищення отриманого значення різниці $\frac{di}{dt}$ над еталонним значенням $\frac{di}{dt}$ пристрій захисту з виходу РВ2 подає сигнал на спрацьовування силового апарату, з допомогою якого силове коло розмикається. Одночасно з виходу РВ3 подається живлення на світлодіод VD, який сигналізує про спрацьовування пристрою захисту.

Алгоритм роботи захисного пристрою наведено на рис. 4.7.

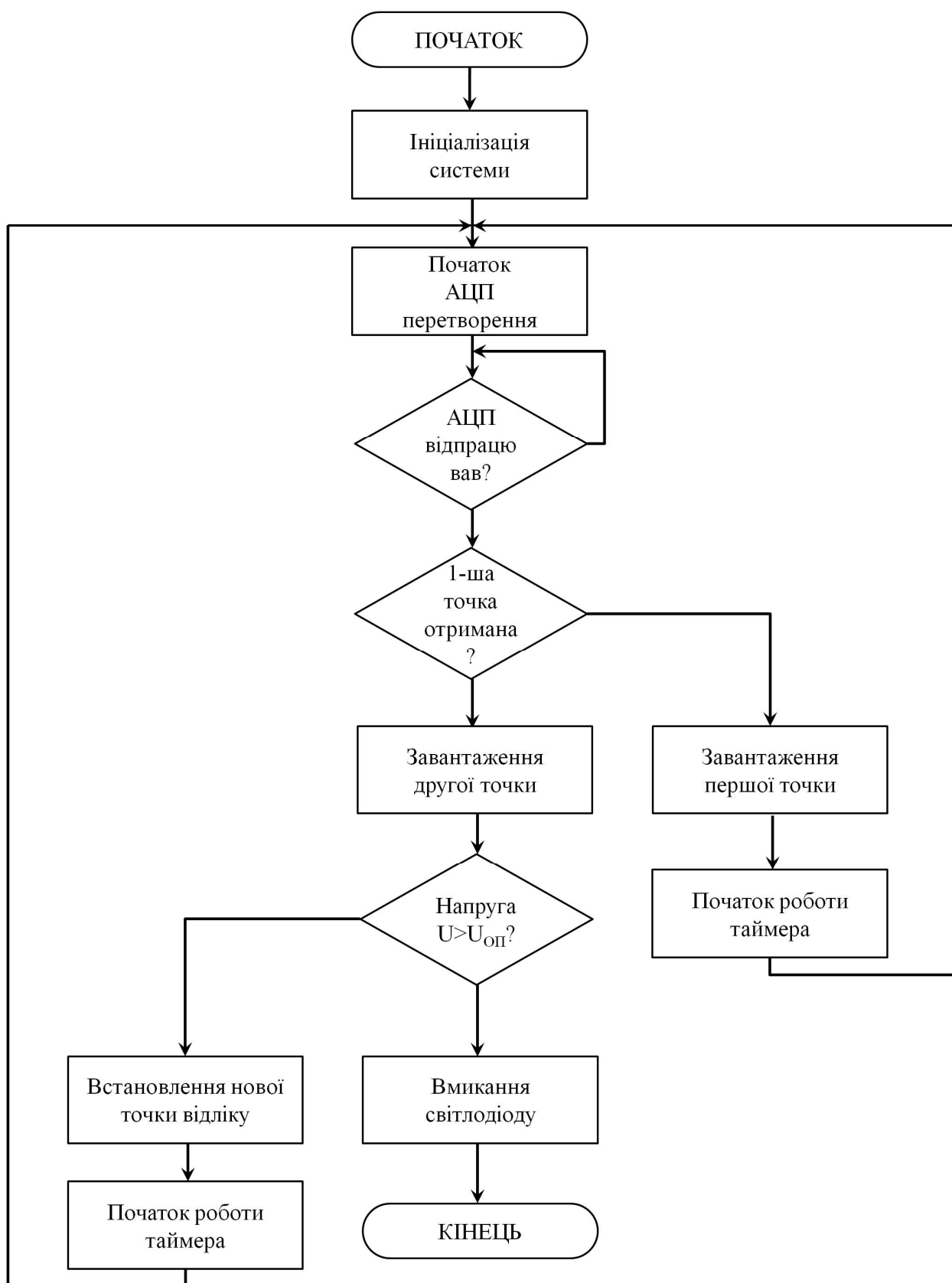


Рис. 4.7. Алгоритм роботи захисного пристрою

В результаті проведеного дослідження були отримані залежності струму від часу з різною швидкістю зміни струму перевантаження (відповідно при різних значеннях опору другого навантажувального реостату R_{H2}).

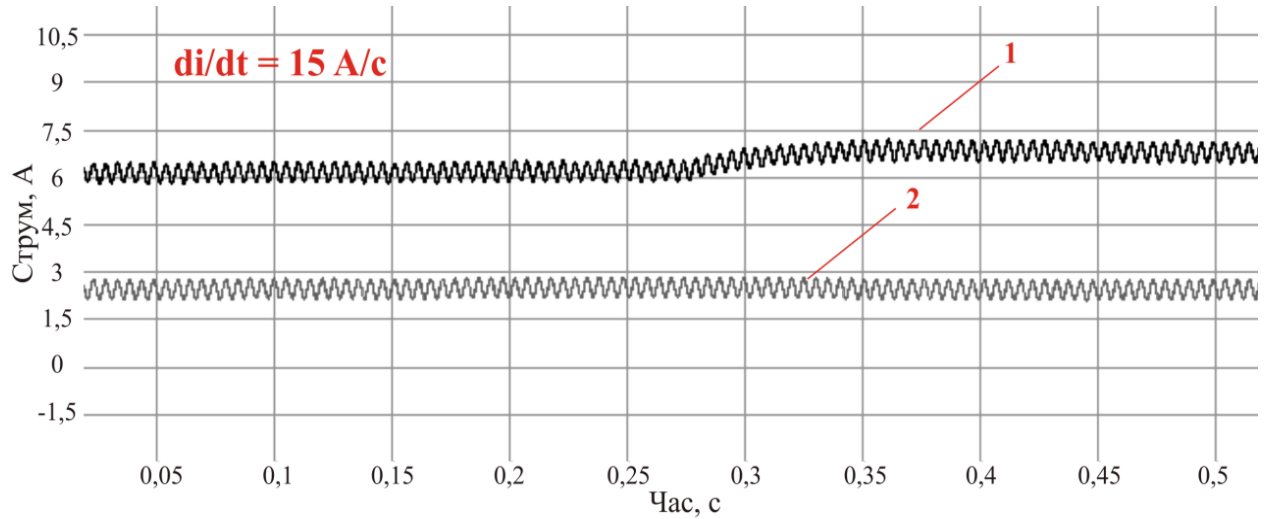


Рис. 4.8. Залежність струму від часу без спрацювання пристрою захисту

На рис. 4.8:

- 1 – залежність струму від часу при швидкості зміни струму $\frac{di}{dt} = 15 \text{ A/c}$;
- 2 – залежність, по вигляду якої визначається стан світлодіоду. Якщо світлодіод не загорається ($\frac{di}{dt} = 15 \text{ A/c}$ більше уставки), характеристика 2 проходить безперервно паралельно вісі абсцис (рис. 4.8).

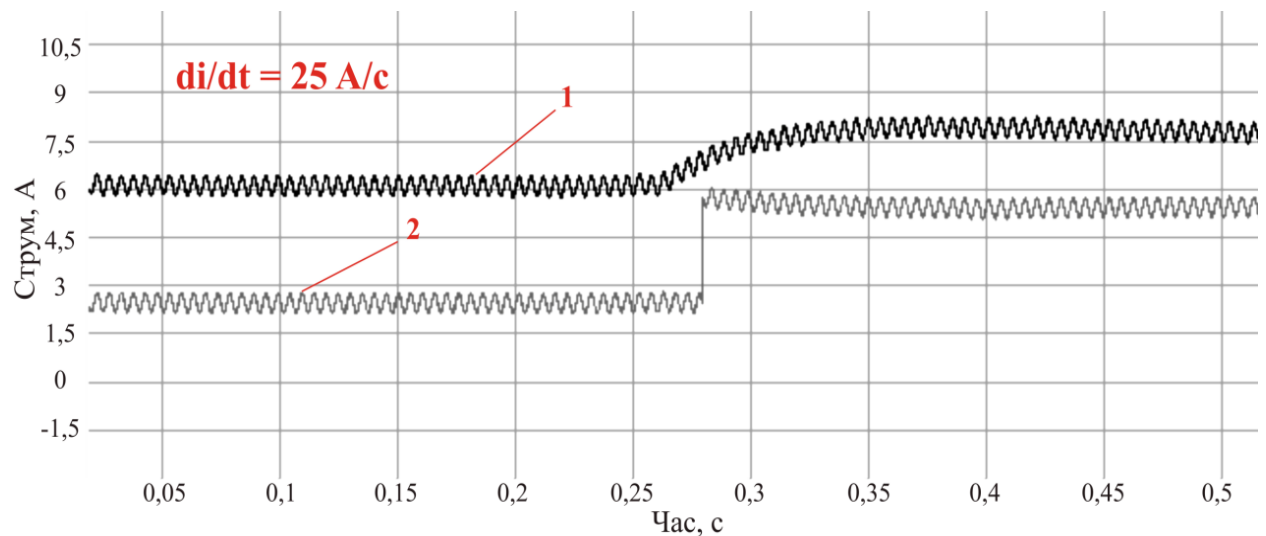


Рис. 4.9. Залежність струму від часу зі спрацюванням пристрою захисту

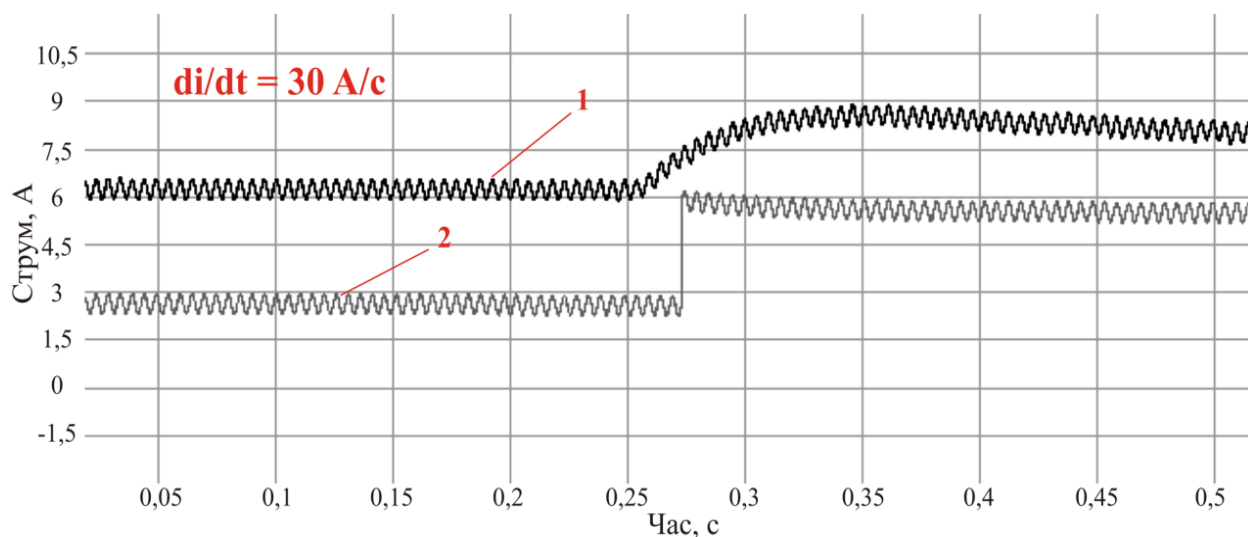


Рис. 4.10. Залежність струму від часу зі спрацюванням пристрою захисту

На рис. 4.9 та на рис. 4.10:

1 – залежність струму від часу при швидкості зміни струму $\frac{di}{dt} = 25 \text{ А/с}$ та

$\frac{di}{dt} = 30 \text{ А/с}$ відповідно;

2 – залежність, по вигляду якої визначається стан світлодіоду. Якщо світлодіод загорається ($\frac{di}{dt} = 25 \text{ А/с}$ менше уставки та $\frac{di}{dt} = 30 \text{ А/с}$ менше уставки) характеристика 2 змінюється стрибкоподібно (рис. 4.9, рис. 4.10).

Уставка пристрою захисту по швидкості зростання струму вибрана для всіх представлених випадків (рис. 4.8-4.10) 20 А/с .

З осцилограм видно, що система чітко реагує на величину швидкості зміни струму більшої порівняно з уставкою (рис. 4.9, 4.10) та не реагує на $\frac{di}{dt}$ менших, ніж уставка (рис. 4.8). При цьому, завдяки відповідному програмному налаштуванню мікроконтролера, виключається можливість хибного спрацювання системи при спадаючому характері струму навантаження.

Висока точність спрацювання досліджуваного пристрою забезпечується високою точністю спрацювання його складових частин (датчика струму, мікроконтролера).

З урахуванням того, що точність спрацьовування, наприклад, датчика струму, складає $\pm 0,7\%$, відхилення значення $\frac{di}{dt}$ від уставки при значенні уставки 20 А/с приблизно дорівнює $20 \cdot 0,007 = 0,14 \text{ А/с}$.

При встановленні уставки, яка дорівнює рекомендованому значенню $\frac{di}{dt}$ в режимі неповного короткого замикання, згідно з проведеними дослідженнями (розд. 3) запропонований пристрій може здійснювати захист кіл тягових електродвигунів від струмів КЗ (виконує функції існуючих диференційних реле).

При встановленні значення уставки більшого, ніж $\frac{di}{dt}$ в режимі пуску, але меншого, ніж $\frac{di}{dt}$ в режимі короткого замикання, запропонований пристрій може здійснювати захист кіл тягових електродвигунів від перевантаження (виконувати функції існуючих реле перевантаження).

Запропонований ПЗ може бути застосований замість всіх типів реле, що вказані в табл. 1.1 (розд. 1), тобто М.

При використанні в схемах захисту силових кіл електрорухомого складу уніфікованого пристрою захисту показники уніфікації покращуються.

Частота використання реле даного типу K_N буде дорівнювати одиниці, так як $N_j = N$. А для діючих ПЗ K_N дорівнює $(0,026...0,079)$ (розділ 1).

Коефіцієнт повторюваності $K_{II} = 38$, бо $M = 1$, а $N = 38$. А для діючих ПЗ $K_{II} = 2,92$.

Частота використання захисних реле даного типу з урахуванням кількості типів реле $K_M = 1$, бо $M = 1$. А для діючих ПЗ $K_M = 0,077$ (розд. 1).

4.3 Висновки до четвертого розділу

1. Вперше запропоновано уніфікований пристрій захисту від неповних коротких замикань в силових колах електрорухомого складу на базі сучасних мікроконтролерів, який має час спрацьовування на два порядки менше часу спрацьовування диференційних реле типу РДЗ-216, що застосовуються у теперішній час, та покращені параметри уніфікації.
 2. Створений спеціальний стенд для практичної перевірки точності спрацьовування запропонованого пристрою захисту відповідно до уставки по критерію di/dt та його швидкодії. Стендові випробування підтверджують більш кращі показники запропонованого пристрою захисту по вказаним параметрам в порівнянні з відповідними параметрами диференційного реле.
 3. Результати стендових випробувань вказують на доцільність застосування запропонованого пристрою захисту як з точки зору підвищення надійності захисного електрообладнання (зменшення часу спрацьовування, покращення показників уніфікації), так і з точки зору зменшення значення струму короткого замикання в колах тягових електродвигунів, що розмикаються захисними апаратами.
 4. При встановленні уставки, яка дорівнює рекомендованому значенню di/dt в режимі неповного короткого замикання згідно з проведеними дослідженнями (розд. 3) запропонований пристрій може здійснювати захист кіл тягових електродвигунів від струмів КЗ (виконує функції існуючих диференційних реле).
- При встановленні значення уставки більшого, ніж di/dt в режимі пуску, але меншого, ніж di/dt в режимі короткого замикання, запропонований

пристрій може здійснювати захист кіл тягових електродвигунів від перевантаження (виконувати функції існуючих реле перевантаження).

5. При використанні в схемах захисту силових кіл електрорухомого складу уніфікованого пристрою захисту показники уніфікації покращуються. Частота використання реле даного типу K_N буде дорівнювати одиниці, так як $N_j = N$. А для діючих ПЗ K_N дорівнює (0,026...0,079). Коефіцієнт повторюваності $K_{II} = 38$, бо $M = 1$, а $N = 38$. А для діючих ПЗ $K_{II} = 2,92$. Частота використання захисних реле даного типу з урахуванням кількості типів реле $K_M = 1$, бо $M = 1$. А для діючих ПЗ $K_M = 0,077$.
6. Запропонований пристрій доцільно використовувати для захисту кіл тягових електродвигунів, що сприяє підвищенню надійності захисту, зменшенню струму короткого замикання, який розривається захисними апаратами, і відповідно зменшенню пошкоджень електрообладнання.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

5.1. Технічна ефективність впровадження результатів роботи

Технічна ефективність результатів даної роботи зумовлена зменшенням значення струму КЗ, який проходить по силовому колу від моменту виникнення КЗ до моменту розриву кола за допомогою ШВ, а також підвищення показників уніфікації пристроїв захисту. При впровадженні запропонованих ПЗ цей струм буде суттєво менший, ніж при діючих ДР (рис. 5.1), а показники уніфікації низьковольтних пристроїв захисту значно вищі.

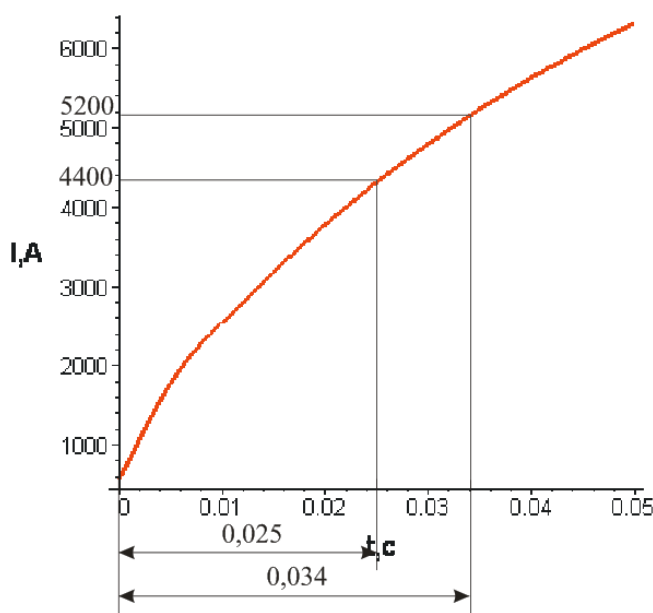


Рис. 5.1. Визначення максимального струму, що розривається контактами ШВ при діючих ДР та при запропонованому ПЗ

Максимальний струм, що розривається контактами ШВ при діючих ДР та при запропонованому ПЗ (рис. 5.1), визначено на прикладі залежності струму КЗ від часу в момент виникнення КЗ після двох обмоток якоря ТЕД та обмотки збудження (точка 3 на рис. 1.1).

Повний час спрацьовування t'_H захисту при ДР визначено наступним чином:

$$t'_{\Pi} = t_{\text{ШВ}} + t_{\text{ДР}}, \quad (5.1)$$

де $t_{\text{ШВ}} = 0,025$ с – час спрацьовування ШВ [17];

$t_{\text{ДР}} = 0,009$ с – час спрацьовування ДР [17].

Тоді $t'_{\Pi} = 0,025 + 0,009 = 0,034$ с.

Повний час спрацьовування захисту при використанні запропонованого ПЗ $t''_{\Pi} = t_{\text{ШВ}} = 0,025$ с бо час спрацьовування пропонуємого ПЗ складає усього 31,8 мкс (п. 4.1), тобто настільки малий, що ним можна знехтувати. Згідно з рис. 5.1 при $t'_{\Pi} = 0,034$ с максимальний струм, що розривається контактами ШВ при КЗ у точці 3, дорівнює 5200 А.

Відповідно у випадку виникнення КЗ у точці 3 при використанні пристрою захисту, розробленого автором, струм, що розмикається, дорівнює 4400 А.

Від значення струму КЗ залежить об'єм пошкоджень, які в основному зумовлені термічною дією струму короткого замикання. Термічна дія струму КЗ характеризується величиною $A_{\text{терм}}$ [3]:

$$A_{\text{терм}} \sim I_{\text{кз.сер}}^2 \cdot \Delta t_n, \quad (5.2)$$

де $I_{\text{кз.сер}}$ – середній струм КЗ, який проходить через електрообладнання на протязі певного інтервалу часу t_n .

При існуючому захисті і напрузі контактної мережі 3000 В:

$$A'_{\text{терм}} \sim I_{\text{кз.сер}}'^2 \cdot t'_n, \quad (5.3)$$

де $I_{\text{кз.сер}}'$ – середнє значення відключаємого струму КЗ при наявності ДР.

$$A'_{\text{терм}} \sim \left(\frac{5200}{2} \right)^2 \cdot 0,034 = 229840 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

При запропонованому пристрої захисту і напрузі контактної мережі 3000 В:

$$A''_{\text{терм}} \sim I''_{\text{кз.сер}}^2 \cdot t''_n, \quad (5.4)$$

де $I''_{\text{кз.сер}}$ – середнє значення відключаємого струму КЗ при наявності запропонованого пристрою захисту.

$$A''_{\text{терм}} \sim \left(\frac{4400}{2} \right)^2 \cdot 0,025 = 121000 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

Відношення середніх значень параметра $A_{\text{терм}}$ при новому пристрою захисту та при існуючому захисті:

$$\frac{121000}{229840} = 0,52.$$

5.2. Очікувана економічна ефективність впровадження результатів

Кількість непланових ремонтів тягових електродвигунів за один рік – 55 шт. [102].

Кількість непланових ремонтів електроапаратури – 60 шт. [102].

Разом: $55 + 60 = 115$.

По відношенню до загальної кількості непланових ремонтів: $\frac{115}{442} = 0,26$.

Загальний річний пробіг електровозів ВЛ8 та ДЕ1 відповідно:

$$18,86 + 1,29 = 20,15 \text{ млн. л. км.}$$

Затрачені кошти на позапланові ремонти: $1080,5 + 806,4 = 1886,9$ тис. грн.

Кошти на позапланові ремонти на млн. л. км. пробігу:

$$\frac{1886,9 \text{ тис. грн.}}{20,15 \text{ млн. л. км.}} = 93,6 \text{ тис. грн./млн. л. км.}$$

Кошти на позапланові ремонти на млн. л. км. пробігу для тягових електродвигунів та електроапаратури:

$$93,6 \text{ тис. грн./млн. л. км.} \cdot 0,26 = 24,23 \text{ тис. грн./млн. л. км.}$$

Відношення зменшення дії термічного струму при новому захисті:

$$(1 - 0,52) \cdot 0,95 = 0,456,$$

де 0,95 – частина забезпечення новим пристроєм захисту.

Зменшення вартості позапланових ремонтів на тягові електродвигуни та електроапаратуру кола двигунів при новому захисті на млн. л. км.:

$$24,23 \text{ тис. грн./млн. л. км.} \cdot 0,456 = 11 \text{ тис. грн./млн. л. км.}$$

Зменшення вартості позапланових ремонтів на тягові електродвигуни та електроапаратуру кола тягових двигунів по Укрзалізниці для електровозів ВЛ8 та ДЕ1 при запропонованому захисті (економічна ефективність):

$$11 \text{ тис. грн./млн. л. км.} \cdot 48,84 \text{ млн. л. км.} = 537,24 \text{ тис. грн.}$$

Прийнято, що половина отриманої економічної ефективності отримано внаслідок зменшення середнього струму термічної дії під час КЗ при запропонованому захисті. Тоді очікуваний економічний ефект при впровадженні нового захисту на електровозах ВЛ8 та ДЕ1 по Укрзалізниці складе:

$$537,24 \text{ тис. грн.} \cdot 0,5 = 268,62 \approx 269 \text{ тис. грн. на рік.}$$

При застосуванні запропонованого захисту на електровозах постійного струму інших типів та на електропоїздах, а також при врахуванні уніфікації низьковольтних ПЗ очікуваний економічний ефект збільшиться.

5.3. Висновки до п'ятого розділу

При застосуванні запропонованого пристрою захисту для захисту силових кіл ЕРС від струмів короткого замикання очікуваний економічний ефект складе 269 тис. грн на рік.

Результати досліджень рекомендується використовувати при модернізації діючого електрорухомого складу постійного струму, а також можуть використовуватись при розробці та проектуванні нових електровозів та електропоїздів постійного струму.

ВИСНОВКИ

У результаті виконаних теоретичних і практичних досліджень розроблено рекомендації щодо підвищення ефективності захисту силових електричних кіл електрорухомого складу постійного струму від коротких замикань. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертаційної роботи полягають такі:

1. У роботі проведений аналіз існуючих захисних пристроїв різних типів за показниками швидкодії та уніфікації. З аналізу видно, що на даний момент для захисту силових кіл від аварійного режиму короткого замикання використовуються електромеханічні реле, які мають низьку швидкодію (щоб повністю розімкнути силове коло у разі виникнення неповного короткого замикання, потрібно приблизно 0,034 с за швидкості його зростання $6 \cdot 10^6$ А/с) та уніфікацію (коефіцієнти частоти використання, повторюваності та частоти використання захисних реле даного типу з урахуванням кількості типів реле складають відповідно лише (0,026...0,079); 2,92; 0,077. Сьогодні одним із шляхів підвищення ефективності захисних апаратів ЕРС за рахунок збільшення їх швидкодії та покращення уніфікації є застосування пристроїв захисту, що виконані на сучасній мікропроцесорній елементній базі. При цьому як контролюємий параметр доцільно прийняти значення швидкості зміни струму di/dt у різних режимах роботи ЕРС. Для отримання рекомендацій по розробці таких пристроїв потрібно провести відповідні дослідження з урахуванням впливу вихрових струмів та динамічної індуктивності на значення di/dt .
2. Розроблена математична модель для дослідження перехідних процесів під час короткого замикання, з допомогою якої встановлено, що швидкість зміни струму потрібно визначати з урахуванням дії вихрових струмів у магнітопроводі ТЕД та динамічної індуктивності обмоток

збудження, оскільки вплив вказаних факторів на значення $\frac{di}{dt}$ суттєвий. Інтервал часу, на якому визначається значення $\frac{di}{dt}$, потрібно брати від моменту виникнення короткого замикання протягом 0,0001 с (0,0001 с визначається параметрами сучасних мікроконтролерів).

3. Встановлено, що значення $\frac{di}{dt}$ в експлуатаційних та аварійних режимах відрізняються суттєво. Тому захист від короткого замикання можна побудувати на принципі контролю значень $\frac{di}{dt}$, тобто як уставку пристрою захисту використати певне значення $\frac{di}{dt}$.
4. Вперше з використанням елементів теорії імовірності та математичної статистики запропоновано метод визначення мінімального значення уставки спрацьовування мікропроцесорних пристроїв захисту кіл тягових електродвигунів електрорухомого складу постійного струму від коротких замикань за критерієм – швидкість зростання струму.
5. Вперше визначено закон розподілу швидкостей зростання струму в різних умовах виникнення короткого замикання у колі тягових електродвигунів із метою вибору уставки нового пристрою захисту щодо швидкості зростання струму. Дослідження показали, що уставку датчика контролю значень $\frac{di}{dt}$ пристрою захисту доцільно встановити за мінімальним значенням $\frac{di}{dt} = 50 \cdot 10^3$ А/с (для електровоза ДЕ1) та $\frac{di}{dt} = 240 \cdot 10^2$ А/с (для електровоза ВЛ8), що відповідає мінімальній напрузі контактної мережі 2200 В.
6. Вперше запропоновано уніфікований пристрій захисту від неповних коротких замикань у силових колах електрорухомого складу на базі сучасних мікроконтролерів, який має час спрацьовування на два порядки

менше часу спрацьовування диференційних реле РДЗ 216, що застосовуються сьогодні, та покращені параметри уніфікації.

7. Стендові випробування запропонованого захисного пристрою на базі мікроконтролера підтвердили його працездатність, підвищену швидкодію в порівнянні з традиційними пристроями захисту.
8. З використанням у схемах захисту силових кіл електрорухомого складу уніфікованого пристрою захисту показники уніфікації покращуються. Частота використання реле даного типу K_N буде дорівнювати одиниці, так як $N_j = N$. А для діючих ПЗ K_N дорівнює (0,026...0,079). Коефіцієнт повторюваності $K_{II} = 38$, бо $M = 1$, а $N = 38$. А для діючих ПЗ $K_{II} = 2,92$. Частота використання захисних реле даного типу з урахуванням кількості типів реле $K_M = 1$, бо $M = 1$. А для діючих ПЗ $K_M = 0,077$.
9. Запропонований пристрій захисту може бути використаний на всіх видах електрорухомого складу після проведення відповідних досліджень для визначення уставки за критерієм швидкості зростання струму.
10. Від застосування запропонованого пристрою для захисту силових кіл ЕРС від струмів короткого замикання очікуваний економічний ефект по Укрзалізниці складе 269 тис. грн на рік. Застосування запропонованого захисту на електровозах постійного струму інших типів та на електропоїздах, врахування уніфікації низьковольтних пристроїв захисту збільшить очікуваний економічний ефект.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Устройство и ремонт электровозов постоянного тока. Учебн. для техн. школ ж.-д. трансп. / С. А. Алябьев и др. – М.: «Транспорт», 1977. – 464 с.
2. Таев И. С. Электрические аппараты автоматики и управления / И. С. Таев. – М.: Высш. шк., 1975. – 224 с.
3. Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов (Общие вопросы проектирования): учебн. пос. для студ. электротехн. вузов. / П. В. Сахаров. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
4. Тихменев Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты: учебн. для вузов ж.-д. трансп. / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – [4-е изд., доп. и перераб.]. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
5. Головатый А. Т. Электроподвижной состав. Эксплуатация. Надежность. Ремонт. / А. Т. Головатый, И. П. Исаев, П. И. Борцов. – М.: Транспорт, 1983. – 350 с.
6. Захарченко Д. Д. Тяговые электрические машины: учебн. для вузов ж.-д. трансп. / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.
7. Висин Н. Г. Модернизация силовой схемы электровоза ДЭ1 / Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, А. И. Кийко, В. В. Ковалев – Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.
8. Дубинец Л. В. Научное обоснование и разработка систем управления электроподвижным составом на основе применения герконовых устройств: дис. доктора техн. наук: 05.09.03 / Дубинец Леонид Викторович – Д., 1991. – 356 с.
9. Могилевский Г. В. Полупроводниковые аппараты защиты / Г. В. Могилевский, В. Е. Райнин, В. И. Гребенник. – М.: Энергия, 1980. – 166 с.
10. Гаевенко Ю. А. Новые реле защиты на полупроводниках / Ю. А. Гаевенко. – К.: Гос. изд-во техн. лит-ры УССР, 1962. – 211 с.

11. Линт Г. Э. Релейная защита на унифицированных полупроводниковых элементах / Г. Э. Линт. – М.: Энергия, 1977. – 88 с.
12. Грищук Ю. С. Аналіз надійності мікропроцесорних пристроїв релейного захисту / Ю. С. Грищук, Р. Ф. Тимошенко // Вісник нац. техн. ун-ту «ХПІ». – 2010. – №16. – С. 21-28.
13. Апараты електричні тягові. Загальні технічні умови: ДСТУ 2773-94 (ГОСТ 9219-95); Введ.01.07.96. - К.: Держстандарт України, 1996. – 74 с.
14. Карзова О. О. Визначення експлуатаційних показників електричних апаратів кіл керування та захисту рухомим складом залізниць / О. О. Карзова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 20. – С. 54-57.
15. Зменшення кількості запасних реле для забезпечення безперервного ремонту рухомого складу залізниць / О. О. Карзова та ін. // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2007. – № 78. – С. 22-25.
16. Вимоги до швидкодії захисних апаратів в електричних колах рухомого складу залізниць / О. О. Карзова та ін. // Вісн. НТУ «ХПІ». Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 4. – С. 13-14.
17. Электровоз магистральный ДЭ-1. Техническое описание. ЗТП.000.020-03 ТО. – 1999. – 188 с.
18. Пацеура В. И. О временных характеристиках быстродействующих выключателей с индуктивными шунтами / В. И. Пацеура // Электровозостроение. – 1974. – Том 15. – С. 112-121.
19. Проектирование систем управления электроподвижным составом / [Н. А. Ротанов, Д. Д. Захарченко, А. В. Плакс и др.]: под ред. Н. А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1986. – 327 с.
20. Электровоз ВЛ8. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1982. – 320 с.
21. Раков В. А. Пассажирский электровоз ЧС2 / В. А. Раков. – М.: «Транспорт», 1976. – 320 с.

22. Электровоз ЭП2К. Руководство по эксплуатации ЭП2К.00РЭ в 3-х частях. Часть 1. Техническое описание. ОАО «Коломенский завод», 2007. – 464 с.
23. Цукало П. В. Электропоезда ЭР2 и ЭР2^Р / П. В. Цукало, Н. Г. Ерошкин. – М.: «Транспорт», 1986. – 359 с.
24. Электропоезд ЭПЛ2Т. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Описание и работа. 1115.00.00.000 РЭ. – 99 с.
25. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002-89. Введ. 01.07.90. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
26. Болдин Л. А. Основы взаимозаменяемости и стандартизации в машиностроении / Л. А. Болдин. – М.: Машиностроение, 1984. – 271 с.
27. Муха А. Н. Повышение надежности эксплуатируемого электроподвижного состава путем применения релейной аппаратуры на современной элементной базе / А. Н. Муха // Вісн. Харк. держ. політехн. ун-ту. Збірник наук. праць. - 2000. – Вип. 113. - С. 222-224.
28. Карзова О. О. Покращення властивостей захисних реле кіл тягових машин / О. О. Карзова, Ю. О. Кіліянчук // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук.-практ. конф., 24-25 травня 2007 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2007. – С. 82.
29. Пат. 33056 UA, МПК' (2006) H01H 83/00. Электронный блок захисту двигуна компресора електропоїзда постійного струму / О. О. Карзова, Р. В. Краснов, А. М. Муха (UA). – № у 2008 01329; заявл. 04.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.
30. Пат. 65719 UA, МПК' (2011.01) H01H 83/00. Электронный блок захисту тягових електродвигунів електровоза постійного струму / О. О. Карзова (UA). – № у 2011 06857; заявл. 31.05.2011; опубл. 12.12 2011, Бюл. № 23.
31. Электровоз ВЛ11м. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1994. – 416 с.

32. Малыхин А. П. Электровоз ВЛ23 без рекуперации: инструкц. книга / А. П. Малыхин. – М.: Всесоюзн. издательско-полиграф. объедин. минист. путей сообщения, 1960. – 218 с.

33. Электровозы ВЛ10 и ВЛ10у. Руководство по эксплуатации. / под ред. О. А. Кикнадзе. – М.: Транспорт, 1981. – 519 с.

34. Уніфікація реле – ефективний шлях підвищення надійності систем керування рухомим складом у сучасних умовах / О. О. Карзова та ін. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 12. – С. 34-35.

35. Лозановский А. Л. Классификация переходных режимов, возникающих в силовых цепях электроподвижного состава / А. Л. Лозановский // Электровозостроение. – 1965. – Том 6. – С. 79-83.

36. Лозановский А. Л. Оценка максимальной допустимой величины токов тяговых двигателей электровозов в нестационарных режимах / А. Л. Лозановский // Электровозостроение. – 1966. – Том 7. – С. 59-67.

37. Марквардт К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог / К. Г. Марквардт. – [2-е перераб. и доп. изд.]. – М.: Гос. трансп. ж.-д. издательство, 1958. – 275 с.

38. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. для энергоэнерг. спец. вузов, / В. А. Веников. – [изд. 4-е, перераб. и доп.]. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

39. Лозановский А. Л. Исследование нестационарных токовых режимов в силовых цепях электровозов методами физического моделирования / А. Л. Лозановский // Электровозостроение. – 1962. – Том 2. – С. 35-59.

40. Суровиков А. А. Выбор и исследование схем, имитирующих переходные процессы в тяговых двигателях. / А. А. Суровиков // Электровозостроение. – 1965. – Том 6. – С. 168-177.

41. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах / Р. Рюденберг. – М.: Изд. иностр. лит-ры, 1959. – 714 с.

42. Жиц М. З. Анализ переходных процессов в машинах постоянного тока / М. З. Жиц // Электротехника. – 1965. – №9. – С. 14-16.
43. Жиц М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока / М. З. Жиц. – М.: Энергия, 1974. – 112 с.
44. Крылов О. А. Математическое моделирование электрических машин постоянного тока / О. А. Крылов, Л. В. Мазия // Электротехника. – 1967. – № 1. – С. 28-32.
45. Саенко Н. Л. Метод определения максимального значения тока якоря тягового двигателя в переходных режимах / Н. Л. Саенко, Л. М. Лобанов // Электровозостроение. – 1971. – Т. 13. – С.64-73.
46. Файнберг М. Ю. О методе расчета тока короткого замыкания двигателя постоянного тока / М. Ю. Файнберг, О. А. Орел // Электротехника. – 1972. – № 2. – С. 35-37.
47. Метод расчета переходных процессов в электрических цепях с машинами постоянного тока / С. И. Карибов и др. // Электротехника. – 1980. – №3. – С. 23-27.
48. Фетисов В. В. Расчет переходных процессов в цепи возбуждения машин постоянного тока с учетом вихревых токов в массивных участках магнитопровода / В. В. Фетисов, И. Ю. Седова // Электротехника. – 1992. – № 2. – С. 50-53.
49. Канов Л. Н. Анализ переходных процессов в электрических машинах постоянного тока методом схемного моделирования / Л. Н. Канов // Электротехника и Электромеханика. – 2004. – № 3. – С. 34-37.
50. Міщенко Т. М. Підвищення ефективності роботи системи захисту силових кіл електровозу ДЕ 1 на основі досліджень перехідних аварійних електромагнітних процесів: дис. кандидата техн. наук: 05.22.09 / Міщенко Тетяна Миколаївна. – Д., 2007. – 208 с.
51. Чорний О. П. Моделювання електромеханічних систем / О. П. Чорний, А. В. Луговий, Д. Й. Родькін. – Кременчук, 2001. – 410 с.

52. Проектирование тяговых электрических машин: учебн. пособ. для вузов ж.-д. трансп. / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, В. И. Бочаров, М. А. Козорезов. – [изд. 2-е, перераб. и доп.]. – М.: «Транспорт», 1976. – 624 с.

53. Жуков В. В. Короткие замыкания в электроустановках постоянного тока / В. В. Жуков. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 160 с.

54. Пиотровский Л. М. Электрические машины / Л. М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1974. – 504 с.

55. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины (теория, конструкция, проектирование) / А. Б. Иоффе. – [2-е изд., доп. и перераб.]. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 232 с.

56. Величко Т. В. Теория электропривода. Ч. 1. Механика и характеристики двигателей в электроприводе: учебн. пособ. / Т. В. Величко, Д. И. Родькин. – Кременчуг: 1999. – 237 с.

57. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода: учебн. для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – [6-е изд., доп. и перераб.]. – М.: Энергоиздат, – 1981. – 576 с.

58. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

59. Осипов С. И. Основы тяги поездов: учебн. для студ. техникумов и колледжей ж. д. тр-та / С. И. Осипов, С. С. Осипов. – М.: УМК МПС России, 2000. – 592 с.

60. Математична модель електропривода поршневого компресора з двигуном ДК 406 (ДК 409) електропоїзда ЕР 2 / О. О. Карзова та ін. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 17. – С. 64-65.

61. Карзова О. О. Визначення швидкості зміни струму у колах тягових двигунів електрорухомого складу при різних режимах роботи / О. О. Карзова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – № 24. – С. 57-60.

62. Тулупов В. Д. Автоматическое регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава. – М.: Транспорт, 1976. – 368с.
63. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – [3-е изд., перер. и доп.]. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
64. Бернас С. Математические модели элементов электроэнергетических систем / С. Бернас, З. Цек; [Пер. с польского]. – М.: Энергоиздат, 1982.–312с.
65. Макаров Е. Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс / Е. Г. Макаров. – СПб.: Питер, 2005. – 448 с.
66. Постников И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / И. М. Постников. – М.: 1975. – 319 с.
67. Ермолин Н. П. Переходные процессы в машинах постоянного тока. / Н. П. Ермолин. – М.: Энергия, 1974. – 114 с.
68. Кублановский Я. С. Переходные процессы / Я. С. Кублановский. – М.: «Энергия», 1974. – 88 с.
69. PIC12F6XX: 8-выводные высокопроизводительные FLASH-микроконтроллеры. Техническая документация [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <http://www.microchip.ru/cdrom/ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41190c.pdf>.
70. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75. – [чинний від 1977-01-01]. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 6 с.
71. Безрученко В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу: навч. посібник / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
72. Радченко В. Д. Перенапряжения и токи короткого замыкания в устройствах электрифицированных железных дорог постоянного тока / В. Д. Радченко, С. Д. Соколов, Н. Д. Сухопрудский. – М.: Гос. трансп. железнодорож. изд-во, – 1959. – 273 с.

73. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электромашины и трансформаторы / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков, П. Н. Шляхто. – М.: «Транспорт», 1968. – 296 с.
74. Ламмеранер Йржи Вихревые токи, перевод с чешского / Йржи Ламмеранер, Милош Штафль. – М.-Л.: «Энергия», 1967. – 208 с.
75. Василенко Г. В. Об изменении магнитного потока в тяговом двигателе при переходных процессах / Г. В. Василенко // Электровозостроение. – 1990. Т. 31. – С. 33-36.
76. Винокуров В. А. Электрические машины железнодорожного транспорта: учебн. для вузов / В. А. Винокуров, Д. А. Попов. – М.: Транспорт, 1986. – 511 с.
77. Вольдек В. И. Электрические машины / В. И. Вольдек. – М.: Высш. шк., 1974. – 832 с.
78. Дьяконов В. Maple 7: Учебный курс / В. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002. – 672 с.
79. Карзова О. О. Вплив вихрових струмів на швидкість струму при коротких замиканнях в силових колах електрорухомого складу / О. О. Карзова // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 квітня 2010 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2010. – С. 92-93.
80. Дубинець Л. В. Швидкість зміни струму при короткому замиканні в силових колах електрорухомого складу з урахуванням вихрових струмів / Л. В. Дубинець, О. О. Карзова, Ю. С. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 34. – С. 69-72.
81. Карзова О. О. Вплив індуктивності мережі на швидкість зміни струму в колі тягових електродвигунів електровозу постійного струму під час короткого замикання / О. О. Карзова // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук.-практ. конф., 19-20 квітня 2012 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2012. – С. 91-92.

82. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями / [Солодунов А. М., Иньков Ю. М., Коваливкер Г. Н., Литовченко В. В.]; под ред. А. М. Солодунова. – Рига: Зинантне, 1991. – 351с.

83. Большая энциклопедия транспорта: в 8 т. / [гл. ред. Конарев Н. С.]. – М.: Науч. из-во «Большая Российская энциклопедия», 2003 – Т. 4. – 2003. – 1039 с.

84. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. / Е. С. Вентцель. – [4-е изд.]. – М.: «Наука», 1969. – 576 с.

85. Гмурман В. Б. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учеб. пособие для студентов вузов / В. Е. Гмурман. – [9-е изд.]. – М.: Высш. шк., 2004. – 404 с.

86. Гнеденко Б. В. Элементарное введение в теорию вероятностей / Б. В. Гнеденко, А. Я. Хинчин. – М.: «Наука», 1970. – 169 с.

87. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебн. для вузов / Н. Ш. Кремер. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.

88. Карзова О. О. Метод визначення уставки спрацьовування апаратів захисту від коротких замикань у силових колах електрорухомого складу / О. О. Карзова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 38. – С. 90-94.

89. Андронов А. М. Теория вероятностей и математическая статистика: учебн. для вузов. / А. М. Андронов, Е. А. Копытов, Л. Я. Гринглаз. – СПб.: Питер, 2004. – 461 с.

90. Дубинець Л. В. Уніфікований блок захисту допоміжних машин рухомого складу залізниць / Л. В. Дубинець, А. М. Муха, О. О. Карзова – (Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин та апаратів. Теорія та практика) // Вісн. НТУ ХПІ. Збірник наук. праць. – 2008. – № 7. – С. 52-55.

91. Карзова О. А. Повышение надежности защитных устройств цепей тяговых машин / О. А. Карзова, Л. В. Дубинець, С. Ю. Ославский //

«Трансбалтика 2009»: межд. науч. конф., 22-23 апреля 2009 г.: тезисы докл. (Вильнюс 2009) – Д.: ДНУЗТ, 2009. – С. 27-29.

92. Техническая документация на датчики тока и напряжения LEM [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <http://www.lem.com/docs/products/la%20100-p%20e.pdf>.

93. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: учебн. для вузов. / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

94. ГОСТ 2582-81 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – М., 1981. – 38 с.

95. Справочник по электрическим машинам. Том 2 / под. общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.

96. Костенко М. П. Электрические машины. Специальная часть. / М. П. Костенко. – Л.-М.: Госэнергоиздат, – 949. – 712 с.

97. Карзова О. О. Пристрій захисту силових кіл електрорухомого складу на новій елементній базі / О. О. Карзова // Вісн. НТУ «ХПІ». – 2011. – № 34. – С. 116-119.

98. Карзова О. О. Застосування математичної моделі для аналізу силових кіл електровозів постійного струму / О. О. Карзова // «Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро – 2010»: міжнар. наук.-практ. конф., 27-30 вересня 2010 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2010. – С. 16-17.

99. Карзова О. О. Перевірка відповідності математичної моделі режиму перевантаження / О. О. Карзова, Ю. С. Бондаренко // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук.-практ. конф., 14-15 квітня 2011 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2011. – С. 109-110.

100. Сосков А. Г. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита / А. Г. Сосков, И. А. Соскова. – К.: Каравелла, 2005. – 344 с.

101. Электротехнический справочник. / под ред. В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др. В 3-х томах Т.1. – М.: Энергия, 1980. – 520 с.

102. Анализ использования рабочего времени локомотивных бригад за 10 м. 2011 г. Укрзалізниця. Управління Придніпровської залізниці. Служба локомотивного господарства. – Д., 2011 – 15 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Дослідження перехідного процесу при короткому замиканні в силовому колі електровоза ДЕ 1

Сумарний індуктивний опір кола тягового електродвигуна:

$$L_{\text{екв}} = 0,00156 \text{ Гн}$$

$$L_{\text{оз}} = 0,0049 \text{ Гн}$$

Сумарний активний опір кола тягового електродвигуна

$$R_{\text{екв}} = 0,0674 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{оз}} = 0,0253 \text{ Ом}$$

Апроксимація характеристики намагнічування:

$$\text{Ce}\Phi(I_1) := \begin{cases} (1.714) & \text{if } 565 \leq I_1 \leq 800 \\ (1.75) & \text{if } 800 < I_1 \leq 1000 \\ (1.78) & \text{if } 1000 < I_1 \leq 1200 \\ 1.78 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Тягові електродвигуни з'єднані послідовно, напруга контактної мережі 3000 В.

Частота обертання вала тягового електродвигуна, $n_{\text{я}} := 183.6 \text{ об/хв}$

Номінальний струм, $I = 565 \text{ А}$

$$fD1(t, I) := \left(\frac{1}{L_{\text{я}}} \right) \cdot U_{\text{м}} - \left(\frac{\text{Ce}\Phi(I_1)}{L_{\text{я}}} \right) \cdot n - \left(\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} \right) \cdot (I_1)$$

$$t_1 := 0 \quad \text{tend} := 5 \quad N_{\text{я}} := 1000$$

$$\text{MR} := \text{Rkadapt}(v_{\text{NU}}, t_1, \text{tend}, N, fD1)$$

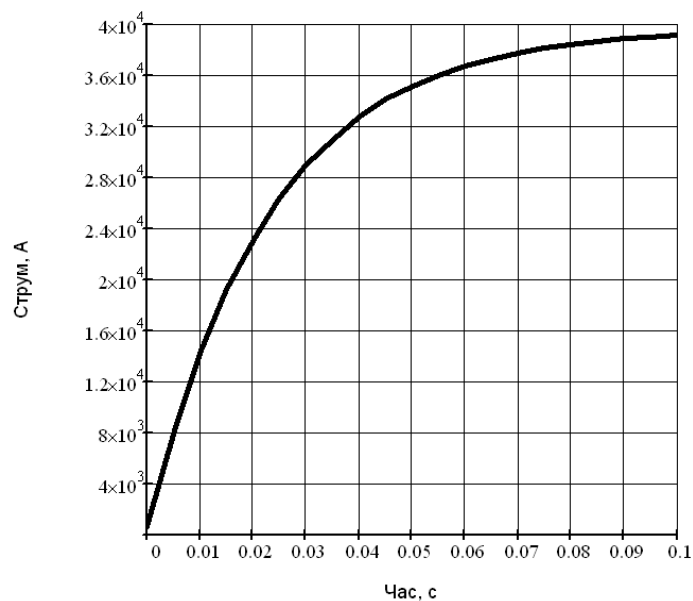


Рис. А.1. Крива неповного короткого замикання після першої обмотки якоря

Додаток Б
Виведення ступенів пускових реостатів при пуску електровоза ДЕ1
на послідовному з'єднанні тягових електродвигунів

$I_{\text{ТД}}$, А		100	200	300	400	500	520	565	600	700	800	$I_{\text{ТД}}$, А при V=0	З'єднання ТЕД
№	$R_{\text{пуск}}$, Ом	Швидкість електровозу V, км/год											
1	15.2880	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	188	«С»
2	15.2880	19.5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	187	
3	11.6080	24.7	3.9	---	---	---	---	---	---	---	---	242	
4	9.4480	27.7	7.1	---	---	---	---	---	---	---	---	293	
5	7.9280	29.8	9.4	2.2	---	---	---	---	---	---	---	344	
6	6.9000	31.2	10.9	4.0	---	---	---	---	---	---	---	390	
7	5.9480	32.6	12.3	5.6	1.5	---	---	---	---	---	---	446	
8	4.9968	33.9	13.7	7.3	3.5	0.5	---	---	---	---	---	519	
9	4.2680	34.9	14.8	8.6	4.9	2.2	1.7	0.6	---	---	---	594	
10	3.7060	35.7	15.7	9.5	6.1	3.5	3.0	2.0	1.3	---	---	668	
11	3.3190	36.3	16.2	10.2	6.8	4.4	4.0	3.0	2.4	0.5	---	731	
12	2.9320	36.8	16.8	10.9	7.6	5.3	4.9	4.0	3.4	1.7	0.1		
13	2.5838	37.3	17.3	11.5	8.3	6.1	5.7	4.9	4.3	2.7	1.2		
14	2.2356	37.8	17.9	12.1	9.0	6.9	6.5	5.7	5.2	3.7	2.4		
15	1.9602	38.2	18.3	12.5	9.6	7.6	7.2	6.4	5.9	4.5	3.3		
16	1.6848	38.6	18.7	13.0	10.1	8.2	7.8	7.1	6.6	5.4	4.1		
17	1.5024	38.8	19.0	13.3	10.5	8.6	8.3	7.6	7.1	5.9	4.7		
18	1.3200	39.1	19.2	13.7	10.8	9.0	8.7	8.0	7.6	6.4	5.3		
19	1.0440	39.4	19.6	14.1	11.4	9.7	9.4	8.7	8.3	7.2	6.2		
20	0.7688	39.8	20.1	14.6	12.0	10.3	10.0	9.4	9.0	8.1	7.1		
21	0.5716	40.1	20.3	14.9	12.4	10.8	10.5	9.9	9.6	8.6	7.7		
22	0.3744	40.4	20.6	15.3	12.8	11.2	10.9	10.4	10.1	9.2	8.4		
23	0.1872	40.6	20.9	15.6	13.1	11.7	11.4	10.9	10.6	9.8	9.0		
24	0.0000	40.9	21.2	15.9	13.5	12.1	11.8	11.3	11.1	10.3	9.6		

Додаток В

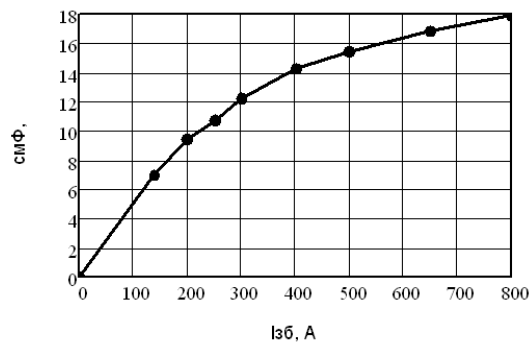
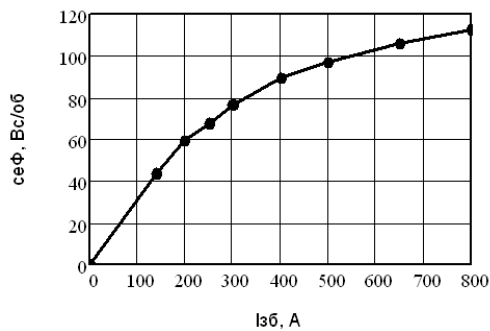
Реостатний пуск ТЕД електровозу ДЕ 1

Число пар полюсів		$p := 2$
Номинальна напруга живлення, В		$U_{\text{дв}} := 1500$
Номинальний струм якірного кола, А		$I_{\text{я}} := 565$
Номинальна швидкість обертання валу двигуна, 1/с		$\omega_{\text{дв}} := 87.92$
Частота обертання, об/хв		$n := 840$
Активний опір кіл обмоток збудження, Ом		$R_{\text{оз}} := 0.0253$
Активний опір якірного кола, Ом		$R_{\text{екв}} := 0.0674$
Індуктивний опір кіл обмоток збудження, Гн		$L_{\text{оз}} := 4.9 \cdot 10^{-3}$
Індуктивний опір якірного кола, Гн		$L_{\text{екв}} := 1.56 \cdot 10^{-3}$
Радіус якоря, м		$r_{\text{я}} := 0.37$
Довжина пакету якоря, м		$h_{\text{я}} := 0.43$
Густина, кг/м ³		$\gamma := 7800$
Радіус шестерні, м		$r_{\text{ш}} := 0.1265$
Довжина шестерні, м		$h_{\text{ш}} := 0.1$
Радіус зубчатого колеса, м		$r_{\text{зк}} := 0.484$
Довжина зубчатого колеса, м		$h_{\text{зк}} := 0.1$
Радіус колісної пари, м		$r_{\text{кп}} := 0.625$
Довжина колісної пари, м		$h_{\text{кп}} := 0.3175$
Маса електровозу, кг		$P := 188000$
Маса поїзду, кг		$Q := 4 \cdot 10^6$
Кількість тягових двигунів, шт.		$N := 8$
Швидкість поїзду, м/с		$V := 14.36$
Число зубців шестерні		$N_{\text{ш}} := 23$
Число зубців зубчатого колеса		$N_{\text{зк}} := 88$
Передаточне відношення:	$i_{\text{ред}} := \frac{N_{\text{зк}}}{N_{\text{ш}}}$	$i_{\text{ред}} = 3.826$
Момент інерції якоря:	$J_{\text{я}} := \frac{\pi \cdot r_{\text{я}}^2 \cdot h_{\text{я}} \cdot \gamma \cdot r_{\text{я}}^2}{2}$	$J_{\text{я}} = 98.739 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2$
Момент інерції шестерні:	$J_{\text{ш}} := \frac{\pi \cdot r_{\text{ш}}^2 \cdot h_{\text{ш}} \cdot \gamma \cdot r_{\text{ш}}^2}{2}$	$J_{\text{ш}} = 0.314 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2$
Момент інерції зубчатого колеса:	$J_{\text{зк}} := \frac{\pi \cdot r_{\text{зк}}^2 \cdot h_{\text{зк}} \cdot \gamma \cdot r_{\text{зк}}^2}{2}$	$J_{\text{зк}} = 67.235 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2$

Момент інерції колісної пари: $J_{\text{кп}} := \frac{\pi \cdot r_{\text{кп}}^2 \cdot h_{\text{кп}} \cdot \gamma \cdot r_{\text{кп}}^2}{2}$ $J_{\text{кп}} = 593.579 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Приведений момент інерції: $J_{\text{прив}} := 2 \cdot J_{\text{ш}} + J_{\text{я}} + 2 \cdot \frac{J_{\text{зк}}}{i_{\text{ред}}^2} + 2 \cdot \frac{J_{\text{кп}}}{i_{\text{ред}}^2} + \frac{(P + Q)}{N} \cdot \left(\frac{V}{\omega_{\text{дв}}} \right)^2$ $J_{\text{прив}} = 1.415 \times 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Навантажувальні характеристики	I :=	0	сеФ :=	0	смФ :=
		140		43.4	
		200		59.1	
		250		67.5	
		300		76.8	
		400		89.4	
		500		96.8	
		650		105.5	
		800		112.4	



$TOL := 10^{-5}$

$ORIGIN := 1$

$g_{\text{я}} := 9.81$

Сумарний індуктивний опір якірного кола двигуна:

$\Sigma L := L_{\text{екв}} + L_{\text{оз}}$ $\Sigma L = 6.46 \times 10^{-3} \text{ Гн}$

Сумарний активний опір якірного кола двигуна

$\Sigma R := R_{\text{екв}} + R_{\text{оз}}$ $\Sigma R = 0.093 \text{ Ом}$

$M_{\text{дв}} := \left[\frac{(U_{\text{дв}} \cdot I_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 \cdot \Sigma R)}{n} \right] \cdot 9.55$ $M_{\text{дв}} = 9.299 \times 10^3 \text{ Вт}$

$\text{смФ}_{\text{ном}} := \frac{M_{\text{дв}}}{I_{\text{я}}}$ $\text{смФ}_{\text{ном}} = 16.458$

Співвідношення вісей тяги $c := 8$

Ухил $i_c := 4 \%_0$

Максимальне навантаження на вісь для вантажного вагону $q_0 := 25 \text{ т}$

$V := 51.7 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$

$\omega_{01} := 1.9 + 0.01 \cdot V + 0.0003 \cdot V^2$ $\omega_{01} = 3.219$

$\omega_{02} := 0.7 + \frac{8 + 0.1 \cdot V + 0.0025 \cdot V^2}{q_0}$ $\omega_{02} = 1.494$

$F := \frac{P}{8000} \cdot g \cdot (\omega_{01} + i_c) + \frac{Q}{8000} \cdot g \cdot (\omega_{02} + i_c)$ $F = 2.861 \times 10^4 \text{ Н}$

Момент опору

$$M_{\text{оп}} := \frac{F_{\text{гкп}}}{i_{\text{ред}}}$$

$$M_{\text{оп}} = 4.674 \times 10^3$$

Апроксимація кривих намагнічування

$$C_{\Phi}(I) := \begin{cases} (0.31 \cdot I) & \text{if } 0 \leq I \leq 140 \\ (4 + 0.26 \cdot I) & \text{if } 140 < I \leq 200 \\ (26 + 0.168 \cdot I) & \text{if } 200 < I \leq 250 \\ (19 + 0.186 \cdot I) & \text{if } 250 < I \leq 300 \\ (37 + 0.126 \cdot I) & \text{if } 300 < I \leq 400 \\ (59 + 0.074 \cdot I) & \text{if } 400 < I \leq 500 \\ (68 + 0.058 \cdot I) & \text{if } 500 < I \leq 650 \\ (74 + 0.046 \cdot I) & \text{if } 650 < I \leq 850 \\ 112.4 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$C_{\text{м}}\Phi(I) := \begin{cases} (0.049 \cdot I) & \text{if } 0 \leq I \leq 140 \\ (1.1 + 0.042 \cdot I) & \text{if } 140 < I \leq 200 \\ (3.7 + 0.027 \cdot I) & \text{if } 200 < I \leq 250 \\ (3.3 + 0.0296 \cdot I) & \text{if } 250 < I \leq 300 \\ (6 + 0.02 \cdot I) & \text{if } 300 < I \leq 400 \\ (9.3 + 0.012 \cdot I) & \text{if } 400 < I \leq 500 \\ (10.7 + 0.01 \cdot I) & \text{if } 500 < I \leq 650 \\ (11.8 + 0.008 \cdot I) & \text{if } 650 < I \leq 850 \\ 17.989 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$fD(t, I) := \left[\frac{3000}{(L_{\text{екв}} + L_{\text{оз}}) \cdot 8} - \frac{C_{\Phi}(I_1)}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{I_2}{(L_{\text{екв}} + L_{\text{оз}}) \cdot 8} - \frac{(R_{\text{екв}} + R_{\text{оз}}) \cdot 8 + \begin{cases} 15.288 & \text{if } 0 < t \leq 0.5 \\ 11.608 & \text{if } 0.5 < t \leq 1 \\ 9.448 & \text{if } 1 < t \leq 1.5 \\ 7.928 & \text{if } 1.5 < t \leq 2 \\ 6.9 & \text{if } 2 < t \leq 2.5 \\ 5.948 & \text{if } 2.5 < t \leq 3 \\ 4.9968 & \text{if } 3 < t \leq 3.5 \\ 4.268 & \text{if } 3.5 < t \leq 4 \\ 3.706 & \text{if } 4 < t \leq 4.5 \\ 3.319 & \text{if } 4.5 < t \leq 5 \\ 3.319 & \text{otherwise} \end{cases}}{(L_{\text{екв}} + L_{\text{оз}}) \cdot 8} \right] \cdot I_1 - \left(\frac{1}{J_{\text{прив}}} \right) \cdot C_{\text{м}}\Phi(I_1) \cdot I_1 - \left(\frac{1}{J_{\text{прив}}} \right) \cdot M_{\text{оп}} \right]$$

Початкові умови: $v_{\text{NU}} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ $t_1 := 0$ $t_{\text{end}} := 10$ $N := 1000$

$$MR := \text{Rkadapt}(v_{\text{NU}}, t_1, t_{\text{end}}, N, fD)$$

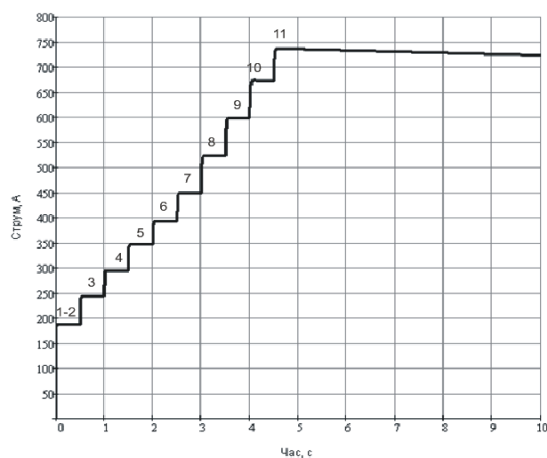


Рис. Б.1. Залежність струму від часу при пуску ТЕД до моменту рушення

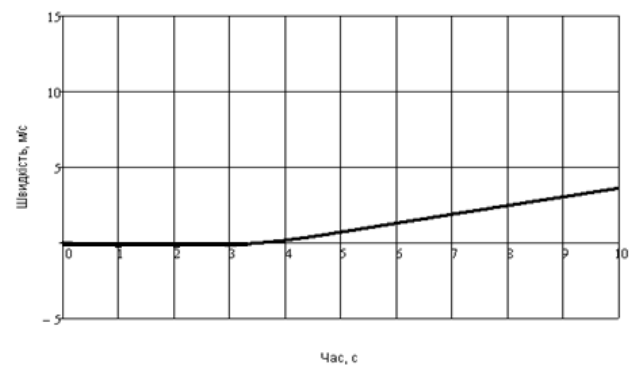


Рис. Б.2. Залежність швидкості від часу при пуску ТЕД

Додаток Д

Д.1. Розрахунок кутової швидкості та частоти обертання вала тягових електродвигунів типу ЕД-141У1

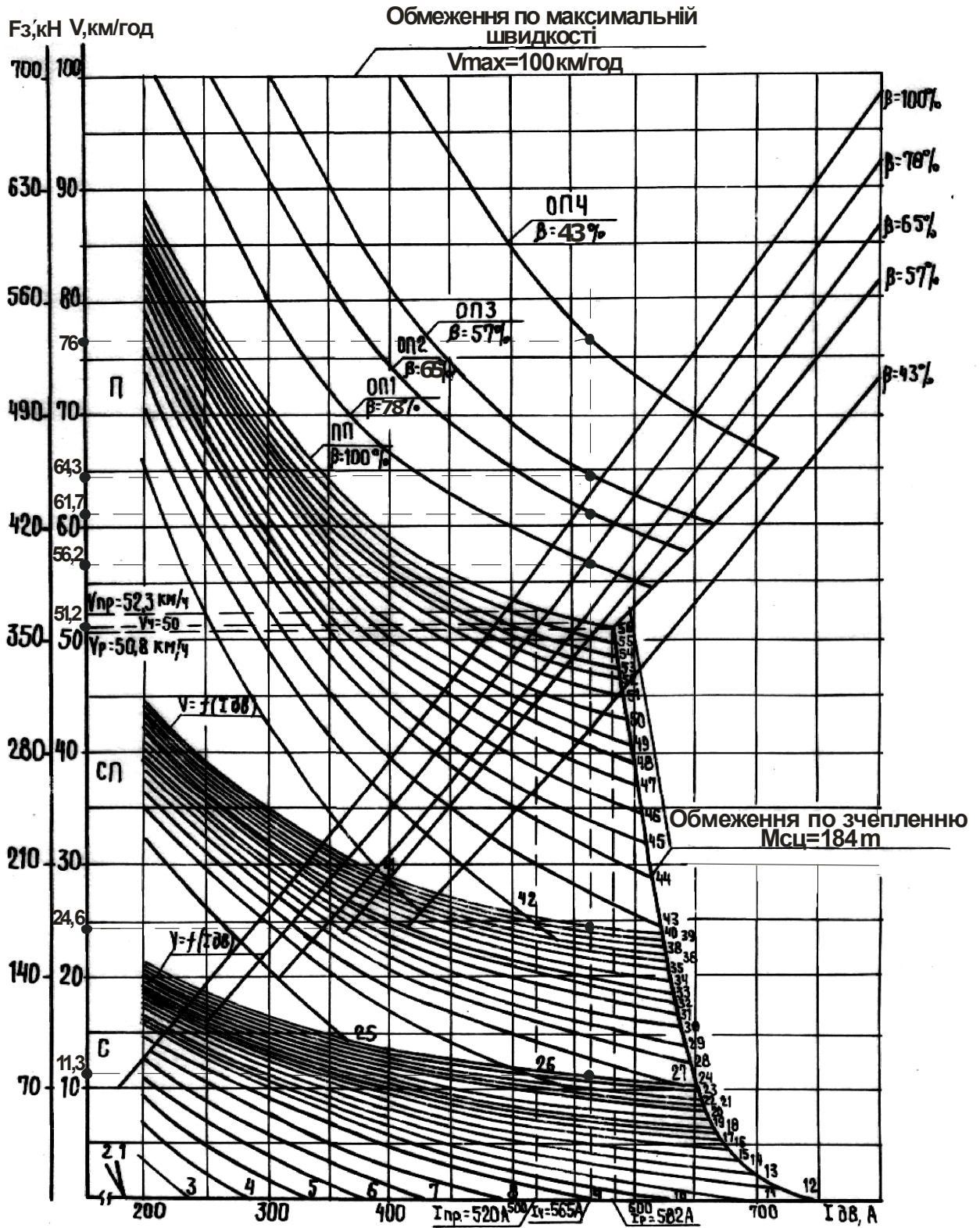


Рис. Д.1. Швидкісні характеристики електровоза постійного струму ДЕ1

Д.1.1. Напруга контактної мережі 3000 В

Кутова швидкість обертання вала ТЕД:

$$\omega_{\text{дв.ном}} = \frac{V \cdot i_{\text{ред}}}{r_{\text{кп}}},$$

де $i_{\text{ред}} = 3,826$ – передаточне відношення редуктора;

$r_{\text{кп}} = 0,625$ м – радіус колісної пари;

V – лінійна швидкість руху.

Частота обертання вала ТЕД: $n = \frac{\omega \cdot 30}{\pi}.$

Послідовне («С») з'єднання ТЕД

$$V = 11,3 \text{ км/год} = 3,14 \text{ м/с};$$

$$\omega_{\text{дв.ном}} = \frac{3,14 \cdot 3,826}{0,625} = 19,22 \text{ с}^{-1};$$

$$n = \frac{19,22 \cdot 30}{3,14} = 183,6 \text{ об./хв.}$$

Послідовно-паралельне («СП») з'єднання ТЕД

$$V = 24,6 \text{ км/год} = 6,8 \text{ м/с};$$

$$\omega_{\text{дв.ном}} = \frac{6,8 \cdot 3,826}{0,625} = 41,63 \text{ с}^{-1};$$

$$n = \frac{41,63 \cdot 30}{3,14} = 397,7 \text{ об./хв.}$$

Паралельне («П») з'єднання ТЕД

Повне збудження – $\beta = 100\%$

$$V = 51,7 \text{ км/год} = 14,36 \text{ м/с};$$

$$\omega_{\text{дв.ном}} = \frac{14,36 \cdot 3,826}{0,625} = 88 \text{ с}^{-1};$$

$$n = \frac{88 \cdot 30}{3,14} = 840 \text{ об./хв.}$$

Ослаблене збудження

$$\beta = 78\% \quad V = 56,2 \text{ км/год} = 15,6 \text{ м/с};$$

$$\omega_{\text{дв.ном}} = \frac{15,6 \cdot 3,826}{0,625} = 95,5 \text{ с}^{-1};$$

$$n = \frac{95,5 \cdot 30}{3,14} = 912,4 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 65\% \quad V = 61,7 \text{ км/год} = 17,14 \text{ м/с};$$

$$\omega_{\text{дв.ном}} = \frac{17,14 \cdot 3,826}{0,625} = 105 \text{ с}^{-1};$$

$$n = \frac{105 \cdot 30}{3,14} = 1003 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 57\% \quad V = 64,3 \text{ км/год} = 17,86 \text{ м/с};$$

$$\omega_{\text{дв.ном}} = \frac{17,86 \cdot 3,826}{0,625} = 109,3 \text{ с}^{-1};$$

$$n = \frac{109,3 \cdot 30}{3,14} = 1044 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 43\% \quad V = 76 \text{ км/год} = 20,53 \text{ м/с};$$

$$\omega_{\text{дв.ном}} = \frac{20,53 \cdot 3,826}{0,625} = 125,7 \text{ с}^{-1};$$

$$^1; n = \frac{125,7 \cdot 30}{3,14} = 1201 \text{ об./хв.}$$

Д.1.2. Напряга контактної мережі 2200 В

«С» з'єднання ТЕД

$$\omega_{\text{дв}i} = \frac{U_i}{U_{\text{ном}}} \cdot \omega_{\text{ном}}$$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{2200 \cdot 19,22}{3000} = 14,1 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 135 \text{ об./хв.}$$

«СП» з'єднання ТЕД

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{2200 \cdot 41,63}{3000} = 30,53 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 292 \text{ об./хв.}$$

«П» з'єднання ТЕД $\beta = 100\%$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{2200 \cdot 88}{3000} = 64,5 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 616 \text{ об./хв.}$$

Ослаблене збудження

$$\beta = 78\% \quad \omega_{\text{дв}} = \frac{2200 \cdot 95,5}{3000} = 70 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 669 \text{ об./хв.}$$

$\beta = 65\%$

$$\beta = 65\% \quad \omega_{\text{дв}} = \frac{2200 \cdot 105}{3000} = 77 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 736 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 57\% \quad \omega_{\text{дв}} = \frac{2200 \cdot 109,3}{3000} = 80,15 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 766 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 43\% \quad \omega_{\text{дв}} = \frac{2200 \cdot 125,7}{3000} = 92,2 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 881 \text{ об./хв.}$$

Д.1.3. Напряга контактної мережі 4000 В

«С» з'єднання ТЕД

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{4000 \cdot 19,22}{3000} = 25,6 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 244,6 \text{ об./хв.}$$

«СП» з'єднання ТЕД

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{4000 \cdot 41,63}{3000} = 55,5 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 530,3 \text{ об./хв.}$$

«П» з'єднання ТЕД $\beta = 100\%$

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{4000 \cdot 88}{3000} = 117 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 1118 \text{ об./хв.}$$

Ослаблене збудження

$$\beta = 78\% \quad \omega_{\text{дв}} = \frac{4000 \cdot 95,5}{3000} = 127,3 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 1216 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 65\% \quad \omega_{\text{дв}} = \frac{4000 \cdot 105}{3000} = 140 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 1337,6 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 57\% \quad \omega_{\text{дв}} = \frac{4000 \cdot 109,3}{3000} = 145,7 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 1392 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 43\% \quad \omega_{\text{дв}} = \frac{4000 \cdot 125,7}{3000} = 167,6 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 1601,3 \text{ об./хв.}$$

Д.2. Розрахунок кутової швидкості та частоти обертання вала тягових електродвигунів типу НБ-406Б

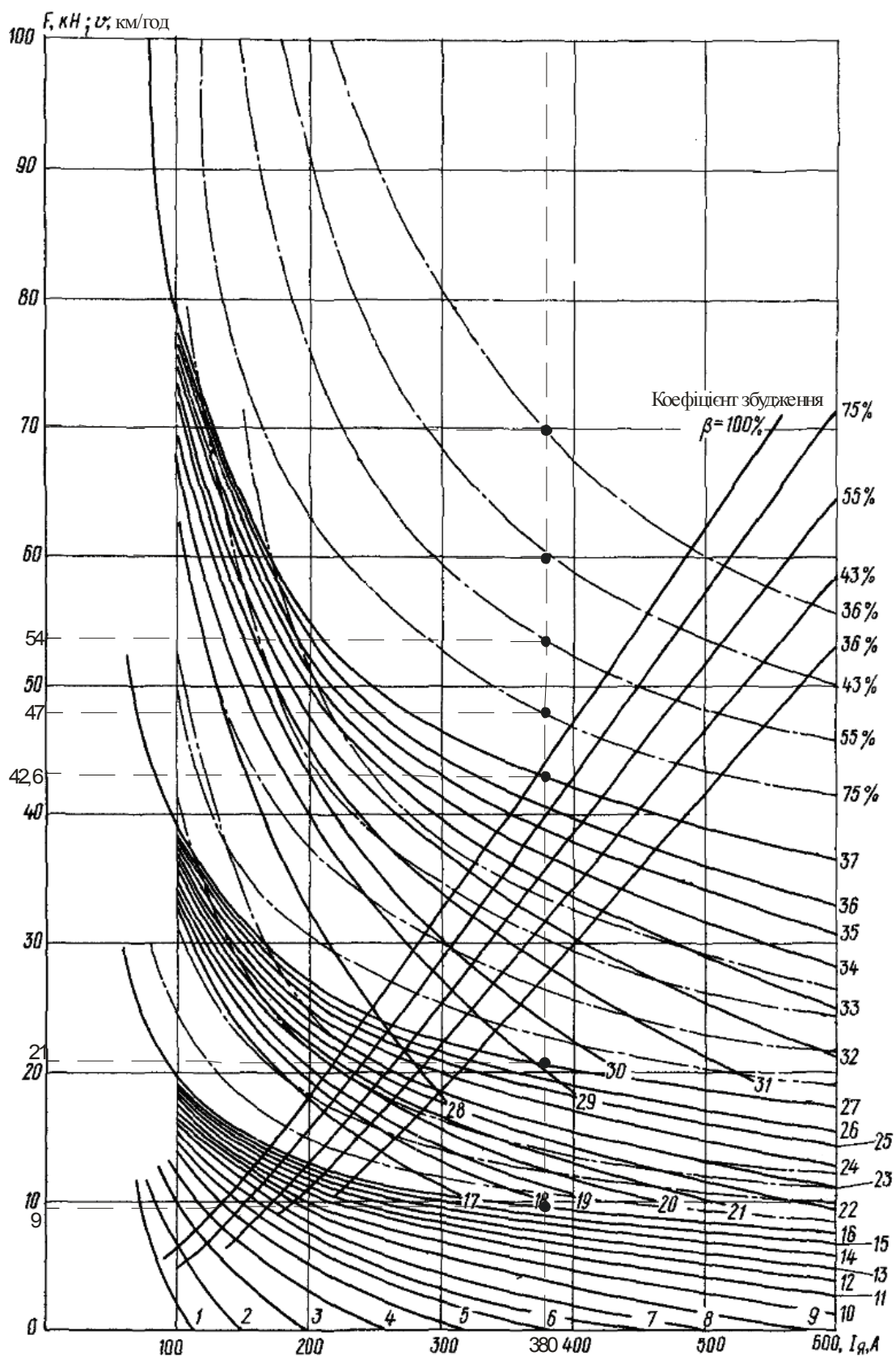


Рис. Д.2. Швидкісні характеристики електровоза постійного струму ВЛ8

$i_{ред} = 3,905$ – передаточне відношення редуктора;

$r_{кп} = 0,6$ м – радіус колісної пари.

Д.2.1. Напруга в контактній мережі 3000 В

«С» з'єднання ТЕД

$$V = 9 \text{ км/год} = 2,5 \text{ м/с};$$

$$\omega_{дв.ном} = \frac{2,5 \cdot 3,905}{0,6} = 16,3 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 155,7 \text{ об./хв.}$$

«СП» з'єднання ТЕД

$$V = 21 \text{ км/год} = 5,8 \text{ м/с};$$

$$\omega_{дв.ном} = \frac{5,8 \cdot 3,905}{0,6} = 37,7 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 360,2 \text{ об./хв.}$$

«П» з'єднання ТЕД

$$\beta = 100\%$$

$$V = 42,6 \text{ км/год} = 11,8 \text{ м/с};$$

$$\omega_{дв.ном} = \frac{11,8 \cdot 3,905}{0,6} = 76,8 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 733,8 \text{ об./хв.}$$

Ослаблене збудження

$$\beta = 75\% \quad V = 47 \text{ км/год} = 13,1 \text{ м/с};$$

$$\omega_{дв.ном} = \frac{13,1 \cdot 3,905}{0,6} = 85,3 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 815 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 55\% \quad V = 54 \text{ км/год} = 15 \text{ м/с};$$

$$\omega_{дв.ном} = \frac{15 \cdot 3,905}{0,6} = 97,6 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 932,5 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 43\% \quad V = 60 \text{ км/год} = 16,7 \text{ м/с};$$

$$\omega_{дв.ном} = \frac{16,7 \cdot 3,905}{0,6} = 109 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 1041 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 36\% \quad V = 70 \text{ км/год} = 19,4 \text{ м/с};$$

$$\omega_{дв.ном} = \frac{19,4 \cdot 3,905}{0,6} = 126,3 \text{ с}^{-1};$$

$$^1 n = 1207 \text{ об./хв.}$$

Д.2.2. Напруга в контактній мережі 2200 В

«С» з'єднання ТЕД

$$\omega_{дв} = \frac{2200 \cdot 16,3}{3000} = 12 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 114,6 \text{ об./хв.}$$

Ослаблене збудження

$$\beta = 75\% \quad \omega_{дв} = \frac{2200 \cdot 85,3}{3000} = 62,6 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 598 \text{ об./хв.}$$

«СП» з'єднання ТЕД

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{2200 \cdot 37,7}{3000} = 27,6 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 263,7 \text{ об./хв.}$$

«П» з'єднання ТЕД

$$\beta = 100\%$$

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{2200 \cdot 76,8}{3000} = 56,3 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 538 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 55\%$$

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{2200 \cdot 97,6}{3000} = 71,6 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 684 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 43\%$$

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{2200 \cdot 109}{3000} = 80 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 764,3 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 36\%$$

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{2200 \cdot 126,3}{3000} = 93 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 889 \text{ об./хв.}$$

Д.2.3. Напруга в контактній мережі 4000 В«С» з'єднання ТЕД

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{4000 \cdot 16,3}{3000} = 21,7 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 207,3 \text{ об./хв.}$$

«СП» з'єднання ТЕД

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{4000 \cdot 37,7}{3000} = 50,3 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 480,6 \text{ об./хв.}$$

«П» з'єднання ТЕД

$$\beta = 100\%$$

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{4000 \cdot 76,8}{3000} = 102,4 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 978,3 \text{ об./хв.}$$

Ослаблене збудження

$$\beta = 75\%$$

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{4000 \cdot 85,3}{3000} = 114 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 1089 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 55\%$$

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{4000 \cdot 97,6}{3000} = 130 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 1242 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 43\%$$

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{4000 \cdot 109}{3000} = 145 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 1385 \text{ об./хв.}$$

$$\beta = 36\%$$

$$\omega_{\text{ДВ}} = \frac{4000 \cdot 126,3}{3000} = 168,4 \text{ с}^{-1};$$

$$n = 1609 \text{ об./хв.}$$

Додаток Е

Дослідження перехідних процесів при короткому замиканні в силовому колі електровоза ДЕ1 без врахування дії вихрових струмів та без динамічної індуктивності при напрузі контактної мережі 3000 В

Е.1. Послідовне з'єднання тягових електродвигунів

Е.1.1. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилась одна еквівалентна обмотка якоря тягового електродвигуна)

Номинальна напруга живлення $U_M = 3000$ В.

Апроксимація характеристики намагнічування:

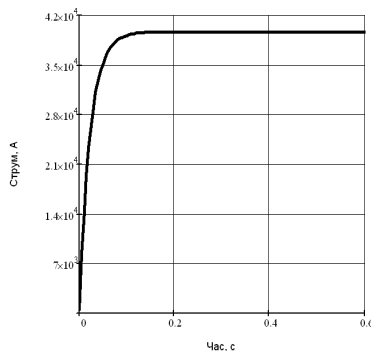
$$Ce\Phi(I_1) := \begin{cases} (1.714) & \text{if } 565 \leq I_1 \leq 800 \\ (1.75) & \text{if } 800 < I_1 \leq 1000 \\ (1.78) & \text{if } 1000 < I_1 \leq 1400 \\ 1.78 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$fD(t, I) := \frac{3000 - (Ce\Phi(I_1)) \cdot \omega_{ДВ.НОМ} - R_{екв} \cdot (I_1)}{L_{екв}}$$

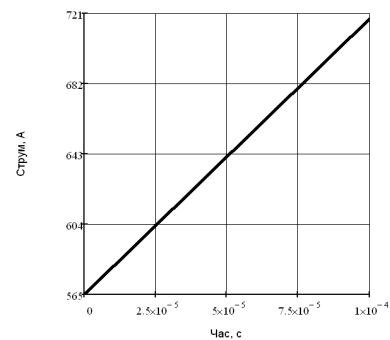
Початкові умови: $vNU := 565$ $t_1 := 0$ $tend := 5$

$MR := R_{kadapt}(vNU, t_1, tend, N, fD)$

$$\omega_{ДВ.НОМ} = 19,22 \text{ c}^{-1}$$



а)



б)

Рис. Е.1.1. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишилась одна еквівалентна обмотка якоря ТЕД) (а); Знаходження швидкості зміни струму при короткому замиканні (б)

Усталене значення струму короткого замикання – $I_{КЗ} = 41000$ А.

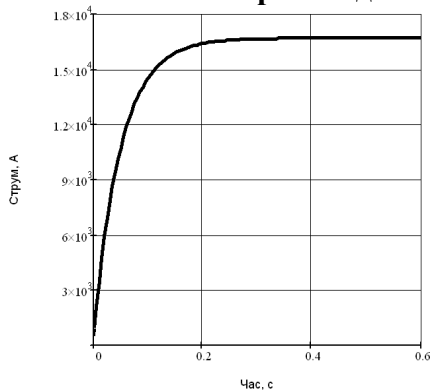
Величина струму короткого замикання при $0,0001$ с – $I_{КЗ(0,0001с)} = 735$ А.

$$\frac{di}{dt} = \frac{735 - 565}{0,0001} = 1700000 \text{ А/с.}$$

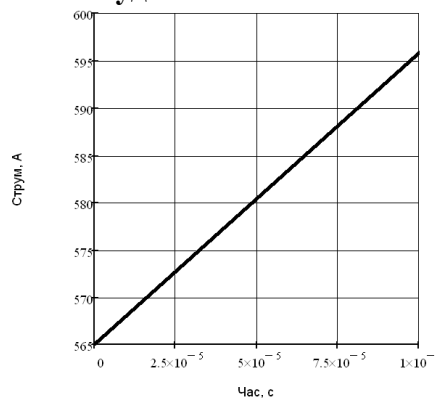
Дослідження перехідних процесів у силовому колі електровоза ДЕ1 при короткому замиканні проведено відповідно до п. Е.1.1 зі зміною в математичній моделі кількості еквівалентних обмоток якоря та збудження, що залишаються в

колі при різних варіантах виникнення КЗ, та частоти обертання вала тягових електродвигунів при різному їх з'єднанні. Результати досліджень наведені нижче.

Е.1.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві екв. обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

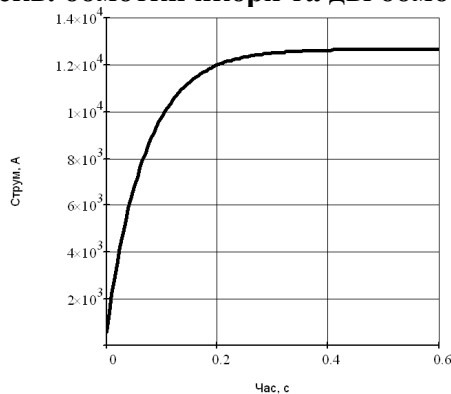
$$I_{\text{КЗ}} = 16800 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 595,8 \text{ A.}$$

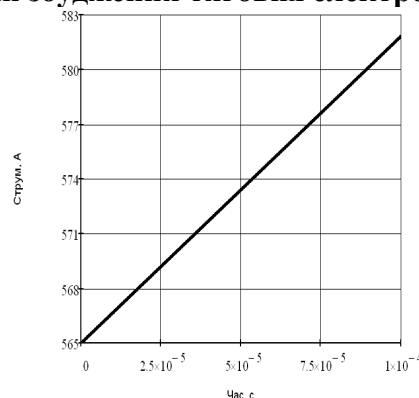
$$\frac{di}{dt} = \frac{595,8 - 565}{0,0001} = 308 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.1.3. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишились дві екв. обмотки якоря та одна обмотка збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві екв. обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

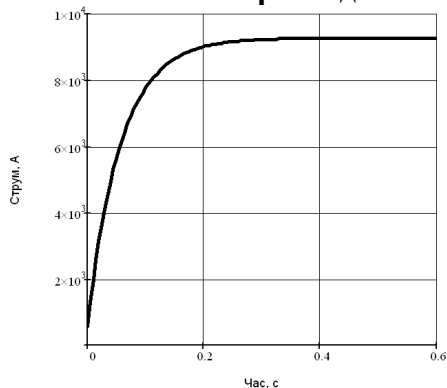
$$I_{\text{КЗ}} = 12700 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 582 \text{ A.}$$

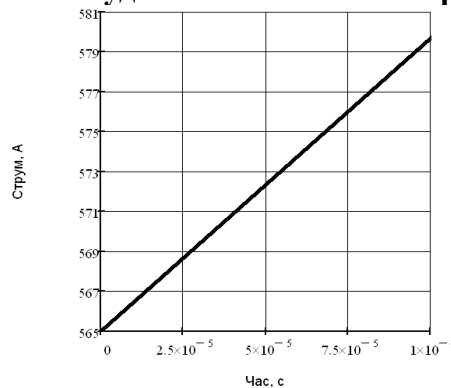
$$\frac{di}{dt} = \frac{582 - 565}{0,0001} = 170 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.1.4. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишились дві екв. обмотки якоря та дві обмотки збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились три екв. обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

$$I_{\text{КЗ}} = 9300 \text{ A.}$$

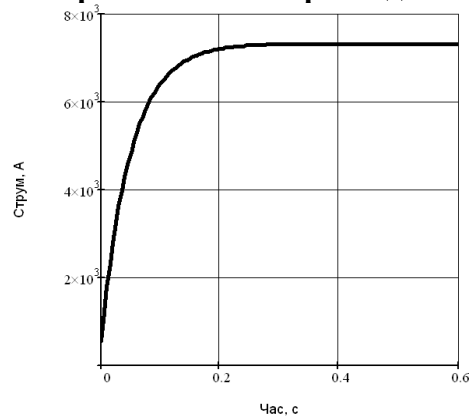
$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 580 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{580 - 565}{0,0001} = 150 \text{ кА/с.}$$

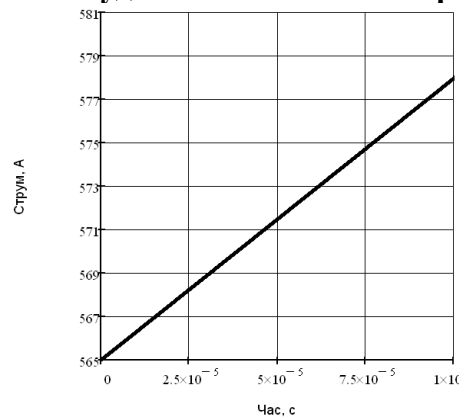
с.

Рис. Е.1.5. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишились три обмотки якоря та дві обмотки збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.6.Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

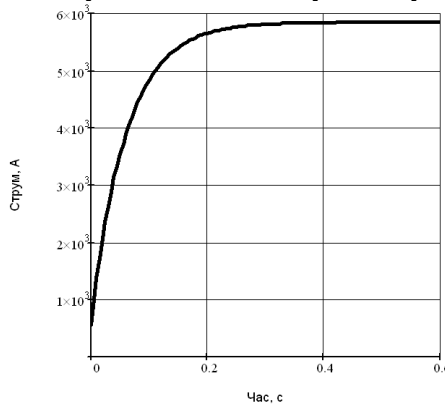
$$I_{K3} = 7360 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001\text{с})} = 578,1 \text{ A.}$$

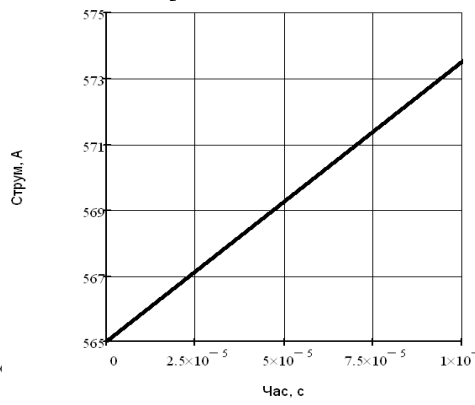
$$\frac{di}{dt} = \frac{578,1 - 565}{0,0001} = 131 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.1.6. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишилися чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.7.Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

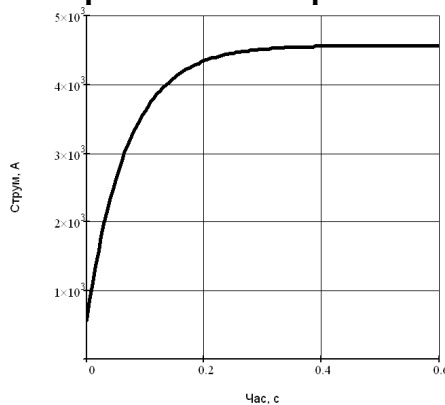
$$I_{K3} = 5850 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001\text{с})} = 573,6 \text{ A.}$$

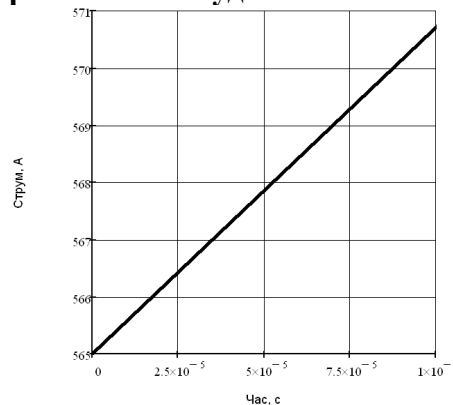
$$\frac{di}{dt} = \frac{573,6 - 565}{0,0001} = 86 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.1.7. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишилися чотири обмотки якоря та три обмотки збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.8.Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

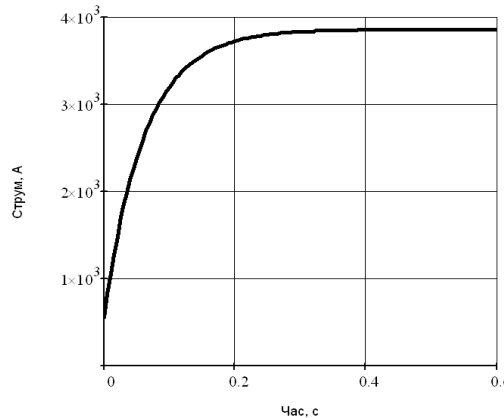
$$I_{K3} = 4600 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001\text{с})} = 570,7 \text{ A.}$$

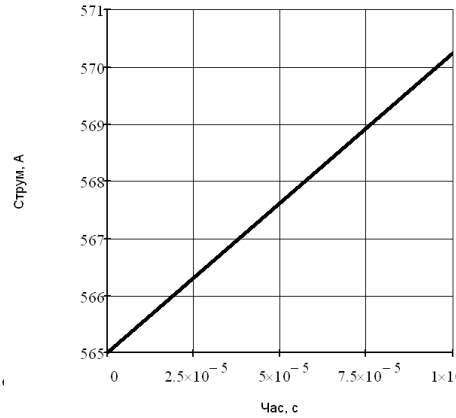
$$\frac{di}{dt} = \frac{570,7 - 565}{0,0001} = 57 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.1.8. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишилися чотири обмотки якоря та чотири обмотки збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.9. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися п'ять обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

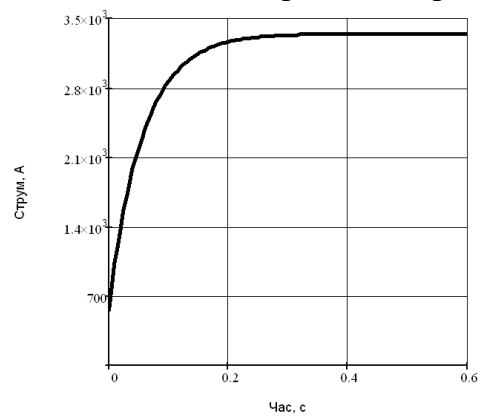
$$I_{\text{кз}} = 3880 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 570,3 \text{ A.}$$

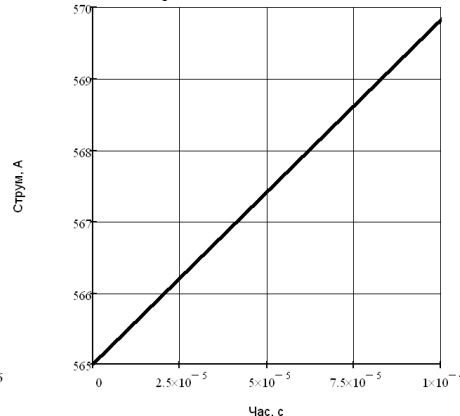
$$\frac{di}{dt} = \frac{570,3 - 565}{0,0001} = 53 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.1.9. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишилися п'ять обмоток якоря та чотири обмотки збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.10. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

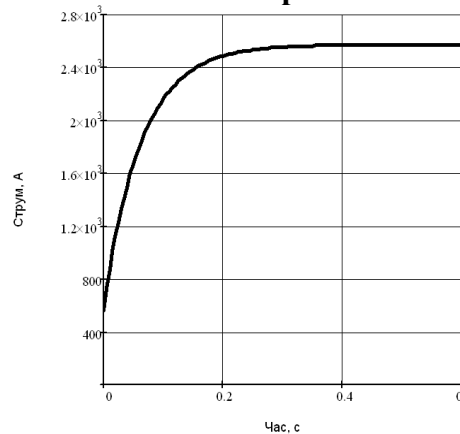
$$I_{\text{кз}} = 3350 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 570 \text{ A.}$$

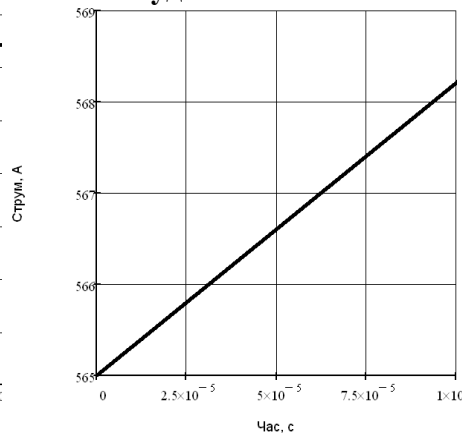
$$\frac{di}{dt} = \frac{570 - 565}{0,0001} = 50 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.1.10. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишилися шість обмоток якоря та чотири обмотки збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.11. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та п'ять обмоток збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

$$I_{\text{кз}} = 2600 \text{ A.}$$

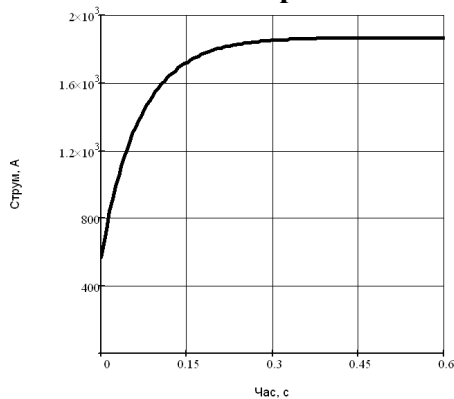
$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 568,2 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{568,2 - 565}{0,0001} = 32 \text{ кА/с.}$$

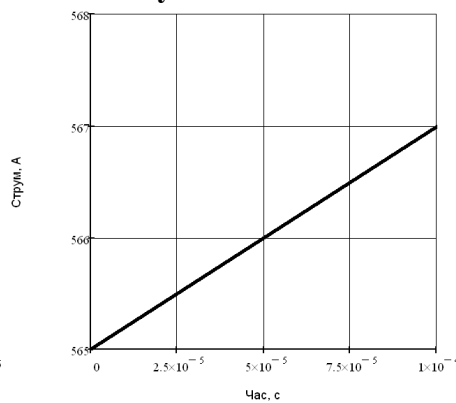
Рис. Е.1.2. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишилися шість обмоток якоря та

п'ятьобмоток збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.12. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

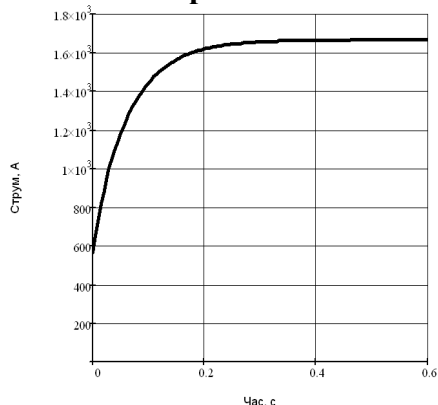
$$I_{K3} = 1900 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 566,9 \text{ A.}$$

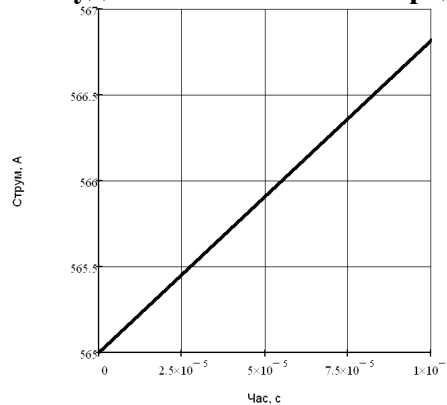
$$\frac{di}{dt} = \frac{566,9 - 565}{0,0001} = 19 \text{ к A/c.}$$

Рис. Е.1.12. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишилися шість обмоток якоря та шість обмоток збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.13. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися сім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

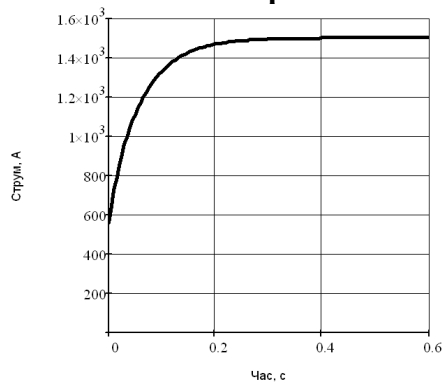
$$I_{K3} = 1700 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 566,8 \text{ A.}$$

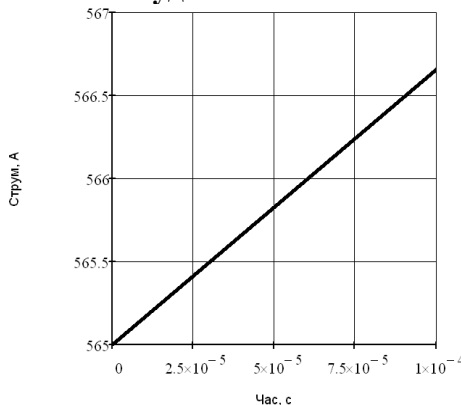
$$\frac{di}{dt} = \frac{566,8 - 565}{0,0001} = 18 \text{ к A/c.}$$

Рис. Е.1.13. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишилися сім обмоток якоря та шість обмоток збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.14. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися вісім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

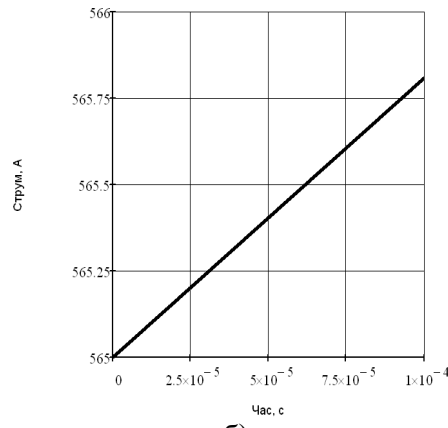
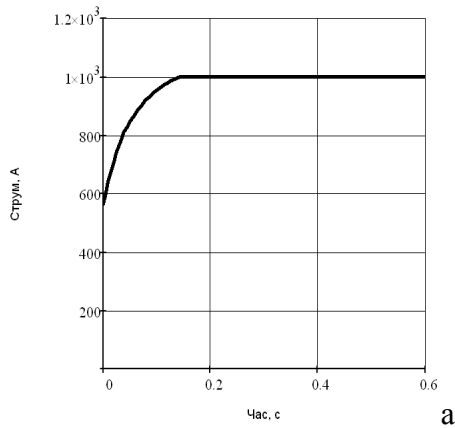
$$I_{K3} = 1510 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 566,7 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{566,7 - 565}{0,0001} = 17 \text{ к A/c.}$$

Рис. Е.1.14. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишились вісім обмоток якоря та шість обмоток збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.1.15. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились вісім обмоток якоря та сім обмоток збудження тягових електродвигунів)



$$I_{\text{КЗ}} = 1000 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 565,7 \text{ A.}$$

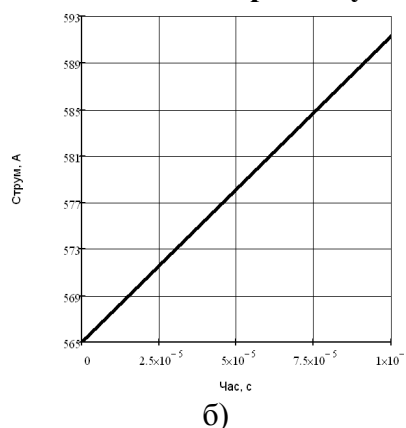
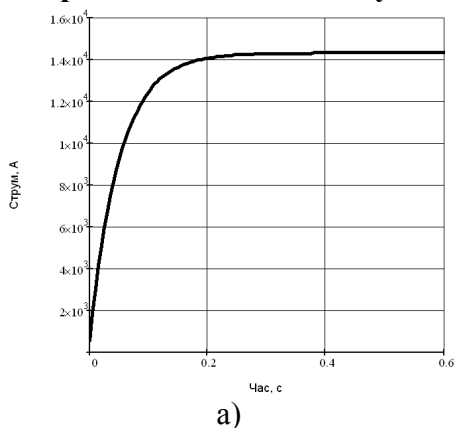
$$\frac{di}{dt} = \frac{565,7 - 565}{0,0001} = 7 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.1.15. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишились вісім обмоток якоря та сім обмоток збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.2. Послідовно-паралельне з'єднання тягових електродвигунів

$$\omega_{\text{ДВ.НОМ}} = 41,63 \text{ с}^{-1}$$

Е.2.1. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)



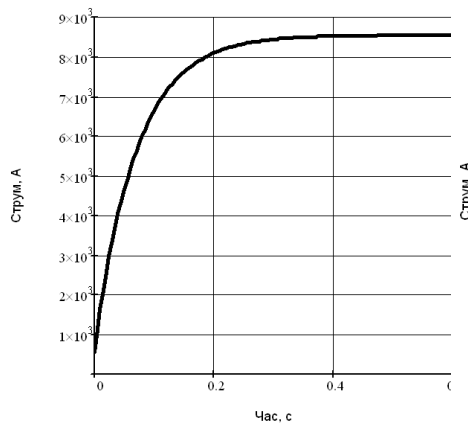
$$I_{\text{КЗ}} = 14400 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 591,4 \text{ A.}$$

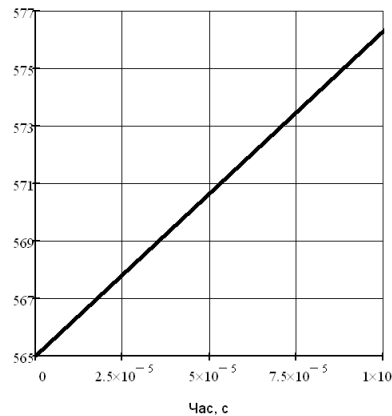
$$\frac{di}{dt} = \frac{591,4 - 565}{0,0001} = 264 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.2.1. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.2.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

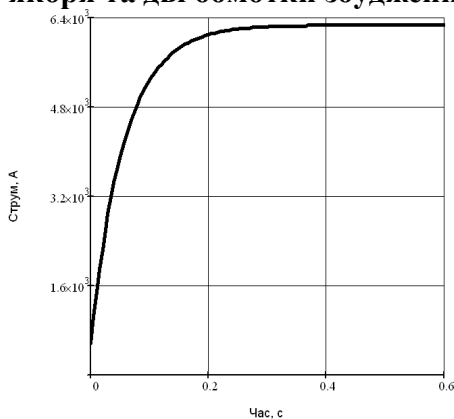
$$I_{\text{КЗ}} = 8600 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 576,4 \text{ A.}$$

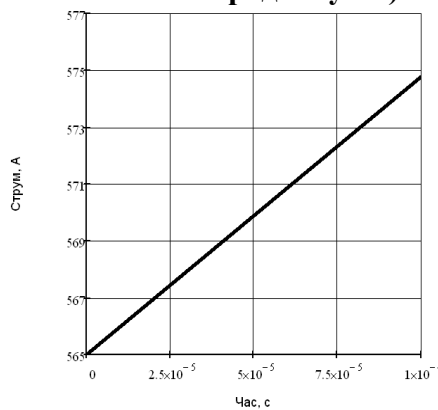
$$\frac{di}{dt} = \frac{576,4 - 565}{0,0001} = 114 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.2.2. Залежність струму КЗ від часу, коли (залишились дві обмотки якоря та дві обмотки збудження ТЕД) (а); 3 Визначення швидкості зміни струму при короткому замиканні (б)

Е.2.3. Перехідний процес при короткому замиканні (колі залишились три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

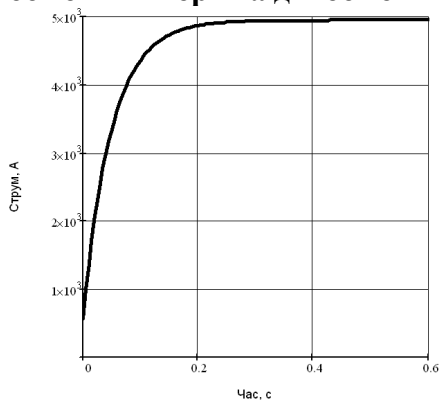
$$I_{\text{КЗ}} = 6300 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 574,8 \text{ A.}$$

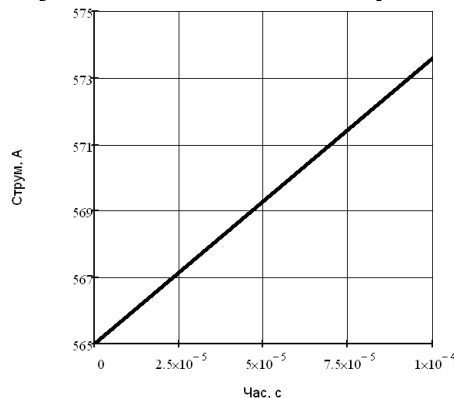
$$\frac{di}{dt} = \frac{574,8 - 565}{0,0001} = 98 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.2.3. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишились три обмотки якоря та дві обмотки збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.2.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

$$I_{\text{КЗ}} = 5000 \text{ A.}$$

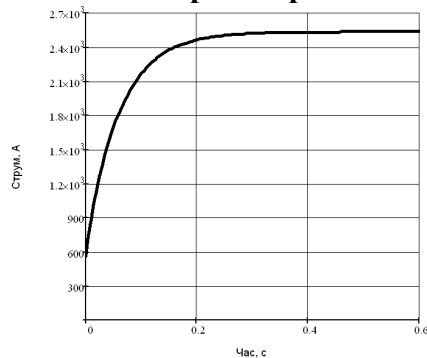
$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 573,6 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{573,6 - 565}{0,0001} = 86 \text{ кА/с.}$$

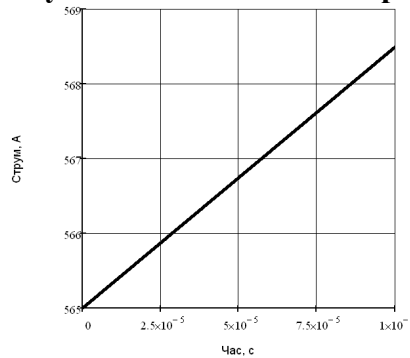
Рис. Е.2.4. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишились чотири обмотки якоря та дві

обмотки збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при КЗ (б)

Е.2.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)



а)



б)

$$I_{K3} = 2550 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 568,5 \text{ A.}$$

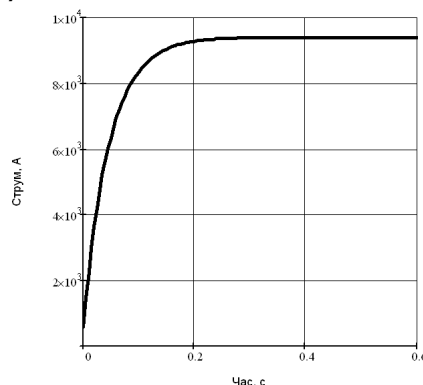
$$\frac{di}{dt} = \frac{568,5 - 565}{0,0001} = 35 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.2.5. Залежність струму КЗ від часу (в колі залишились чотири обмотки якоря та три обмотки збудження ТЕД) (а); Визначення швидкості зміни струму при короткому замиканні (б)

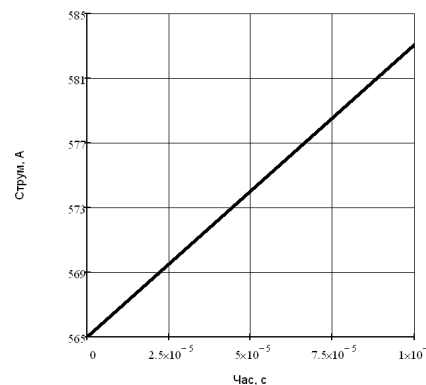
Е.3. Паралельне з'єднання тягових електродвигунів

Перехідний процес при короткому замиканні при повному та ослабленому полі (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

$$\beta = 100\%$$



а)



б)

$$\omega_{\text{ДВ.НОМ}} = 87 \text{ с}^{-1}$$

$$I_{K3} = 9450 \text{ A.}$$

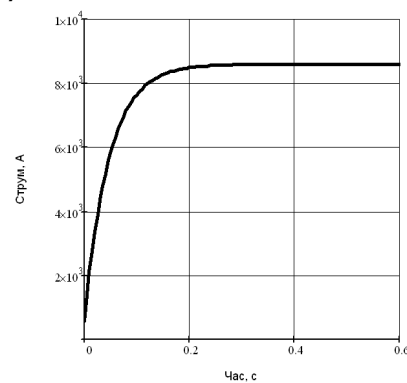
$$I_{K3(0,0001c)} = 583,1 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{583,1 - 565}{0,0001} = 181 \text{ кА/с.}$$

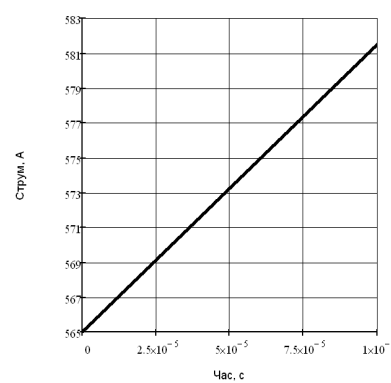
с.

Рис. Е.3.1. Залежність струму КЗ від часу при повному полі (а); Визначення швидкості зміни струму при короткому замиканні (б)

$$\beta = 78\%$$



а)



б)

$$\omega_{\text{ДВ.НОМ}} = 95,5 \text{ с}^{-1}$$

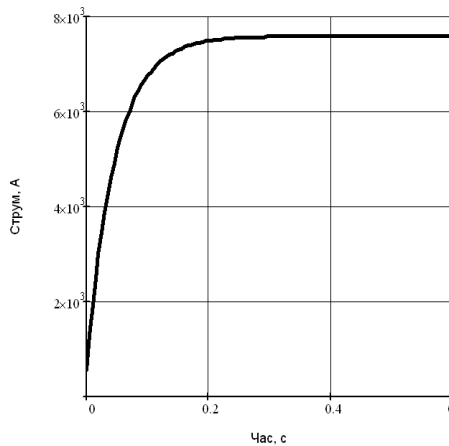
$$I_{K3} = 8610 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 583,1 \text{ A.}$$

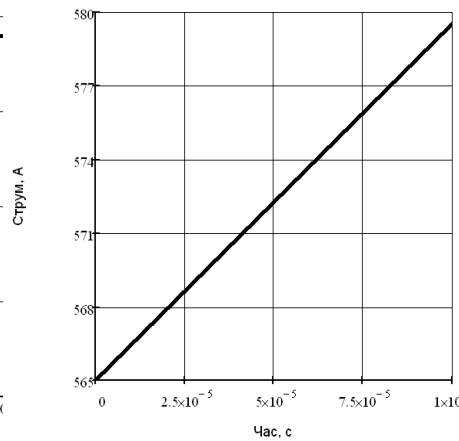
$$\frac{di}{dt} = \frac{581,5 - 565}{0,0001} = 165 \text{ кА/с.}$$

Рис. Е.3.2. Залежність струму КЗ від часу при ослабленому полі – $\beta = 78\%$ (а);

Визначення швидкості зміни струму при короткому замиканні (б)

 $\beta = 65\%$ 

а)



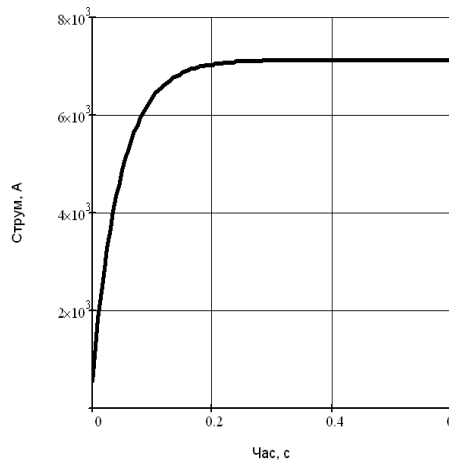
б)

$$\omega_{\text{ДВ.НОМ}} = 105 \text{ с}^{-1}$$

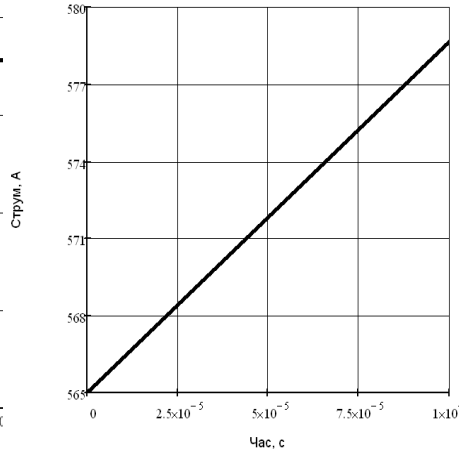
$$I_{\text{КЗ}} = 7620 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 579,6 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{579,6 - 565}{0,0001} = 146 \text{ к A/с.}$$

Рис. Е.3.3. Залежність струму КЗ від часу при ослабленому полі – $\beta = 65\%$ (а); Визначення швидкості зміни струму при короткому замиканні (б) $\beta = 57\%$ 

а)



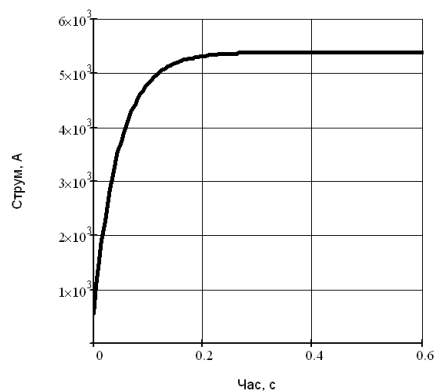
б)

$$\omega_{\text{ДВ.НОМ}} = 109,3 \text{ с}^{-1}$$

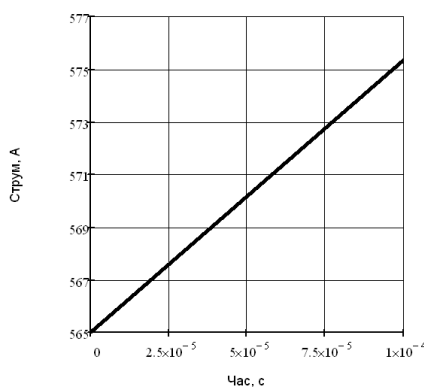
$$I_{\text{КЗ}} = 7160 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 578,7 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{578,7 - 565}{0,0001} = 137 \text{ к A/с.}$$

Рис. Е.3.4. Залежність струму КЗ від часу при ослабленому полі – $\beta = 57\%$ (а); Визначення швидкості зміни струму при короткому замиканні (б) $\beta = 43\%$ 

а)



б)

$$\omega_{\text{ДВ.НОМ}} = 125,7 \text{ с}^{-1}$$

$$I_{\text{КЗ}} = 5400 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 575,4 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{575,4 - 565}{0,0001} = 104 \text{ кA /с.}$$

Рис. Е.3.5. Залежність струму КЗ від часу при ослабленому полі – $\beta = 43\%$ (а); Визначення швидкості зміни струму при короткому замиканні (б)

Додаток Ж

Дослідження перехідних процесів при короткому замиканні в силовому колі електровоза ДЕ1 з врахуванням вихрових струмів, але без динамічної індуктивності при напрузі контактної мережі 3000 В

Ж.1. Послідовне з'єднання тягових електродвигунів

Ж.1.1. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилась одна обмотка якоря тягового електродвигуна)

Rm1:=49778.8: - магнітний опір на першому участку апроксимованої магнітної характеристики
Rm2:=56740: - магнітний опір на другому участку апроксимованої магнітної характеристики
Rm3:=92000: - магнітний опір на третьому участку апроксимованої магнітної характеристики
Rm4:=133333.3: **Rm5:=224000:** **Rm6:=327272.7:**
Rm7:=407521.4:

u:=3000: - напруга живлення двигуна
ra:=0.0674: **rzб:=0.0253:** - опір кола двигуна
kp:=(984/60): **n:=183.6:** **q:=3:**

w:=16: - кількість витків обмотки головних полюсів
wd:=6: - кількість витків обмотки додаткового полюса
Fнл3:=2560: - намагнічуюча сила нелінійності на третьому участку магнітної характеристики
Fнл2:=320: - намагнічуюча сила нелінійності на другому участку магнітної характеристики
Fнл4:=6000: **Fнл5:=14400:**
Fнл6:=25600: **Fнл7:=34880:**

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ГП

j:=35000: - електрична провідність сталі остова **j1:=17500:** - електрична провідність сталі осердя ГП
j2:=35000: - електрична провідність сталі осердя ДП
hj:=14.95: - висота остова **lj:=16:** - довжина магнітної лінії
aj:=60: - довжина остова **ap:=21.4:** - ширина полюса
bp:=41: - довжина полюса

bp:=41: - довжина полюса **lp:=7:** - висота полюса
gm:=(j*hj*lj)/(16*aj)+((j1*ap*bp*lp)/(6*8*(ap^2+bp^2)))/; - магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ГП

gm:=9767.696253

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ДП

adp:=2.5: - ширина полюса **bdp:=41:** - довжина полюса **ldp:=9.47:** - висота полюса
gmd:=(j*hj*lj)/(16*aj)+((j2*adp*bdp*ldp)/(6*8*(adp^2+bdp^2)))/; - магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ДП

gmd:=9140.322947

Ia:=565: **ia:=Ia/(2*3):** **N:=984:** **wk:=8:** **kpp:=0.2:** **waq:=kpp*984/(8*3*3):**
Fko:=Ia*wk: **Da:=74:** **Tau:=38.75:** **Alin:=ia*N/(3.14*Da):**
Faq:=Tau*Alin/(2)*0.75: **vko:=Fko/Faq;**
wl:=w-(1-vko)*waq;

waq:=2.733333333

vko:=.7800178336

wl:=15.39871541

Визначення індуктивності обмоток двигуна

Індуктивність якоря

la:=40: - довжина якоря

Da:=74: - діаметр якоря

```

a:=0.75:- коеф. полюсного перекриття          d:=0.5:- повітряний зазор:
km:=0.3- коефіцієнт насичення сталених частин шляху потоку реакції якоря :
kd:=1.478:- коеф. зубчасті якоря                waq1:=984/(8*3*3):
A:=2.68: la:=40: Z:=123: m0:=0.4*3.14*10^(-6):
L11a:=m0*(4*la*A*waq1^2/(Z));

L11a:=.0008178327704
      Індуктивність котушок компенсаційної обмотки
wk:=11: Zk:=8: Ak:=4*p*10^(-7)*(5*d)/(5*a+4*d):
Lk:=2*(wk^2*la*Ak)/(p*Zk);

Lk:=.0002104347826
      Індуктивність котушок ДП
Qd:=2.38:-коефіцієнт розсіювання обмотки ДП
Fik:= 1.075*10^(-3):- комутаційний магнітний потік      Iv:=565:-струм збудження
Ld:=(2*q*Qd*Fik*wd)/Iv: Ld:=0.00052;

Ld:=.00052
      Індуктивність розсіювання котушок головних полюсів
Fi:=0.105:- основний магнітний потік      Q:=1.25:- коефіцієнт розсіювання головних полюсів
Lzb:=(2*q*w*(Q-1)*Fi)/Iv: Lzb:=0.0049;- індуктивність обмотки головних полюсів при
номінальному усталеному режимі

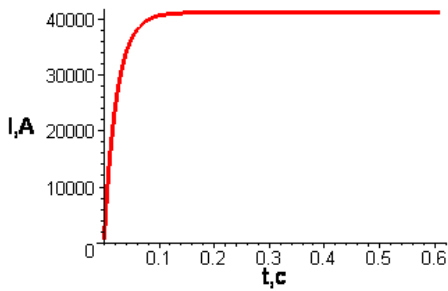
Lzb:=.0049
dsys1:={i1(t1)*(1*ra+0*rzb)+(1*(L11a+Ld+Lk)+0*Lzb)*diff(i1(t1),t1)+
1*kp*x1(t1)*n=u,
-0*w1*i1(t1)+1.23*Rm1*y1(t1)+gm*diff(y1(t1),t1)+x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5+
(x1(t1)*(Rm6-Rm1)-Fнл6-(x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5))*Heaviside(-0.117+x1(t1))=0,
-0*w1*i1(t1)+5.29*Rm1*(x1(t1)-y1(t1))+0.477*gm*diff(x1(t1)-y1(t1),t1)+
x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5+(x1(t1)*(Rm6-Rm1)-Fнл6-(x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5))*
Heaviside(-0.117+x1(t1))=0}:
In_C1:={i1(0)=565, y1(0)=0.1045*0.3, x1(0)=0.1045}:
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);

dsol1:=proc(rkf45_x) ... end proc
T1:=array(1..1000, []): Z1:=array(1..1000, []): X1:=array(1..1000, []):
Y1:=array(1..1000, []): H1:=array(1..1000, []): E1:=array(1..1000, []):
k:=0:for t1 from 0 by 0.0001 to 0.00995 do k:=k+1: T1[k]:=op(2,op(1,dsol1(t1))):
H1[k]:=op(2,op(3,dsol1(t1))): E1[k]:=op(2,op(2,dsol1(t1))):
Z1[k]:=op(2,op(4,dsol1(t1))): end do:
i1:=plot([T1[i],E1[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i1:
x1:=plot([T1[i],H1[i],i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,
labels=["t,c","Ф,B6"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x1:
print(op(2,op(3,dsol1(0.01)))); .0763373977022676204
dsys2:={i2(t2)*(1*ra+0*rzb)+(1*(L11a+Ld+Lk)+0*Lzb)*diff(i2(t2),t2)+1*kp*0.076*n=u}:
In_C2:={i2(0)=op(2,op(2,dsol1(0.00995)))}:
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);

dsol2:=proc(rkf45_x) ... end proc
T2:=array(1..1000, []): Z2:=array(1..1000, []): X2:=array(1..1000, []):
Y2:=array(1..1000, []): H2:=array(1..1000, []): E2:=array(1..1000, []):
k:=0:for t2 from 0 by 0.005 to 0.6 do k:=k+1: T2[k]:=op(2,op(1,dsol2(t2)))+0.01:
E2[k]:=op(2,op(2,dsol2(t2))): end do:
i2:=plot([T2[i],E2[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i2:
x2:=plot([T2[i],0.156,i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,

```

```
labels=["t,c","Φ,B6"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x2:
display(i1,i2);
```



Усталене значення струму короткого замикання $I_{кз}$
`print (op (2,op (2,dsol1 (0.0001) ))) ; 735.6628`

Величина струму короткого замикання при 0,0001 с
 $I_{кз}(0,0001с)$
`print (op (2,op (2,dsol1 (0.6) ))) ; 40955.0806`

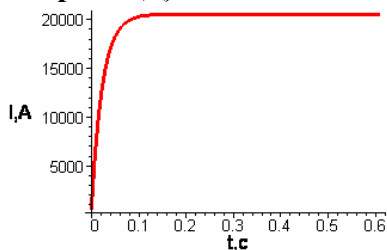
Визначення швидкості зростання струму:

$$\frac{di}{dt} = \frac{735,7 - 565}{0,0001} = 1707000 \text{ A/c.}$$

Дослідження перехідних процесів у силовому колі електровоза ДЕ1 при короткому замиканні проведено відповідно до п. Ж.1.1. зі зміною в математичній моделі кількості еквівалентних обмоток якоря та збудження, що залишаються в колі при різних варіантах виникнення КЗ, та частоти обертання вала тягових електродвигунів при різному їх з'єднанні.

Результати дослідження наведені нижче.

Ж.1.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря ТЕД)

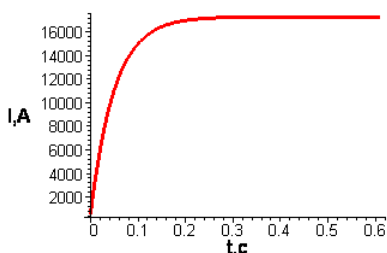


$$I_{кз} = 20480 \text{ A}$$

$$I_{кз}(0,0001с) = 649,1 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{649,1 - 565}{0,0001} = 841000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились 2 обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

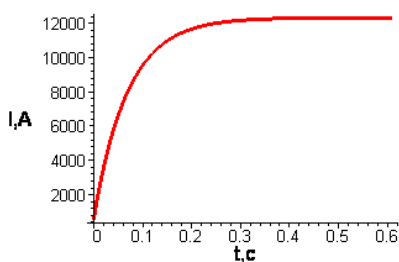


$$I_{кз} = 16000 \text{ A}$$

$$I_{кз}(0,0001с) = 579,4 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{579,4 - 565}{0,0001} = 324000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

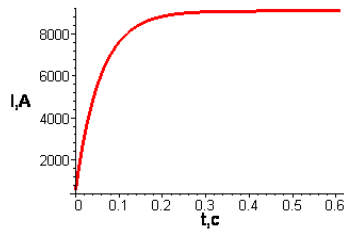


$$I_{кз} = 12300 \text{ A}$$

$$I_{кз}(0,0001с) = 582,6 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{582,6 - 565}{0,0001} = 176000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

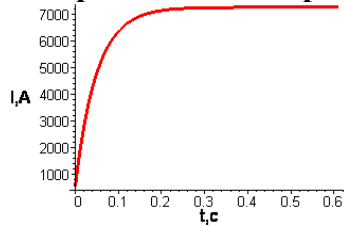


$$I_{\text{кз}} = 9270 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 580,4 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{580,4 - 565}{0,0001} = 154000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.6. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

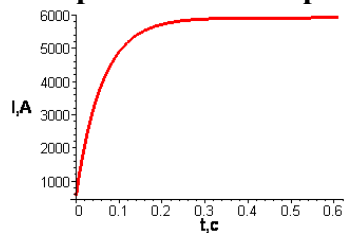


$$I_{\text{кз}} = 7340 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 578,7 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{578,7 - 565}{0,0001} = 137000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.7. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)

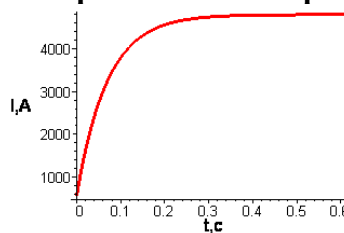


$$I_{\text{кз}} = 5950 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 574 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{574 - 565}{0,0001} = 90000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.8. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

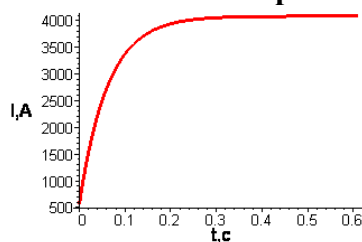


$$I_{\text{кз}} = 4800 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 571 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{571 - 565}{0,0001} = 60000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.9. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися п'ять обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

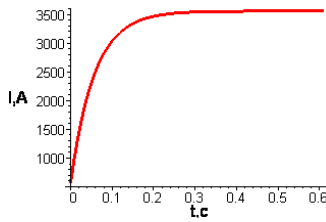


$$I_{\text{кз}} = 4080 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 570,5 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{570,5 - 565}{0,0001} = 55000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.10. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

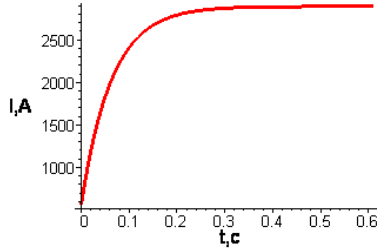


$$I_{\text{кз}} = 3350 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 570 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{570 - 565}{0,0001} = 50000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.11. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились шість обмоток якоря та п'ять обмоток збудження тягових електродвигунів)

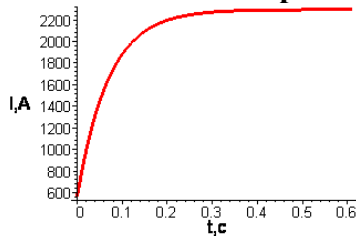


$$I_{\text{кз}} = 2600 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 568,3 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{568,3 - 565}{0,0001} = 33000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.12. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились шість обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

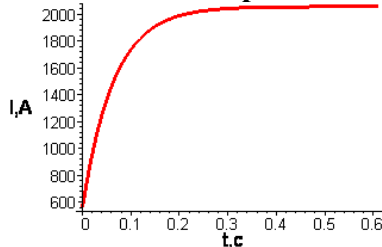


$$I_{\text{кз}} = 2150 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 567,1 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{567,1 - 565}{0,0001} = 21000 \text{ A/c}$$

Ж.1.13. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились сім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

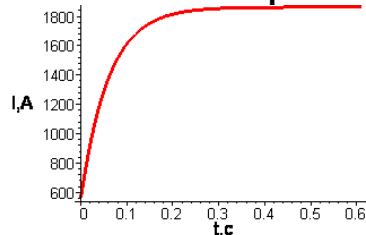


$$I_{\text{кз}} = 1960 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 567 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{567 - 565}{0,0001} = 20000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.14. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились вісім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

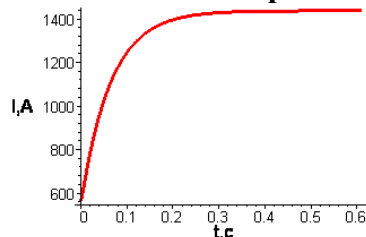


$$I_{\text{кз}} = 1770 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 566,7 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{566,7 - 565}{0,0001} = 17000 \text{ A/c.}$$

Ж.1.15. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились вісім обмоток якоря та сім обмоток збудження тягових електродвигунів)



$$I_{\text{кз}} = 1330 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 565,8 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{565,8 - 565}{0,0001} = 8000 \text{ A/c.}$$

Додаток 3

Дослідження перехідних процесів при короткому замиканні в силовому колі електровоза ДЕ1 з врахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності при напрузі контактної мережі 3000 В

3.1. Послідовне з'єднання тягових електродвигунів

3.1.1. Перехідний процес при короткому замиканні, коли в силовому колі залишилась одна обмотка якоря тягового електродвигуна

$R_{m1} := 49778.8$: - магнітний опір на першому участку апроксимованої магнітної характеристики
 $R_{m2} := 56740$: - магнітний опір на другому участку апроксимованої магнітної характеристики
 $R_{m3} := 92000$: - магнітний опір на третьому участку апроксимованої магнітної характеристики
 $R_{m4} := 133333.3$: $R_{m5} := 224000$: $R_{m6} := 327272.7$:
 $R_{m7} := 407521.4$:

$u := 3000$: - напруга живлення двигуна
 $r_a := 0.0674$: $r_{zb} := 0.0253$: - опір кола двигуна
 $k_p := (984/60)$: $n := 183.6$: $q := 3$:

$w := 16$: - кількість витків обмотки головних полюсів
 $wd := 6$: - кількість витків обмотки додаткового полюса
 $F_{nl3} := 2560$: - намагнічуюча сила нелінійності на третьому участку магнітної характеристики
 $F_{nl2} := 320$: - намагнічуюча сила нелінійності на другому участку магнітної характеристики
 $F_{nl4} := 6000$: $F_{nl5} := 14400$:
 $F_{nl6} := 25600$: $F_{nl7} := 34880$:

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ГП

$j := 35000$: - електрична провідність сталі остова $j_1 := 17500$: - електрична провідність сталі осердя ГП
 $j_2 := 35000$: - електрична провідність сталі осердя ДП
 $h_j := 14.95$: - висота остова $l_j := 16$: - довжина магнітної лінії
 $a_j := 60$: - довжина остова $ap := 21.4$: - ширина полюса
 $bp := 41$: - довжина полюса

$bp := 41$: - довжина полюса $lp := 7$: - висота полюса
 $gm := (j * h_j * l_j) / (16 * a_j) + ((j_1 * ap * bp * lp) / (6 * 8 * (ap^2 + bp^2)))$; - магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ГП

$gm := 9767.696253$

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ДП

$adp := 2.5$: - ширина полюса $bdp := 41$: - довжина полюса $ldp := 9.47$: - висота полюса
 $gmd := (j * h_j * l_j) / (16 * a_j) + ((j_2 * adp * bdp * ldp) / (6 * 8 * (adp^2 + bdp^2)))$; - магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ДП

$gmd := 9140.322947$

$I_a := 565$: $ia := I_a / (2 * 3)$: $N := 984$: $wk := 8$: $kpp := 0.2$: $waq := kpp * 984 / (8 * 3 * 3)$;
 $F_{ko} := I_a * wk$: $Da := 74$: $Tau := 38.75$: $Alin := ia * N / (3.14 * Da)$:
 $Faq := Tau * Alin / (2) * 0.75$: $v_{ko} := F_{ko} / Faq$;
 $wl := w - (1 - v_{ko}) * waq$;

$waq := 2.733333333$

$v_{ko} := .7800178336$

$wl := 15.39871541$

Визначення індуктивності обмоток двигуна

Індуктивність якоря

$la := 40$: - довжина якоря

$Da := 74$: - діаметр якоря

```

a:=0.75:- коеф. полюсного перекриття          d:=0.5:- повітряний зазор:
km:=0.3- коефіцієнт насичення сталених частин шляху потоку реакції якоря :
kd:=1.478:- коеф. зубчасті якоря              waq1:=984/(8*3*3):
A:=2.68: la:=40: Z:=123: m0:=0.4*3.14*10^(-6):
L11a:=m0*(4*la*A*waq1^2/(Z));

L11a:=.0008178327704
      Індуктивність котушок компенсаційної обмотки
wk:=11: Zk:=8: Ak:=4*p*10^(-7)*(5*d)/(5*a+4*d):
Lk:=2*(wk^2*la*Ak)/(p*Zk);

Lk:=.0002104347826
      Індуктивність котушок ДП
Qd:=2.38:-коефіцієнт розсіювання обмотки ДП
Fik:= 1.075*10^(-3):- комутаційний магнітний потік      Iv:=565:-струм збудження
Ld:=(2*q*Qd*Fik*wd)/Iv: Ld:=0.00052;

Ld:=.00052
      Індуктивність розсіювання котушок головних полюсів
Fi:=0.105:- основний магнітний потік      Q:=1.25:- коефіцієнт розсіювання головних полюсів
Lzb:=(2*q*w*(Q-1)*Fi)/Iv: Lzb:=0.0049;- індуктивність обмотки головних полюсів при
номінальному усталеному режимі

Lzb:=.0049

dsys1:={i1(t1)*(1*ra+0*rzb)+0*((2*q*w*(Q-1)*x1(t1))/i1(t1))*diff(i1(t1),t1)+
1*(Ld+Lk+L11a)*diff(i1(t1),t1)+1*kp*x1(t1)*n+0*2*q*w*diff(x1(t1),t1)=u,
-0*w1*i1(t1)+1.23*Rm1*y1(t1)+gm*diff(y1(t1),t1)+x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5+
(x1(t1)*(Rm6-Rm1)-Fнл6-(x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5))*Heaviside(-0.117+x1(t1))=0,
-0*w1*i1(t1)+5.29*Rm1*(x1(t1)-y1(t1))+0.477*gm*diff(x1(t1)-y1(t1),t1)+
x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5+(x1(t1)*(Rm6-Rm1)-Fнл6-(x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5))*
Heaviside(-0.117+x1(t1))=0}:
In_C1:={i1(0)=565, y1(0)=0.1045*0.3, x1(0)=0.1045}:
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);

dsol1:=proc(rkf45_x) ... end proc

T1:=array(1..1000, []): Z1:=array(1..1000, []): X1:=array(1..1000, []):
Y1:=array(1..1000, []): H1:=array(1..1000, []): E1:=array(1..1000, []):
k:=0:for t1 from 0 by 0.0001 to 0.00995 do k:=k+1: T1[k]:=op(2,op(1,dsol1(t1))):
H1[k]:=op(2,op(3,dsol1(t1))): E1[k]:=op(2,op(2,dsol1(t1))):
Z1[k]:=op(2,op(4,dsol1(t1))): end do:
i1:=plot([T1[i],E1[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i1:
x1:=plot([T1[i],H1[i],i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,
labels=["t,c","φ,Bφ"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x1:
print(op(2,op(2,dsol1(0.00995))));

14660.9682140639944

print(op(2,op(3,dsol1(0.01))));

.0763373977022676204

dsys2:={i2(t2)*(1*ra+0*rzb)+(1*(L11a+Ld+Lk)+0*Lzb)*diff(i2(t2),t2)+1*kp*0.076*n=u}:
In_C2:={i2(0)=op(2,op(2,dsol1(0.00995)))}:
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);

dsol2:=proc(rkf45_x) ... end proc

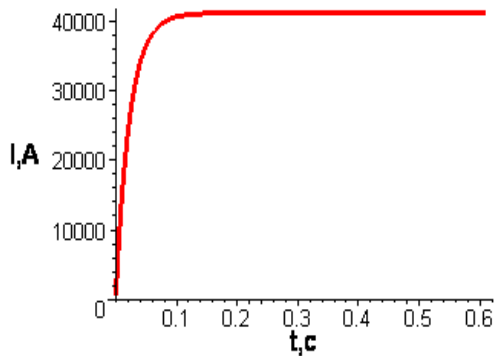
T2:=array(1..1000, []): Z2:=array(1..1000, []): X2:=array(1..1000, []):
Y2:=array(1..1000, []): H2:=array(1..1000, []): E2:=array(1..1000, []):

```

```

k:=0:for t2 from 0 by 0.005 to 0.6 do k:=k+1: T2[k]:=op(2,op(1,dsol2(t2)))+0.01:
E2[k]:=op(2,op(2,dsol2(t2))): end do:
i2:=plot([T2[i],E2[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i2:
x2:=plot([T2[i],0.156,i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,
labels=["t,c","Φ,B6"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x2:
display(i1,i2);

```



Усталене значення струму короткого замикання $I_{\text{кз}}$

`print (op (2,op (2,dsol1 (0.0001) ) ) ) ;735.66282`

Величина струму короткого замикання при 0,0001 с –

$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с})$

`print (op (2,op (2,dsol1 (0.6) ) ) ) ;40955.08067`

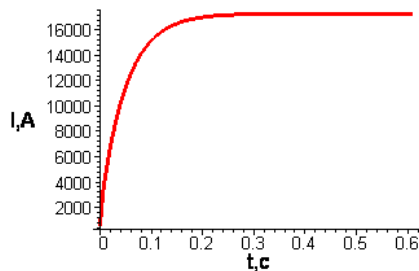
Розрахунок швидкості зростання струму:

$$\frac{di}{dt} = \frac{735,7 - 565}{0,0001} = 1707000 \text{ A/c.}$$

Розрахунок перехідних процесів у силовому колі електровоза ДЕ1 при короткому замиканні проведено відповідно до розрахунку в п. 3.1.1 зі зміною в математичній моделі кількості еквівалентних обмоток якоря та збудження, що залишаються в колі при різних варіантах виникнення КЗ, та частоти обертання вала тягових електродвигунів при різному їх з'єднанні.

Результати розрахунку наведені нижче.

3.1.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

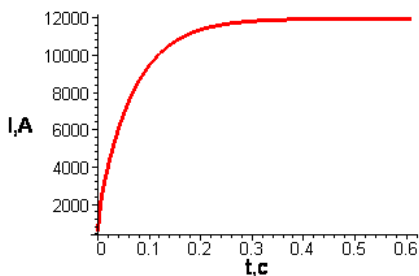


$$I_{\text{кз}} = 17200 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с}) = 603,4 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{603,4 - 565}{0,0001} = 384000 \text{ A/c.}$$

3.1.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

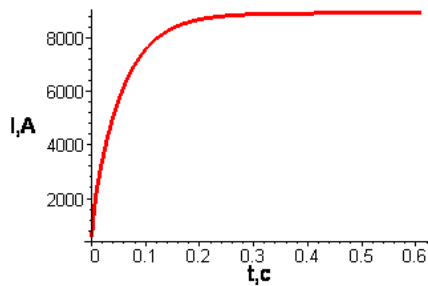


$$I_{\text{кз}} = 12000 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с}) = 588,4 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{588,4 - 565}{0,0001} = 234000 \text{ A/c.}$$

3.1.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

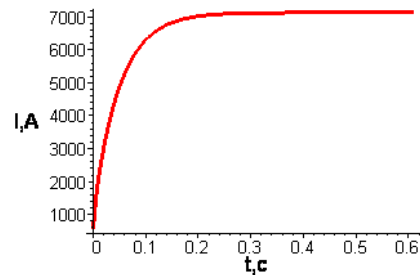


$$I_{\text{кз}} = 9000 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{c})} = 585,3 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{585,3 - 565}{0,0001} = 203000 \text{ A/c.}$$

3.1.6. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

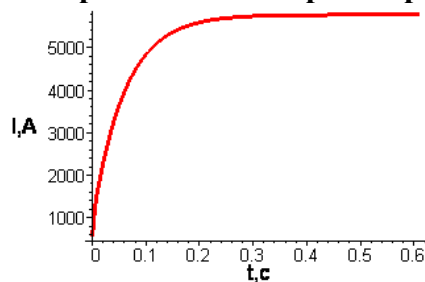


$$I_{\text{кз}} = 7200 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{c})} = 583 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{583 - 565}{0,0001} = 180000 \text{ A/c.}$$

3.1.7. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)

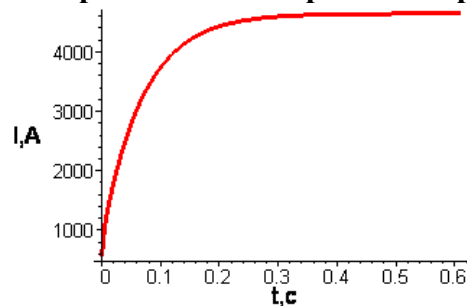


$$I_{\text{кз}} = 5800 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{c})} = 578,4 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{578,4 - 565}{0,0001} = 134000 \text{ A/c.}$$

3.1.8. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

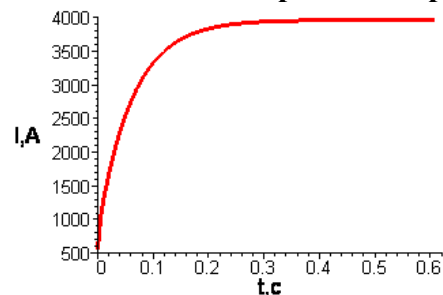


$$I_{\text{кз}} = 4660 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{c})} = 575,6 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{575,6 - 565}{0,0001} = 106000 \text{ A/c.}$$

3.1.9. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися п'ять обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

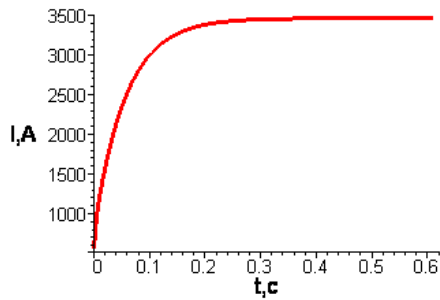


$$I_{\text{кз}} = 4000 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{c})} = 574,8 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{574,8 - 565}{0,0001} = 98000 \text{ A/c.}$$

3.1.10. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

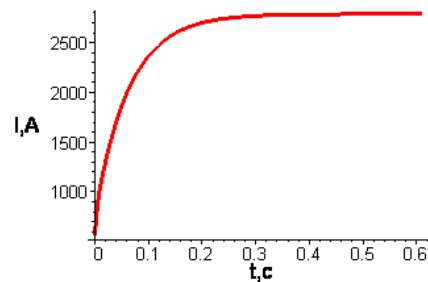


$$I_{\text{кз}} = 3500 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 574,1 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{574,1 - 565}{0,0001} = 91000 \text{ A/c.}$$

3.1.11. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та п'ять обмоток збудження тягових електродвигунів)

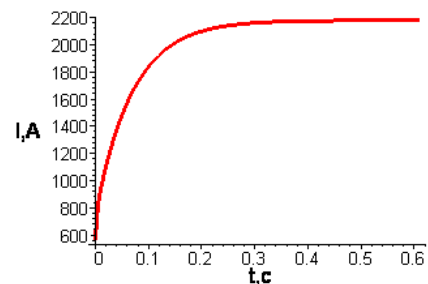


$$I_{\text{кз}} = 2800 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 572,6 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{572,6 - 565}{0,0001} = 76000 \text{ A/c.}$$

3.1.12. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

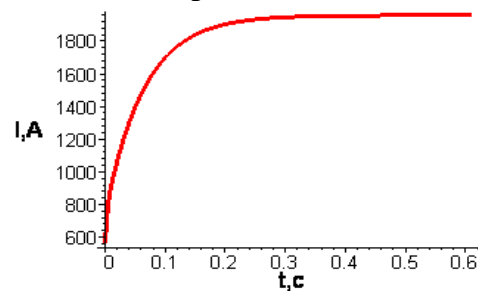


$$I_{\text{кз}} = 2190 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 571,4 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{571,4 - 565}{0,0001} = 64000 \text{ A/c.}$$

3.1.13. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися сім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

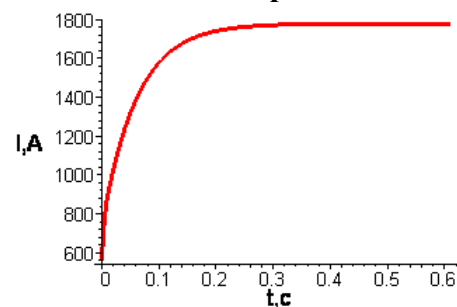


$$I_{\text{кз}} = 1960 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 571 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{571 - 565}{0,0001} = 60000 \text{ A/c.}$$

3.1.14. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися вісім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

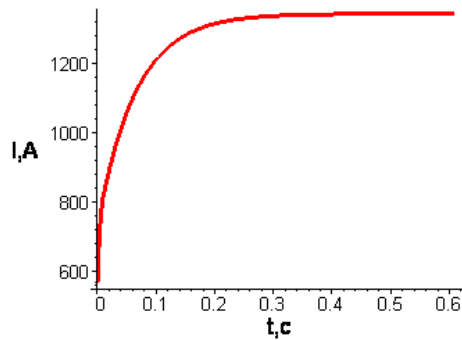


$$I_{\text{кз}} = 1770 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 570,7 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{570,7 - 565}{0,0001} = 57000 \text{ A/c.}$$

3.1.15. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися вісім обмоток якоря та сім обмоток збудження тягових електродвигунів)



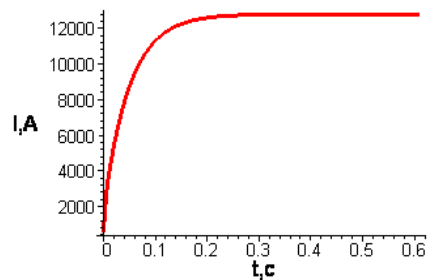
$$I_{\text{кз}} = 1330 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 570 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{570 - 565}{0,0001} = 50000 \text{ A/c.}$$

3.2. Послідовно-паралельне з'єднання тягових електродвигунів

3.2.1. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишилися дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

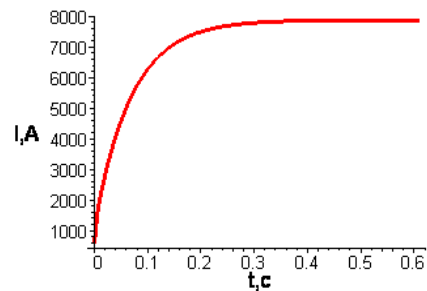


$$I_{\text{кз}} = 12870 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 598,3 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{598,3 - 565}{0,0001} = 333000 \text{ A/c.}$$

3.2.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишилися дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

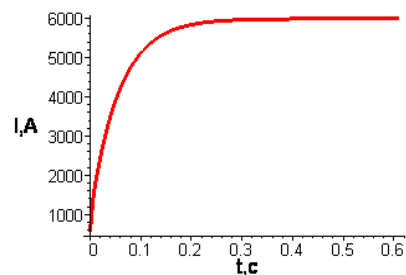


$$I_{\text{кз}} = 7880 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 582,1 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{582,1 - 565}{0,0001} = 171000 \text{ A/c.}$$

3.2.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишилися три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

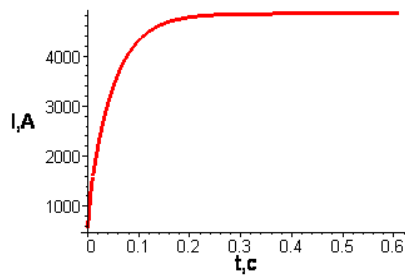


$$I_{\text{кз}} = 6030 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 579,8 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{579,8 - 565}{0,0001} = 148000 \text{ A/c.}$$

3.2.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

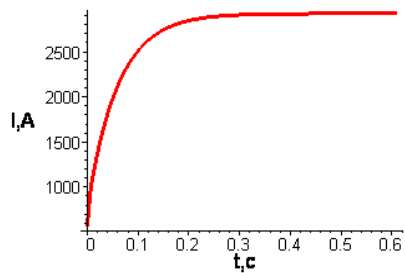


$$I_{кз} = 4870 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 578 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{578 - 565}{0,0001} = 130000 \text{ A/c.}$$

3.2.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)



$$I_{кз} = 2970 \text{ A.}$$

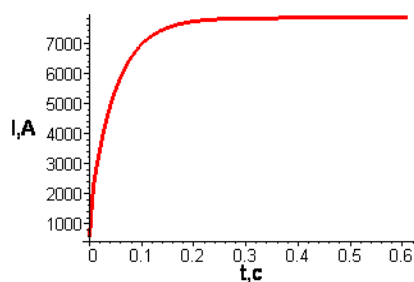
$$I_{кз(0,0001с)} = 572,8 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{572,8 - 565}{0,0001} = 78000 \text{ A/c}$$

3.3. Паралельне з'єднання тягових електродвигунів

Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

$$\beta = 100\%$$

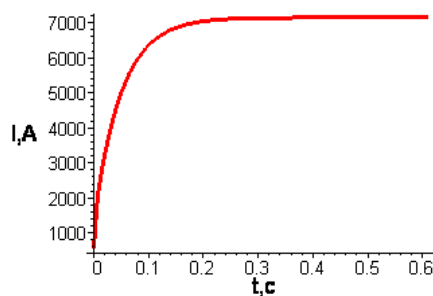


$$I_{кз} = 7870 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 588 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{588 - 565}{0,0001} = 230000 \text{ A/c.}$$

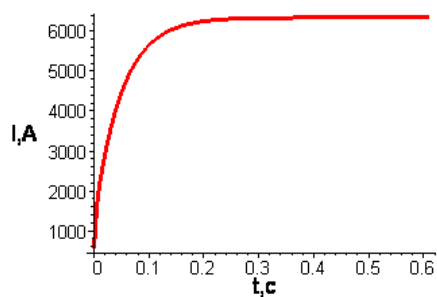
$$\beta = 78\%$$



$$I_{кз} = 7200 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 586,4 \text{ A.}$$

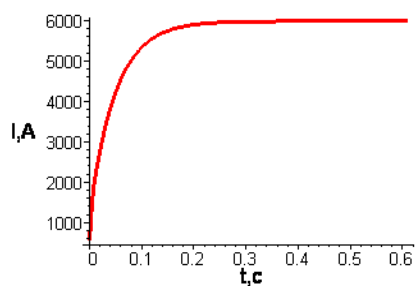
$$\frac{di}{dt} = \frac{586,4 - 565}{0,0001} = 214000 \text{ A/c.}$$

$\beta = 65\%$


$$I_{K3} = 6370 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 584,3 \text{ A.}$$

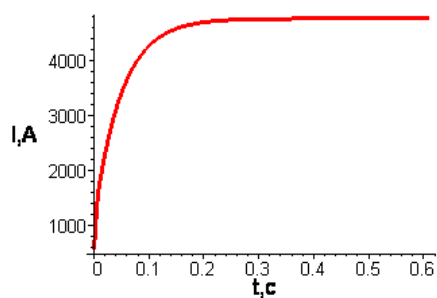
$$\frac{di}{dt} = \frac{584,3 - 565}{0,0001} = 193000 \text{ A/c}$$

 $\beta = 57\%$


$$I_{K3} = 6010 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 583,3 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{583,3 - 565}{0,0001} = 183000 \text{ A/c.}$$

 $\beta = 43\%$


$$I_{K3} = 4770 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 579,7 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{579,7 - 565}{0,0001} = 147000 \text{ A/c.}$$

Додаток И

Дослідження перехідних процесів при короткому замиканні в силовому колі електровоза ВЛ8 з врахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності при напрузі контактної мережі 3000 В

И.1. Послідовне з'єднання тягових електродвигунів

И.1.1. Перехідний процес при короткому замиканні, коли в силовому колі залишилась одна обмотка тягового електродвигуна

Rm1:=79200: - магнітний опір на першій ділянці апроксимованої магнітної характеристики
Rm2:=150584: - магнітний опір на другій ділянці апроксимованої магнітної характеристики
Rm3:=170883.75: - магнітний опір на третій ділянці апроксимованої магнітної характеристики
Rm4:=241508.57: **Rm5:=332712.3:**
u:=3000: - напруга живлення двигуна
ra:=0.098: - опір якорного кола тягового електродвигуна
rzб:=0.061: - опір кола збудження тягового електродвигуна
n:=155.7: **q:=2:** **kp:=(812/60):**
w:=48: - кількість витків обмотки головних полюсів
wd:=34: - кількість витків обмотки додаткового полюса
Гнл3:=9974.4: - намагнічуюча сила нелінійності на третій ділянці магнітної характеристики
Гнл2:=7104: - намагнічуюча сила нелінійності на другому участку магнітної характеристики
Гнл4:=17952: **Гнл5:=30336:**

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ГП

j:=35000: - електрична провідність сталі остова
j1:=17500: - електрична провідність сталі осердя ГП
j2:=35000: - електрична провідність сталі осердя ДП
hj:=7.6: - висота остова **lj:=42:** - довжина магнітної лінії
aj:=40: - довжина остова **ap:=25:** - ширина полюса
bp:=40: - довжина полюса **lp:=13:** - висота полюса
gm:=(j*hj*lj)/(16*aj)+((j1*ap*bp*lp)/(6*8*(ap^2+bp^2))): - магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ГП

gm:=19586.39981

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ДП

adp:=5.2: - ширина полюса
bdp:=45: - довжина полюса
ldp:=18.1: - висота полюса
gmd:=(j*hj*lj)/(16*aj)+((j2*adp*bdp*ldp)/(6*8*(adp^2+bdp^2))): - магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ДП

gmd:=18961.24625

Ia:=380: **ia:=Ia/(2*2):**
N:=812: **kpp:=0.2:**
waq:=kpp*N/(8*2*2): **Da:=74:**
Tau:=51.8: **Alin:=ia*N/(3.14*Da):**
Faq:=Tau*Alin/(2)*0.74: **vko:=0:**
waq1:=N/(8*2*2): **wl:=w-(1-vko)*waq;**

waq:=5.075000000

Індуктивність якоря

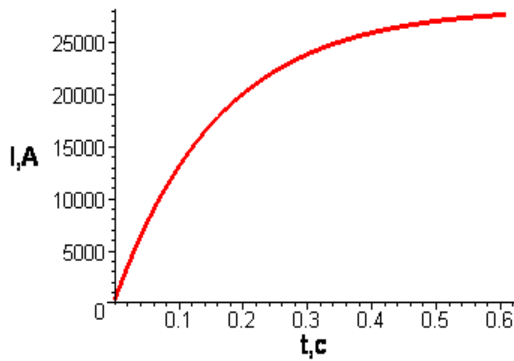
la:=40: - довжина якоря **Da:=660:** - діаметр якоря
a:=0.685: - коеф. полюсного перекриття **d:=7.7:** - повітряний зазор:
km:=0.3: - коефіцієнт насичення сталених частин шляху потоку реакції якоря:

```

kd:=1.135:- коеф. зубчасті якоря
L1a:=1.33*10^(-8) * (waq1^2*a^3*la*Da*km) / (kd*d) ;
L1a:=.002494445687
A:=3.59:          Z:=58:          m0:=0.4*3.14*10^(-6) :
L11a:=m0*(4*la*A*waq1^2/(Z)) ;
L11a:=.008009182304
Індуктивність котушок ДП
Qd:=4.78:-коефіцієнт розсіювання обмотки ДП
Fid:= 3.233*10^(-3) :- комутаційний магнітний потік
Iv:=380:-струм збудження
Ld:=(2*q*Qd*Fid*wd)/Iv;
Ld:=.005530812210

Індуктивність розсіювання котушок головних полюсів
Fi:=0.145:- основний магнітний потік          Q:=1.1:- коефіцієнт розсіювання ГП
Lzb:=(2*q*w*(Q-1)*Fi)/Iv;- Індуктивність обмотки ГП при номінальному усталеному режимі
Lzb:=.007326315790
dsys1:={i1(t1)*(1*ra+0*rzb)+0*((1*q*w*(Q-1)*x1(t1))/i1(t1))*diff(i1(t1),t1)+
1*(Ld+L11a+L1a)*diff(i1(t1),t1)+1*kp*x1(t1)*n+0*1*q*w*diff(x1(t1),t1)=u,
-0*w1*i1(t1)+1.23*Rm1*y1(t1)+gm*diff(y1(t1),t1)+x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4+
(x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4-(x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4))*Heaviside(-0.117+x1(t1))=0,
-0*w1*i1(t1)+5.29*Rm1*(x1(t1)-y1(t1))+0.477*gm*diff(x1(t1)-y1(t1),t1)+
x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4+(x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4-(x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4))*
Heaviside(-0.117+x1(t1))=0}:
In_C1:={i1(0)=380, y1(0)=0.145*0.3, x1(0)=0.145}:
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);
dsol1:=proc(rkf45_x) ... end proc
T1:=array(1..1000, []): Z1:=array(1..1000, []): X1:=array(1..1000, []):
Y1:=array(1..1000, []): H1:=array(1..1000, []): E1:=array(1..1000, []):
k:=0:for t1 from 0 by 0.0001 to 0.00995 do k:=k+1:
T1[k]:=op(2,op(1,dsol1(t1))): H1[k]:=op(2,op(3,dsol1(t1))):
E1[k]:=op(2,op(2,dsol1(t1))): Z1[k]:=op(2,op(4,dsol1(t1))): end do:
i1:=plot([T1[i],E1[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i1:
x1:=plot([T1[i],H1[i],i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,
labels=["t,c","Ф,Вб"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x1:
print(op(2,op(3,dsol1(0.01)))):
.103886265378902068
dsys2:={i2(t2)*(1*ra+0*rzb)+(1*(L11a+Ld+L1a)+0*Lzb)*diff(i2(t2),t2)+1*kp*0.1039*n=u}:
In_C2:={i2(0)=op(2,op(2,dsol1(0.00995)))}:
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);
dsol2:=proc(rkf45_x) ... end proc
T2:=array(1..1000, []): Z2:=array(1..1000, []): X2:=array(1..1000, []):
Y2:=array(1..1000, []): H2:=array(1..1000, []): E2:=array(1..1000, []):
k:=0:for t2 from 0 by 0.005 to 0.6 do k:=k+1: T2[k]:=op(2,op(1,dsol2(t2)))+0.01:
E2[k]:=op(2,op(2,dsol2(t2))): end do:
i2:=plot([T2[i],E2[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i2:
x2:=plot([T2[i],0.1039,i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,
labels=["t,c","Ф,Вб"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x2:
display(i1,i2);

```



Значення струму короткого замикання $I_{\text{кз}}$

`print (op(2,op(2,dsol1(0.0001)))) ;396.57062`

Величина струму короткого замикання при 0,0001 с – $I_{\text{кз}}(0,0001\text{с})$

`print (op(2,op(2,dsol1(0.6)))) ;28290.07145`

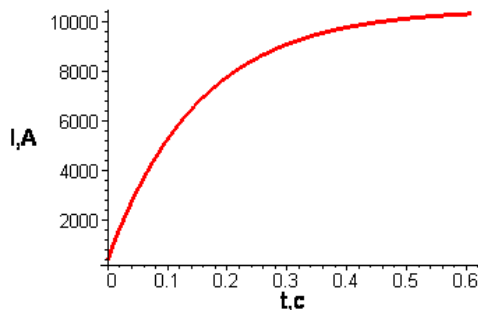
Розрахунок швидкості зростання

$$\text{струму: } \frac{di}{dt} = \frac{396,6 - 380}{0,0001} = 166000 \text{ A/c.}$$

Дослідження перехідних процесів у силовому колі електровоза ВЛ8 при короткому замиканні проведено відповідно до п. И.1.1. зі зміною в математичній моделі кількості еквівалентних обмоток якоря та збудження, що залишаються в колі при різних варіантах виникнення КЗ, та частоти обертання вала тягових електродвигунів при різному їх з'єднанні.

Результати наведені нижче.

И.1.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)



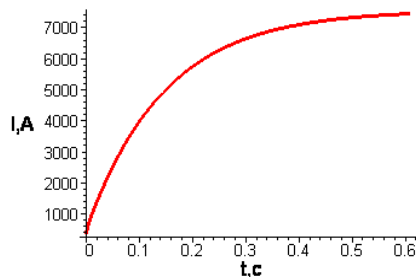
$$I_{\text{кз}} = 10340 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с}) = 388,1 \text{ A.}$$

Розрахунок швидкості зростання струму:

$$\frac{di}{dt} = \frac{388,1 - 380}{0,0001} = 81000 \text{ A/c.}$$

И.1.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

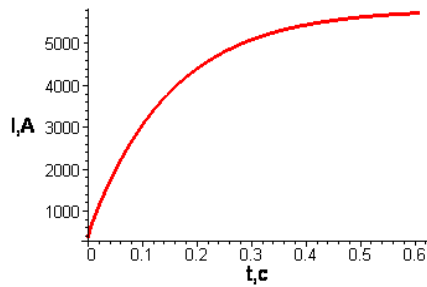


$$I_{\text{кз}} = 7500 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с}) = 387,4 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{387,4 - 380}{0,0001} = 74000 \text{ A/c.}$$

И.1.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

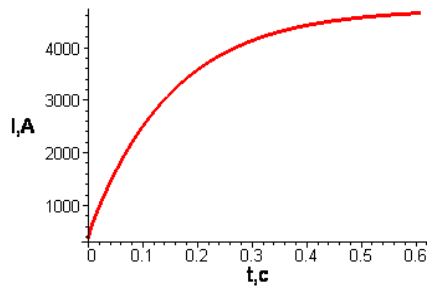


$$I_{кз} = 5760 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 385,4 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{385,4 - 380}{0,0001} = 54000 \text{ A/c.}$$

И.1.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

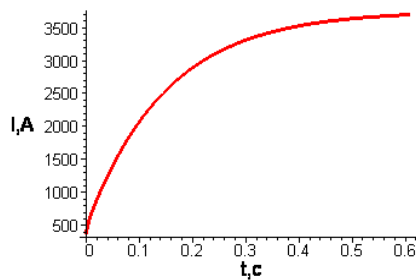


$$I_{кз} = 4700 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 384,3 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384,3 - 380}{0,0001} = 43000 \text{ A/c.}$$

И.1.6. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)

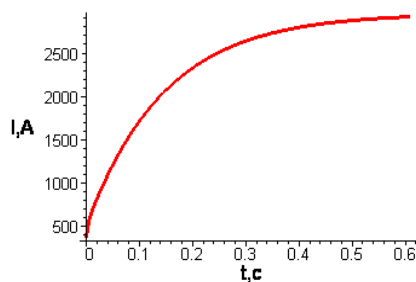


$$I_{кз} = 3710 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 384,2 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384,2 - 380}{0,0001} = 42000 \text{ A/c.}$$

И.1.7. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились чотири обмотки якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

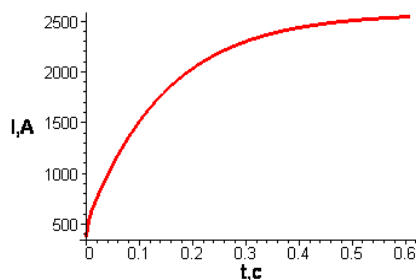


$$I_{кз} = 2930 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 384,1 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384,1 - 380}{0,0001} = 41000 \text{ A/c.}$$

И.1.8. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились п'ять обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

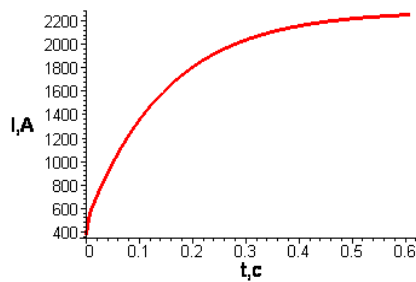


$$I_{кз} = 2550 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 383,5 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,5 - 380}{0,0001} = 35000 \text{ A/c.}$$

И.1.9. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

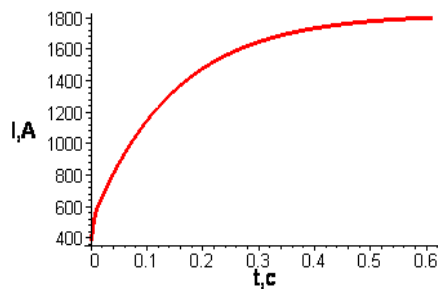


$$I_{\text{кз}} = 2280 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383,2 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,2 - 380}{0,0001} = 32000 \text{ A/c.}$$

И.1.10. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та п'ять обмоток збудження тягових електродвигунів)

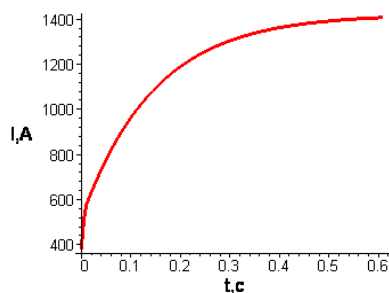


$$I_{\text{кз}} = 1810 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383,1 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,1 - 380}{0,0001} = 31000 \text{ A/c.}$$

И.1.11. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

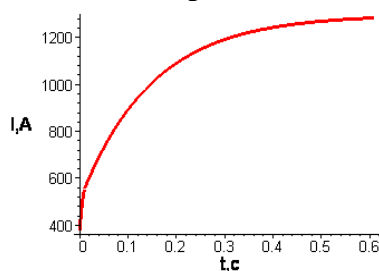


$$I_{\text{кз}} = 1410 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383 - 380}{0,0001} = 30000 \text{ A/c.}$$

И.1.12. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися сім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

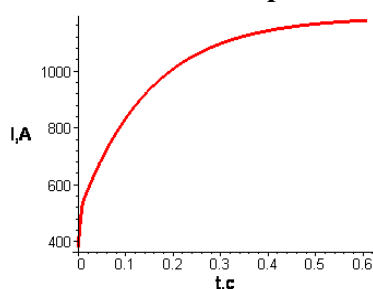


$$I_{\text{кз}} = 1290 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,7 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,7 - 380}{0,0001} = 27000 \text{ A/c.}$$

И.1.13. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися вісім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

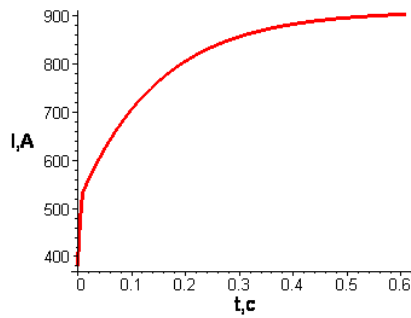


$$I_{\text{кз}} = 1180 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,6 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,6 - 380}{0,0001} = 26000 \text{ A/c.}$$

И.1.14. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися вісім обмоток якоря та сім обмоток збудження тягових електродвигунів)



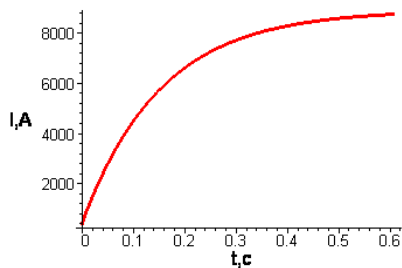
$$I_{\text{кз}} = 905 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,5 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,5 - 380}{0,0001} = 25000 \text{ A/c.}$$

И.2. Послідовно-паралельне з'єднання тягових електродвигунів

И.2.1. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

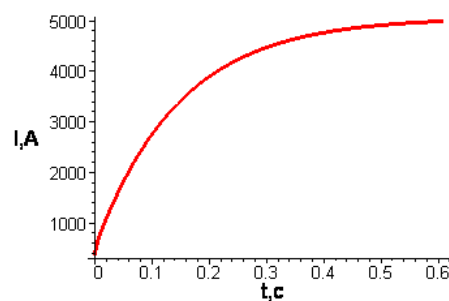


$$I_{\text{кз}} = 8810 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 386,8 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{386,8 - 380}{0,0001} = 68000 \text{ A/c.}$$

И.2.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

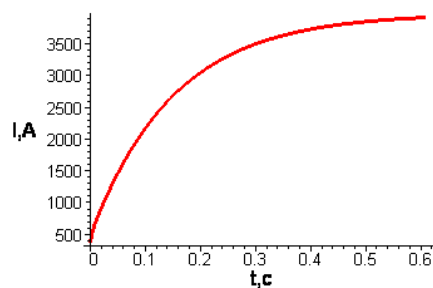


$$I_{\text{кз}} = 5040 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 386 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{386 - 380}{0,0001} = 60000 \text{ A/c.}$$

И.2.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

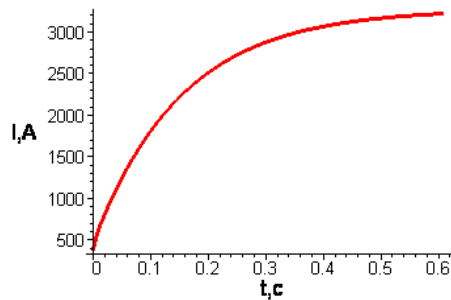


$$I_{\text{кз}} = 3930 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 384,1 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384,1 - 380}{0,0001} = 41000 \text{ A/c.}$$

И.2.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

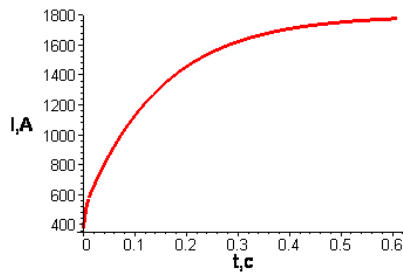


$$I_{\text{кз}} = 3235 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383,3 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,3 - 380}{0,0001} = 33000 \text{ A/c.}$$

И.2.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)



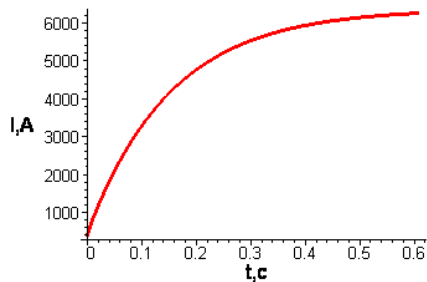
$$I_{\text{кз}} = 1790 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383 - 380}{0,0001} = 30000 \text{ A/c.}$$

И.3. Паралельне з'єднання тягових електродвигунів

Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)



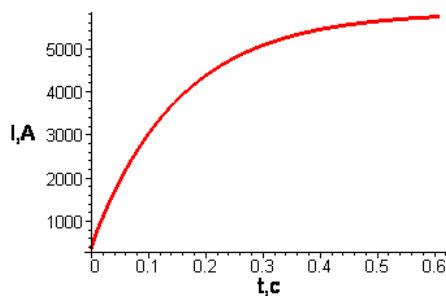
$$\beta = 100\%$$

$$I_{\text{кз}} = 6350 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 385,2 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{385,2 - 380}{0,0001} = 52000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 75\%$$

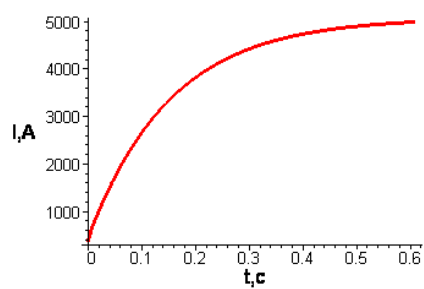


$$I_{\text{кз}} = 8810 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 384,8 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384,8 - 380}{0,0001} = 48000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 55\%$$

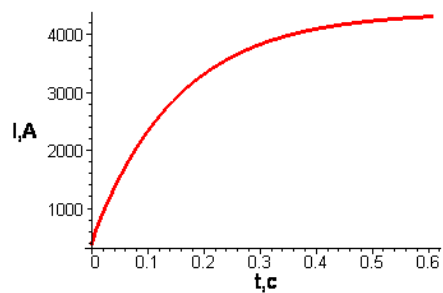


$$I_{K3} = 5030 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 384,2 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384,2 - 380}{0,0001} = 42000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 43\%$$

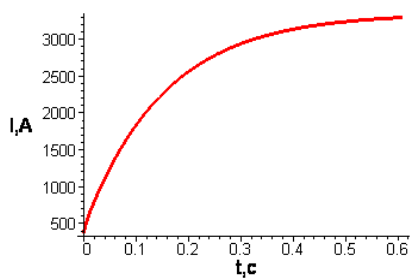


$$I_{K3} = 4320 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 383,7 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,7 - 380}{0,0001} = 37000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 36\%$$



$$I_{K3} = 3320 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 382,8 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,8 - 380}{0,0001} = 28000 \text{ A/c.}$$

Додаток К

Дослідження перехідних процесів при короткому замиканні в силовому колі електровоза ДЕ1 з врахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності при напрузі в контактній мережі 2200 В

К.1. Послідовне з'єднання тягових електродвигунів

К.1.1. Перехідний процес при короткому замиканні, коли в силовому колі залишилась одна обмотка якоря тягового електродвигуна

Rm1:=49778.8:- магнітний опір на першому участку апроксимованої магнітної характеристики

Rm2:=56740:- магнітний опір на другому участку апроксимованої магнітної характеристики

Rm3:=92000:- магнітний опір на третьому участку апроксимованої магнітної характеристики

Rm4:=133333.3:

Rm5:=224000:

Rm6:=327272.7:

Rm7:=407521.4:

u:=3000:- напруга живлення двигуна

ra:=0.0674: rzб:=0.0253:- опір кола двигуна

kp:=(984/60):

n:=183.6:

q:=3:

w:=16:- кількість витків обмотки головних полюсів

wd:=6:- кількість витків обмотки додаткового полюса

Fnл3:=2560:- намагнічуюча сила нелінійності на третьому участку магнітної характеристики

Fnл2:=320:- намагнічуюча сила нелінійності на другому участку магнітної характеристики

Fnл4:=6000:

Fnл5:=14400:

Fnл6:=25600:

Fnл7:=34880:

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ГП

j:=35000:- електрична провідність сталі остова **j1:=17500:-** електрична провідність сталі осердя ГП

j2:=35000:- електрична провідність сталі осердя ДП

hj:=14.95:- висота остова

lj:=16:- довжина магнітної лінії

aj:=60:- довжина остова

ap:=21.4:- ширина полюса

bp:=41:- довжина полюса

gm:=(j*hj*lj)/(16*aj)+((j1*ap*bp*lp)/(6*8*(ap^2+bp^2)))- магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ГП

gm:=9767.696253

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ДП

adp:=2.5:- ширина полюса **bdp:=41:-** довжина полюса **ldp:=9.47:-** висота полюса

gmd:=(j*hj*lj)/(16*aj)+((j2*adp*bdp*ldp)/(6*8*(adp^2+bdp^2)))- магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ДП

gmd:=9140.322947

Ia:=565: ia:=Ia/(2*3): N:=984: wk:=8: kpp:=0.2: waq:=kpp*984/(8*3*3):

Fko:=Ia*wk: Da:=74: Tau:=38.75: Alin:=ia*N/(3.14*Da): Faq:=Tau*Alin/(2)*0.75:

vko:=Fko/Faq: w1:=w-(1-vko)*waq:

waq:=2.733333333

vko:=.7800178336

w1:=15.39871541

Визначення індуктивності обмоток двигуна

Індуктивність якоря

la:=40:- довжина якоря **Da:=74:-** діаметр якоря **a:=0.75:-** коеф. полюсного перекриття

d:=0.5:- повітряний зазор **km:=0.3-** коефіцієнт насичення сталених частин шляху потоку реакції якоря :

kd:=1.478:- коеф. зубчасті якоря **waq1:=984/(8*3*3):**

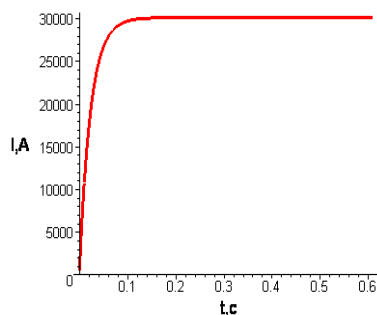
A:=2.68: la:=40: Z:=123: m0:=0.4*3.14*10^(-6): L11a:=m0*(4*la*A*waq1^2/(Z)):

L11a:=.0008178327704

```

      Індуктивність катушек компенсаційної обмотки
wk:=11: Zk:=8: Ak:=4*\p*10^(-7)*(5*d)/(5*a+4*d): Lk:=2*(wk^2*la*Ak)/(p*Zk);
      Lk := .0002104347826
      Індуктивність катушек ДП
Qd:=2.38:-коефіцієнт розсіювання обмотки ДП Fik:= 1.075*10^(-3):- комутаційний магнітний потік
Iv:=565:-струм збудження Ld:=(2*q*Qd*Fik*wd)/Iv: Ld:=0.00052;
      Ld := .00052
L:=Ld+L11a+Lk;
      L := .001548267553
      Індуктивність розсіювання катушек головних полюсів
Fi:=0.105:- основний магнітний потік Q:=1.25:- коефіцієнт розсіювання ГП
Lzb:=(2*q*w*(Q-1)*Fi)/Iv: Lzb:=0.0049;- індуктивність обмотки ГП при номінальному
установившемся режимі
      Lzb := .0049
dsys1:={i1(t1)*(1*ra+0*rzb)+0*((2*q*w*(Q-1)*x1(t1))/i1(t1))*diff(i1(t1),t1)+
1*(Ld+Lk+L11a)*diff(i1(t1),t1)+1*kp*x1(t1)*n+0*2*q*w*diff(x1(t1),t1)=u,
-0*w1*i1(t1)+1.23*Rm1*y1(t1)+gm*diff(y1(t1),t1)+x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5+
(x1(t1)*(Rm6-Rm1)-Fнл6-(x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5))*Heaviside(-0.117+x1(t1))=0,
-0*w1*i1(t1)+5.29*Rm1*(x1(t1)-y1(t1))+0.477*gm*diff(x1(t1)-y1(t1),t1)+
x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5+(x1(t1)*(Rm6-Rm1)-Fнл6-(x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5))*
Heaviside(-0.117+x1(t1))=0}:
In_C1:={i1(0)=565, y1(0)=0.1045*0.3, x1(0)=0.1045}:
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);
      dsol1 := proc(rkf45_x) ... end proc
T1:=array(1..1000, []): Z1:=array(1..1000, []): X1:=array(1..1000, []):
Y1:=array(1..1000, []): H1:=array(1..1000, []): E1:=array(1..1000, []):
k:=0:for t1 from 0 by 0.0001 to 0.00995 do k:=k+1: T1[k]:=op(2,op(1,dsol1(t1))):
H1[k]:=op(2,op(3,dsol1(t1))): E1[k]:=op(2,op(2,dsol1(t1))):
Z1[k]:=op(2,op(4,dsol1(t1))): end do:
i1:=plot([T1[i],E1[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i1;
print(op(2,op(2,dsol1(0.00995))));
      10846.4271991547412
print(op(2,op(3,dsol1(0.01))));
      .0763373838908479458
dsys2:={i2(t2)*(1*ra+0*rzb)+0*((2*q*w*(Q-1)*x2(t2))/i2(t2))*diff(i2(t2),t2)+
1*(Ld+Lk+L11a)*diff(i2(t2),t2)+1*kp*0.076*n+0*2*q*w*diff(x2(t2),t2)=u}:
In_C2:={i2(0)=op(2,op(2,dsol1(0.00995)))}:
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);
      dsol2 := proc(rkf45_x) ... end proc
T2:=array(1..1000, []): Z2:=array(1..1000, []): X2:=array(1..1000, []):
Y2:=array(1..1000, []): H2:=array(1..1000, []): E2:=array(1..1000, []):
k:=0:for t2 from 0 by 0.005 to 0.6 do k:=k+1: T2[k]:=op(2,op(1,dsol2(t2)))+0.01:
E2[k]:=op(2,op(2,dsol2(t2))): end do:
i2:=plot([T2[i],E2[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i2;

```



Значення струму короткого замикання $I_{кз}$

`print (op (2,op (2,dsol1 (0.0001) ) ) ) ;` 689.45861

Величина струму короткого замикання при 0,0001 с
– $I_{кз}(0,0001\text{с})$

`print (op (2,op (2,dsol1 (0.6) ) ) ) ;` 30026.7546

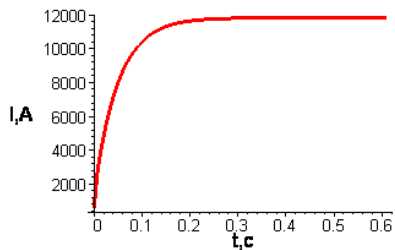
Розрахунок швидкості зростання

струму: $\frac{di}{dt} = \frac{689,5 - 565}{0,0001} = 1245000 \text{ A/c.}$

Дослідження перехідних процесів у силовому колі електровоза ДЕ1 при короткому замиканні проведено відповідно до п. К.1.1. зі зміною в математичній моделі кількості еквівалентних обмоток якоря та збудження, що залишаються в колі при різних варіантах виникнення КЗ, та частоти обертання вала тягових електродвигунів при різному їх з'єднанні.

Результати наведені нижче.

К.1.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

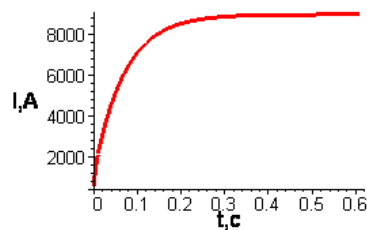


$$I_{\text{КЗ}} = 11860 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 593,6 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{593,6 - 565}{0,0001} = 286000 \text{ A/c.}$$

К.1.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

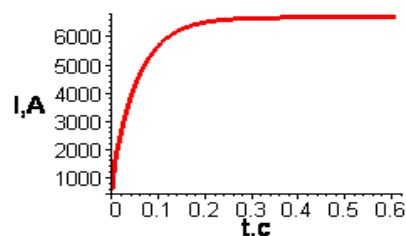


$$I_{\text{КЗ}} = 9010 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 583 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{583 - 565}{0,0001} = 180000 \text{ A/c.}$$

К.1.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

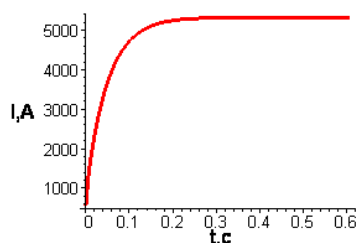


$$I_{\text{КЗ}} = 6680 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 580,6 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{580,6 - 565}{0,0001} = 156000 \text{ A/c.}$$

К.1.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

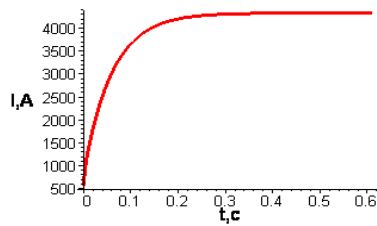


$$I_{\text{КЗ}} = 5330 \text{ A.}$$

$$I_{\text{КЗ}(0,0001\text{с})} = 578,7 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{578,7 - 565}{0,0001} = 137000 \text{ A/c.}$$

К.1.6. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)

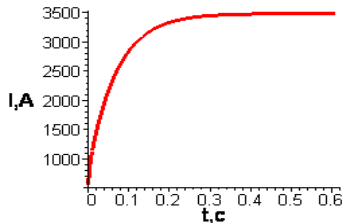


$$I_{\text{кз}} = 4330 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{c})} = 575,6 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{575,6 - 565}{0,0001} = 106000 \text{ A/c.}$$

К.1.7. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

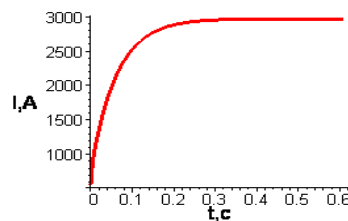


$$I_{\text{кз}} = 3490 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{c})} = 573,6 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{573,6 - 565}{0,0001} = 86000 \text{ A/c.}$$

К.1.8. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися п'ять обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

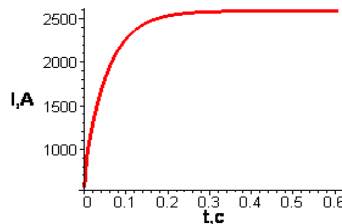


$$I_{\text{кз}} = 2980 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{c})} = 573 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{573 - 565}{0,0001} = 80000 \text{ A/c.}$$

К.1.9. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

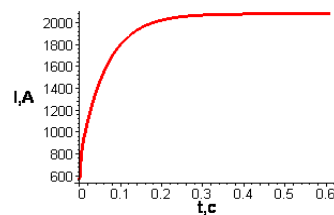


$$I_{\text{кз}} = 2600 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{c})} = 572,4 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{572,4 - 565}{0,0001} = 74000 \text{ A/c.}$$

К.1.10. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та п'ять обмоток збудження тягових електродвигунів)

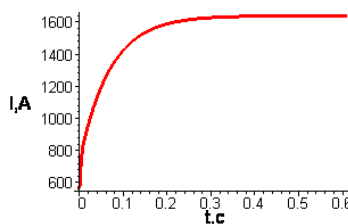


$$I_{\text{кз}} = 2100 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{c})} = 571,3 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{571,3 - 565}{0,0001} = 63000 \text{ A/c.}$$

К.1.11. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

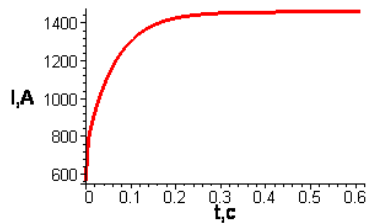


$$I_{\text{кз}} = 1640 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{c})} = 570,6 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{570,6 - 565}{0,0001} = 56000 \text{ A/c.}$$

К.1.12. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися сім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

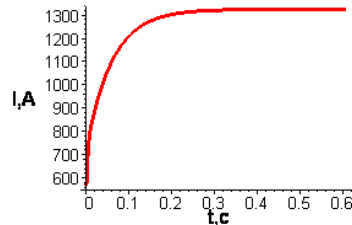


$$I_{\text{кз}} = 1460 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 570,2 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{570,2 - 565}{0,0001} = 52000 \text{ A/c.}$$

К.1.13. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися вісім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

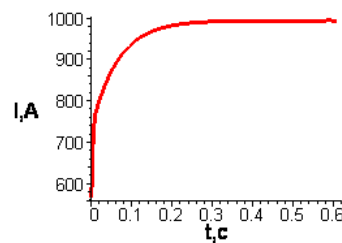


$$I_{\text{кз}} = 1330 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 569,9 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{569,9 - 565}{0,0001} = 49000 \text{ A/c.}$$

К.1.14. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися вісім обмоток якоря та сім обмоток збудження тягових електродвигунів)



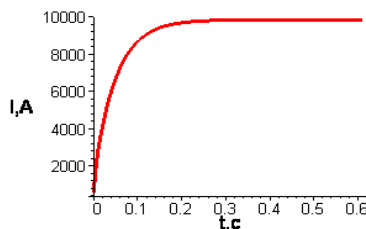
$$I_{\text{кз}} = 1000 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 569,5 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{569,5 - 565}{0,0001} = 45000 \text{ A/c.}$$

К.2. Послідовно-паралельне з'єднання тягових електродвигунів

К.2.1. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишилися дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

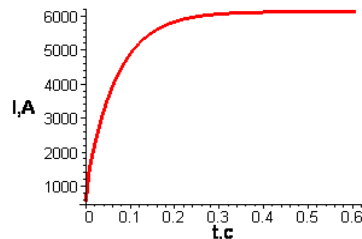


$$I_{\text{кз}} = 9900 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 590 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{590 - 565}{0,0001} = 250000 \text{ A/c.}$$

К.2.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишилися дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

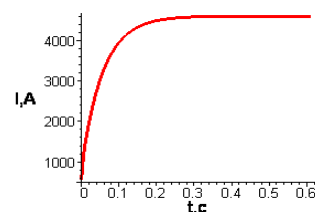


$$I_{\text{кз}} = 6200 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 578,4 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{578,4 - 565}{0,0001} = 134000 \text{ A/c.}$$

К.2.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишилися три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

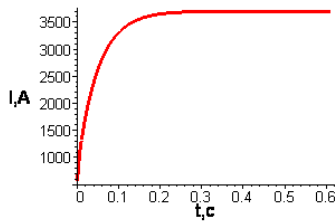


$$I_{\text{кз}} = 4600 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 576,6 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{576,6 - 565}{0,0001} = 116000 \text{ A/c.}$$

К.2.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

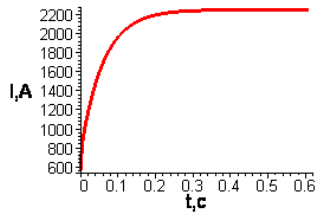


$$I_{\text{кз}} = 3700 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 575,1 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{575,1 - 565}{0,0001} = 101000 \text{ A/c.}$$

К.2.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)



$$I_{\text{кз}} = 2250 \text{ A.}$$

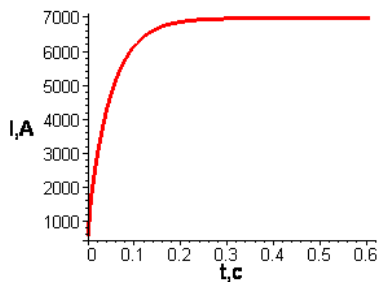
$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 571,4 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{571,4 - 565}{0,0001} = 64000 \text{ A/c.}$$

К.3. Паралельне з'єднання тягових електродвигунів

Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

$$\beta = 100\%$$

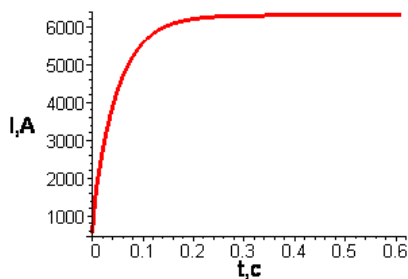


$$I_{\text{кз}} = 7000 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 582,6 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{582,6 - 565}{0,0001} = 176000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 78\%$$

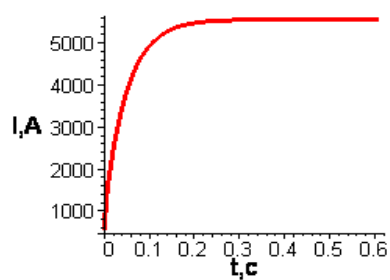


$$I_{\text{кз}} = 6310 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 581,2 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{581,2 - 565}{0,0001} = 162000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 65\%$$

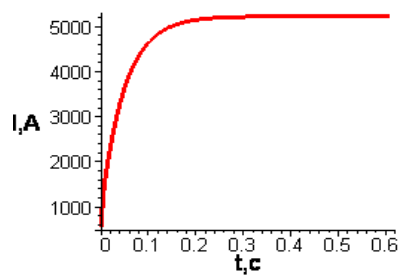


$$I_{K3} = 5600 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 579,7 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{579,7 - 565}{0,0001} = 147000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 57\%$$

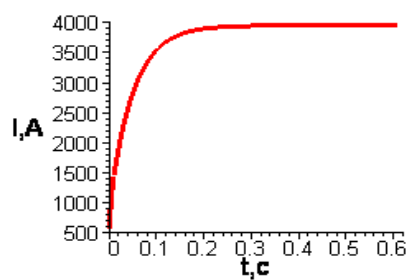


$$I_{K3} = 5200 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 579 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{579 - 565}{0,0001} = 140000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 43\%$$



$$I_{K3} = 3950 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 576,3 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{576,3 - 565}{0,0001} = 113000 \text{ A/c.}$$

Додаток Л

Дослідження перехідних процесів при короткому замиканні в силовому колі електровоза ВЛ8 з врахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності при напрузі в контактній мережі 2200 В

Л.1. Послідовне з'єднання тягових електродвигунів

Л.1.1. Перехідний процес при короткому замиканні, коли в силовому колі залишилась одна обмотка якоря тягового електродвигуна

$Rm1 := 79200$:- магнітний опір на першому участку апроксимованої магнітної характеристики
 $Rm2 := 150584$:- магнітний опір на другому участку апроксимованої магнітної характеристики
 $Rm3 := 170883.75$:- магнітний опір на третьому участку апроксимованої магнітної характеристики
 $Rm4 := 241508.57$; $Rm5 := 332712.3$:
 $u := 2200$:- напруга живлення двигуна $ra := 0.098$; $rzp := 0.061$:- опір кола двигуна
 $kp := (812/60)$; $n := 114.6$; $q := 2$:
 $w := 48$:- кількість витків обмотки головних полюсів
 $wd := 34$:- кількість витків обмотки додаткового полюса
 $F_{nl3} := 9974.4$:- намагнічуюча сила нелінійності на третьому участку магнітної характеристики
 $F_{nl2} := 7104$:- намагнічуюча сила нелінійності на другому участку магнітної характеристики
 $F_{nl4} := 17952$; $F_{nl5} := 30336$:

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ГП

$j := 35000$:- електрична провідність сталі остова
 $j1 := 17500$:- електрична провідність сталі осердя ГП
 $j2 := 35000$:- електрична провідність сталі осердя ДП
 $hj := 7.6$:- висота остова $lj := 42$:- довжина магнітної лінії
 $aj := 40$:- довжина остова $ap := 25$:- ширина полюса
 $bp := 40$:- довжина полюса $lp := 13$:- висота полюса
 $gm := (j * hj * lj) / (16 * aj) + ((j1 * ap * bp * lp) / (6 * 8 * (ap^2 + bp^2)))$;- магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ГП $gm := 19586.39981$

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ДП

$adp := 5.2$:- ширина полюса $bdp := 45$:- довжина полюса
 $ldp := 18.1$:- висота полюса
 $gmd := (j * hj * lj) / (16 * aj) + ((j2 * adp * bdp * ldp) / (6 * 8 * (adp^2 + bdp^2)))$;- магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ДП $gmd := 18961.24625$

$Ia := 380$; $ia := Ia / (2 * 2)$; $N := 812$; $kpp := 0.2$; $waq := kpp * N / (8 * 2 * 2)$;
 $Da := 74$; $Tau := 51.8$; $Alin := ia * N / (3.14 * Da)$;
 $Faq := Tau * Alin / (2) * 0.74$; $vko := 0$; $waq1 := N / (8 * 2 * 2)$;
 $wl := w - (1 - vko) * waq$; $waq := 5.075000000$

$$waq1 := \frac{203}{8}$$

$$wl := 42.92500000$$

Визначення індуктивності обмоток двигуна

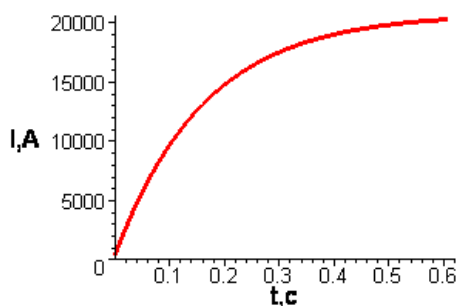
Індуктивність якоря

$la := 40$:- довжина якоря $Da := 660$:- діаметр якоря
 $a := 0.685$:- коеф. полюсного перекриття $d := 7.7$:- повітряний зазор:
 $km := 0.3$ - коефіцієнт насичення сталених частин шляху потоку реакції якоря:
 $kd := 1.135$:- коеф. зубчасті якоря
 $L1a := 1.33 * 10^{(-8)} * (waq1^2 * a^3 * la * Da * km) / (kd * d)$;
 $L1a := .002494445687$

```

A:=3.59:   Z:=58:   m0:=0.4*3.14*10^(-6):
L11a:=m0*(4*la*A*waq1^2/(Z));   L11a:=.008009182304
                                     Індуктивність котушок ДП
Qd:=4.78:-коефіцієнт розсіювання обмотки ДП
Fid:= 3.233*10^(-3):- комутаційний магнітний потік
Iv:=380:-струм збудження   Ld:=(2*q*Qd*Fid*wd)/Iv;   Ld:=.005530812210
L:=Ld+L11a+L1a;   L:=.01603444020
                                     Індуктивність розсіювання котушок головних полюсів
Fi:=0.145:- основний магнітний потік   Q:=1.1:- коефіцієнт розсіювання ГП
Lzb:=(2*q*w*(Q-1)*Fi)/Iv;- Індуктивність обмотки ГП при номінальному усталеному режимі
Lzb:=.007326315790
dsys1:={i1(t1)*(1*ra+0*rzb)+0*((2*q*w*(Q-1)*x1(t1))/i1(t1))*diff(i1(t1),t1)+
1*(Ld+L11a+L1a)*diff(i1(t1),t1)+1*kp*x1(t1)*n+0*2*q*w*diff(x1(t1),t1)=u,
-0*w1*i1(t1)+1.23*Rm1*y1(t1)+gm*diff(y1(t1),t1)+x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4+
(x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4-(x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4))*Heaviside(-0.117+x1(t1))=0,
-0*w1*i1(t1)+5.29*Rm1*(x1(t1)-y1(t1))+0.477*gm*diff(x1(t1)-y1(t1),t1)+
x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4+(x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4-(x1(t1)*(Rm4-Rm1)-Fнл4))*
Heaviside(-0.117+x1(t1))=0}:
In_C1:={i1(0)=380, y1(0)=0.145*0.3, x1(0)=0.145}:
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)]));
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);
                                     dsol1:=proc(rkf45_x) ... end proc
T1:=array(1..1000, []):   X1:=array(1..1000, []):
Y1:=array(1..1000, []):   H1:=array(1..1000, []):
E1:=array(1..1000, []):
k:=0:for t1 from 0 by 0.0001 to 0.00995 do k:=k+1:
T1[k]:=op(2,op(1,dsol1(t1))):   H1[k]:=op(2,op(3,dsol1(t1))):
E1[k]:=op(2,op(2,dsol1(t1))):   Z1[k]:=op(2,op(4,dsol1(t1))):   end do:
i1:=plot([T1[i],E1[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i1;
x1:=plot([T1[i],H1[i],i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,
labels=["t,c","Φ,B6"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x1:
print(op(2,op(2,dsol1(0.00995)))); 1568.14178680468172
print(op(2,op(3,dsol1(0.01)))); .103886270740430525
dsys2:={i2(t2)*(1*ra+0*rzb)+(1*(L11a+Ld+L1a)+0*Lzb)*diff(i2(t2),t2)+
1*kp*0.1039*n=u}:
In_C2:={i2(0)=op(2,op(2,dsol1(0.00995)))}:
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);
                                     dsol2:=proc(rkf45_x) ... end proc
T2:=array(1..1000, []): Z2:=array(1..1000, []): X2:=array(1..1000, []):
Y2:=array(1..1000, []): H2:=array(1..1000, []): E2:=array(1..1000, []):
k:=0:for t2 from 0 by 0.005 to 0.6 do k:=k+1:
T2[k]:=op(2,op(1,dsol2(t2)))+0.01:
E2[k]:=op(2,op(2,dsol2(t2))): end do:
i2:=plot([T2[i],E2[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i2:
x2:=plot([T2[i],0.1039,i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,
labels=["t,c","Φ,B6"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x2:
display(i1,i2);

```



Значення струму короткого замикання $I_{\text{кз}}$ за 0,6 с.

```
print (op (2,op (2,dsol1 (0.0001)))) ; 392.08474
```

Величина струму короткого замикання при 0,0001 с –

$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с})$

```
print (op (2,op (2,dsol1 (0.6)))) ; 20744.46108
```

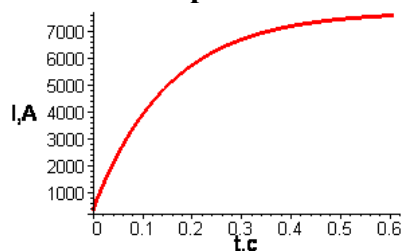
Розрахунок швидкості зростання

$$\text{струму: } \frac{di}{dt} = \frac{392,1 - 380}{0,0001} = 121000 \text{ А/с.}$$

Дослідження перехідних процесів у силовому колі електровоза ВЛ8 при короткому замиканні проведено відповідно до п. Л.1.1. зі зміною в математичній моделі кількості еквівалентних обмоток якоря та збудження, що залишаються в колі при різних варіантах виникнення КЗ, та частоти обертання вала тягових електродвигунів при різному їх з'єднанні.

Результати наведені нижче.

Л.1.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

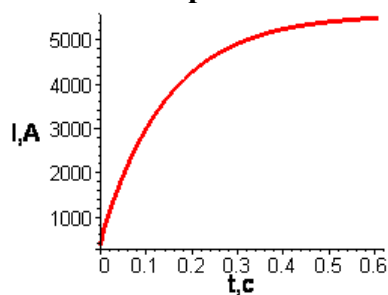


$$I_{\text{кз}} = 7630 \text{ А.}$$

$$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с}) = 386,3 \text{ А.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{386,3 - 380}{0,0001} = 63000 \text{ А/с.}$$

Л.1.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

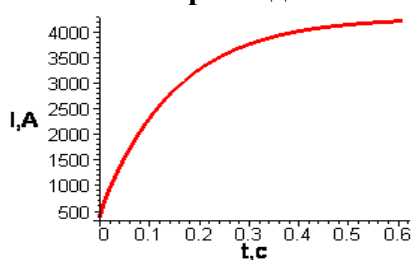


$$I_{\text{кз}} = 5520 \text{ А.}$$

$$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с}) = 386 \text{ А.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{386 - 380}{0,0001} = 60000 \text{ А/с.}$$

Л.1.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

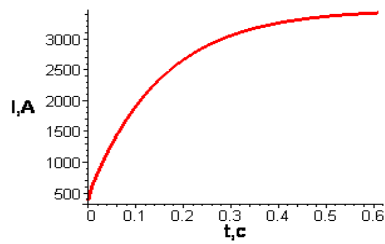


$$I_{\text{кз}} = 4250 \text{ А.}$$

$$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с}) = 384,4 \text{ А.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384,4 - 380}{0,0001} = 44000 \text{ А/с.}$$

Л.1.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

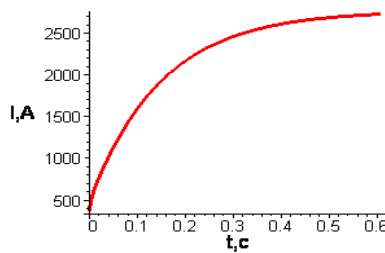


$$I_{\text{кз}} = 3440 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383,6 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,6 - 380}{0,0001} = 36000 \text{ A/c.}$$

Л.1.6. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)

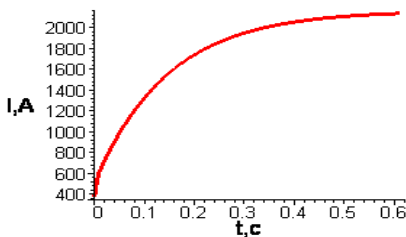


$$I_{\text{кз}} = 2740 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383,5 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,5 - 380}{0,0001} = 35000 \text{ A/c.}$$

Л.1.7. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

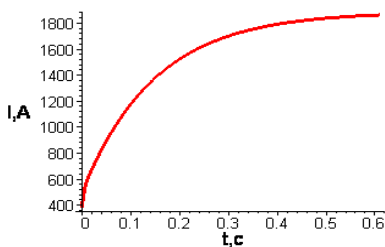


$$I_{\text{кз}} = 2140 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383,4 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,4 - 380}{0,0001} = 34000 \text{ A/c.}$$

Л.1.8. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися п'ять обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

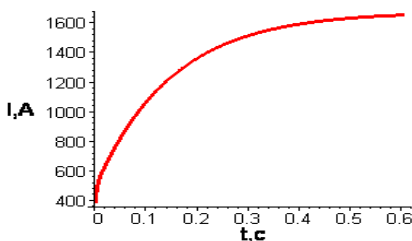


$$I_{\text{кз}} = 1870 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383,1 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,1 - 380}{0,0001} = 31000 \text{ A/c.}$$

Л.1.9. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

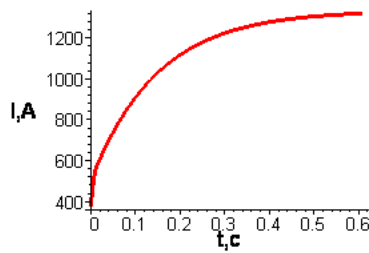


$$I_{\text{кз}} = 1660 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,75 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,75 - 380}{0,0001} = 27500 \text{ A/c.}$$

Л.1.10. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились шість обмоток якоря та п'ять обмоток збудження тягових електродвигунів)

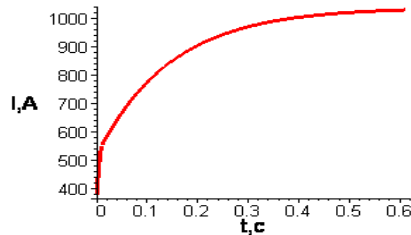


$$I_{\text{кз}} = 1200 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,7 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,7 - 380}{0,0001} = 27000 \text{ A/c.}$$

Л.1.11. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились шість обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

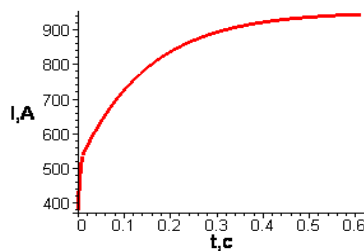


$$I_{\text{кз}} = 1030 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,6 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,6 - 380}{0,0001} = 26000 \text{ A/c.}$$

Л.1.12. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились сім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

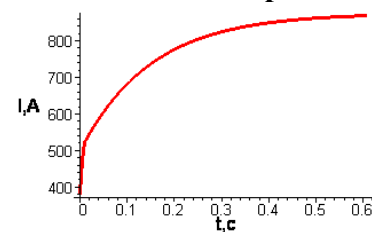


$$I_{\text{кз}} = 950 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,5 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,5 - 380}{0,0001} = 25000 \text{ A/c.}$$

Л.1.13. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились вісім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

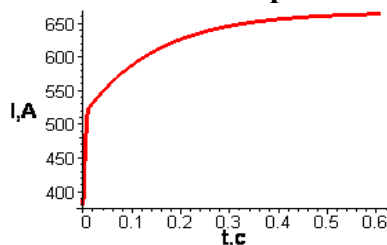


$$I_{\text{кз}} = 870 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,3 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,3 - 380}{0,0001} = 23000 \text{ A/c.}$$

Л.1.14. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились вісім обмоток якоря та сім обмоток збудження тягових електродвигунів)



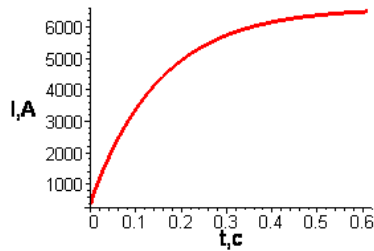
$$I_{\text{кз}} = 660 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,2 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,2 - 380}{0,0001} = 22000 \text{ A/c.}$$

Л.2. Послідовно-паралельне з'єднання тягових електродвигунів

Л.2.1. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

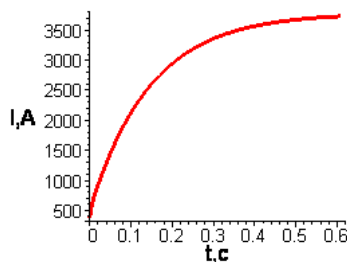


$$I_{\text{кз}} = 6500 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 385 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{385 - 380}{0,0001} = 50000 \text{ A/c.}$$

Л.2.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

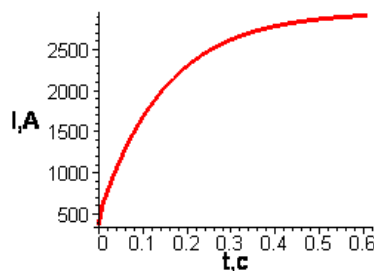


$$I_{\text{кз}} = 3750 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 384,7 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384,7 - 380}{0,0001} = 47000 \text{ A/c.}$$

Л.2.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

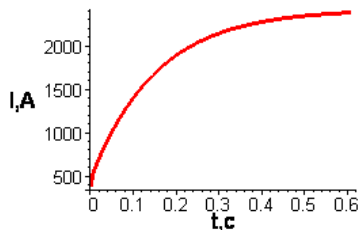


$$I_{\text{кз}} = 3000 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383,5 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,5 - 380}{0,0001} = 35000 \text{ A/c.}$$

Л.2.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

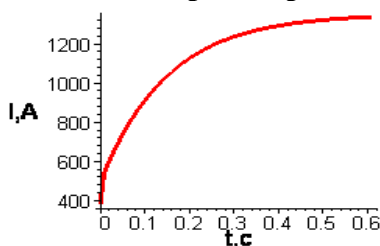


$$I_{\text{кз}} = 2400 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,7 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,7 - 380}{0,0001} = 27000 \text{ A/c.}$$

Л.2.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)



$$I_{\text{кз}} = 1340 \text{ A.}$$

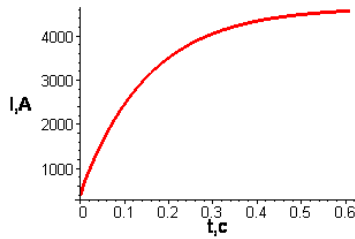
$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,5 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,5 - 380}{0,0001} = 25000 \text{ A/c.}$$

Л.3 Паралельне з'єднання тягових електродвигунів

Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

$$\beta = 100\%$$

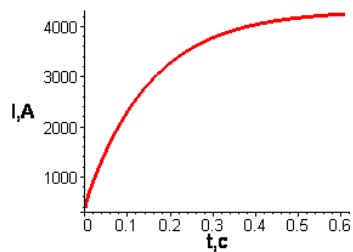


$$I_{уст.кз} = 4580 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 384 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384 - 380}{0,0001} = 40000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 75\%$$

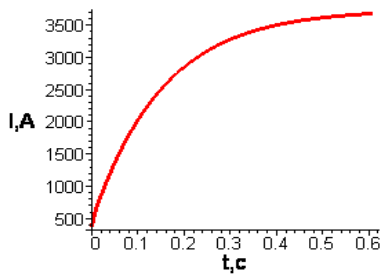


$$I_{кз} = 4270 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 383,8 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,8 - 380}{0,0001} = 38000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 55\%$$

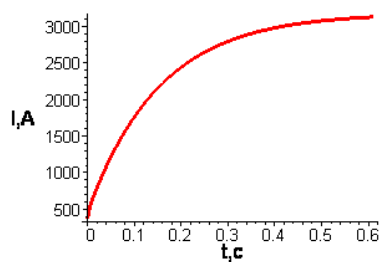


$$I_{кз} = 3700 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 383,4 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,4 - 380}{0,0001} = 34000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 43\%$$

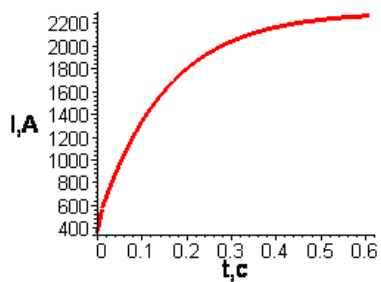


$$I_{кз} = 3150 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 383 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383 - 380}{0,0001} = 30000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 36\%$$



$$I_{кз} = 2270 \text{ A.}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 382,4 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,4 - 380}{0,0001} = 24000 \text{ A/c.}$$

Додаток М

Дослідження перехідних процесів при короткому замиканні в силовому колі електровоза ДЕ1 з врахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності при напрузі контактної мережі 4000 В

М.1. Послідовне з'єднання тягових електродвигунів

М.1.1. Перехідний процес при короткому замиканні, коли в силовому колі залишилась одна обмотка якоря тягового електродвигуна

Rm1:=49778.8: - магнітний опір на першій ділянці апроксимованої магнітної характеристики
Rm2:=57883.87: - магнітний опір на другій ділянці апроксимованої магнітної характеристики
Rm3:=84600: - магнітний опір на третій ділянці апроксимованої магнітної характеристики
Rm4:=138322.6: Rm5:=341880.34: Rm6:=397377.04918: Rm7:=762580.645161:
u:=4000: - напруга живлення двигуна
ra:=0.0674: - опір кола двигуна
kp:=(984/60):
n:=244.6:
q:=3:
w:=16: - кількість витків обмотки головних полюсів
wd:=6: - кількість витків обмотки додаткового полюса
Фнл3:=1968: - намагнічуюча сила нелінійності на третій ділянці магнітної характеристики
Фнл2:=384: - намагнічуюча сила нелінійності на другій ділянці магнітної характеристики
Фнл4:=6464: Фнл5:=27200: Фнл6:=32000: Фнл7:=72000:

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ГП

j:=35000: - електрична провідність сталі остова
j1:=17500: - електрична провідність сталі осердя ГП
j2:=35000: - електрична провідність сталі осердя ДП
hj:=14.95: - висота остова
lj:=16: - довжина магнітної лінії
aj:=60: - довжина остова **ap:=21.4:** - ширина полюса
bp:=41: - довжина полюса **lp:=7:** - висота полюса
gm:=(j*hj*lj)/(16*aj)+((j1*ap*bp*lp)/(6*8*(ap^2+bp^2))): - магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ГП

gm:=9767.696253

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ДП

adp:=2.5: - ширина полюса **bdp:=41:** - довжина полюса **ldp:=9.47:** - висота полюса
gmd:=(j*hj*lj)/(16*aj)+((j2*adp*bdp*ldp)/(6*8*(adp^2+bdp^2))): - магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ДП

gmd:=9140.322947

Ia:=565: ia:=Ia/(2*3): N:=984: wk:=8: kpp:=0.2: waq:=kpp*984/(8*3*3):
Fko:=Ia*wk: Da:=74: Tau:=38.75: Alin:=ia*N/(3.14*Da):
Faq:=Tau*Alin/(2)*0.75: vko:=Fko/Faq:
w1:=w-(1-vko)*waq:

waq:=2.733333333

vko:=.7800178336

wI:=15.39871541

Визначення індуктивності обмоток двигуна

Індуктивність якоря

la:=40: - довжина якоря

Da:=74: - діаметр якоря

```

a:=0.75:- коеф. полюсного перекриття          d:=0.5:- повітряний зазор:
km:=0.3- коефіцієнт насичення сталених частин шляху потоку реакції якоря :
kd:=1.478:- коеф. зубчасті якоря                waq1:=984/(8*3*3):
A:=2.68: la:=40: Z:=123: m0:=0.4*3.14*10^(-6):
L11a:=m0*(4*la*A*waq1^2/(Z));

L11a:=.0008178327704
Індуктивність котушок компенсаційної обмотки
wk:=11: Zk:=8: Ak:=4*p*10^(-7)*(5*d)/(5*a+4*d):
Lk:=2*(wk^2*la*Ak)/(p*Zk);

Lk:=.0002104347826
Індуктивність котушок ДП
Qd:=2.38:-коефіцієнт розсіювання обмотки ДП
Fik:= 1.075*10^(-3):- комутаційний магнітний потік      Iv:=565:-струм збудження
Ld:=(2*q*Qd*Fik*wd)/Iv: Ld:=0.00052;

Ld:=.00052
Індуктивність розсіювання котушок головних полюсів
Fi:=0.105:- основний магнітний потік      Q:=1.25:- коефіцієнт розсіювання головних полюсів
Lzb:=(2*q*w*(Q-1)*Fi)/Iv: Lzb:=0.0049;- індуктивність обмотки головних полюсів при
номінальному усталеному режимі

Lzb:=.0049
dsys1:={i1(t1)*(1*ra+0*rzb)+0*((2*q*w*(Q-1)*x1(t1))/i1(t1))*diff(i1(t1),t1)+
1*(Ld+Lk+L11a)*diff(i1(t1),t1)+1*kp*x1(t1)*n+0*2*q*w*diff(x1(t1),t1)=u,
-0*w1*i1(t1)+1.23*Rm1*y1(t1)+gm*diff(y1(t1),t1)+x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5+
(x1(t1)*(Rm6-Rm1)-Fнл6-(x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5))*Heaviside(-0.117+x1(t1))=0,
-0*w1*i1(t1)+5.29*Rm1*(x1(t1)-y1(t1))+0.477*gm*diff(x1(t1)-y1(t1),t1)+
x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5+(x1(t1)*(Rm6-Rm1)-Fнл6-(x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5))*
Heaviside(-0.117+x1(t1))=0}:
In_C1:={i1(0)=565, y1(0)=0.1045*0.3, x1(0)=0.1045}:
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);

dsol1:=proc(rkf45_x) ... end proc
T1:=array(1..1000, []): Z1:=array(1..1000, []): X1:=array(1..1000, []):
Y1:=array(1..1000, []): H1:=array(1..1000, []): E1:=array(1..1000, []):
k:=0:for t1 from 0 by 0.0001 to 0.00995 do k:=k+1: T1[k]:=op(2,op(1,dsol1(t1))):
H1[k]:=op(2,op(3,dsol1(t1))): E1[k]:=op(2,op(2,dsol1(t1))):
Z1[k]:=op(2,op(4,dsol1(t1))): end do:
i1:=plot([T1[i],E1[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i1:
x1:=plot([T1[i],H1[i],i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,
labels=["t,c","Ф,ВБ"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x1:
print(op(2,op(2,dsol1(0.00995)))));

14660.968214063994

print(op(2,op(3,dsol1(0.01)))));

.0763373977022676204
dsys2:={i2(t2)*(1*ra+0*rzb)+(1*(L11a+Ld+Lk)+0*Lzb)*diff(i2(t2),t2)+1*kp*0.076*n=u}:
In_C2:={i2(0)=op(2,op(2,dsol1(0.00995)))}:
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);

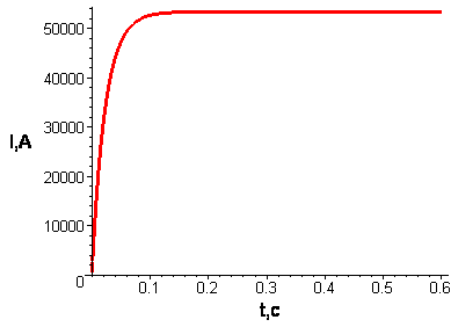
dsol2:=proc(rkf45_x) ... end proc
T2:=array(1..1000, []): Z2:=array(1..1000, []): X2:=array(1..1000, []):
Y2:=array(1..1000, []): H2:=array(1..1000, []): E2:=array(1..1000, []):

```

```

k:=0:for t2 from 0 by 0.005 to 0.6 do k:=k+1: T2[k]:=op(2,op(1,dsol2(t2)))+0.01:
E2[k]:=op(2,op(2,dsol2(t2))): end do:
i2:=plot([T2[i],E2[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i2:
x2:=plot([T2[i],0.156,i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,
labels=["t,c","Ф,Вб"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x2:
display(i1,i2);

```



Значення струму короткого замикання $I_{\text{кз}}$

```
print(op(2,op(2,dsol1(0.0001)))) ; 793.3905493
```

Величина струму короткого замикання при 0,0001 с –

$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с})$

```
print(op(2,op(2,dsol1(0.6)))) ; 54610.64729
```

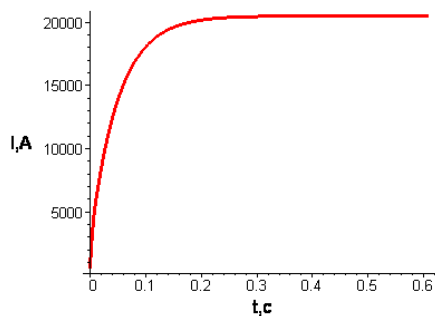
Розрахунок швидкості зростання струму:

$$\frac{di}{dt} = \frac{793,4 - 565}{0,0001} = 2284000 \text{ A/c.}$$

Розрахунок перехідних процесів у силовому колі електровоза ДЕ1 при короткому замиканні проведено відповідно до розрахунку в п. М.1.1. зі зміною в математичній моделі кількості еквівалентних обмоток якоря та збудження, що залишаються в колі при різних варіантах виникнення КЗ, та частоти обертання вала тягових електродвигунів при різному їх з'єднанні.

Результати розрахунку наведені нижче.

М.1.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

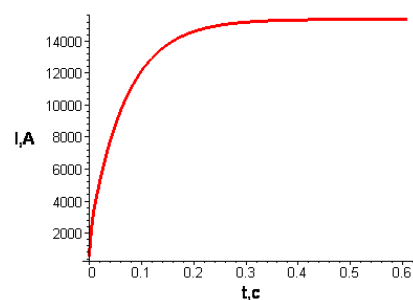


$$I_{\text{кз}} = 21100 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с}) = 615,7 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{615,7 - 565}{0,0001} = 507000 \text{ A/c.}$$

М.1.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

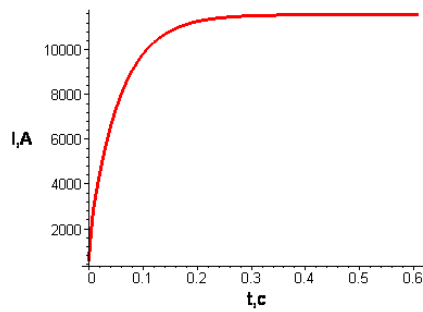


$$I_{\text{кз}} = 15340 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}}(0,0001\text{с}) = 595,2 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{595,2 - 565}{0,0001} = 302000 \text{ A/c.}$$

М.1.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

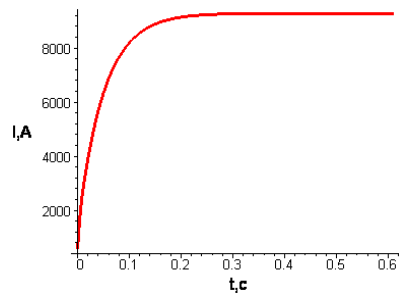


$$I_{\text{кз}} = 11600 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 591,3 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{591,3 - 565}{0,0001} = 263000 \text{ A/c.}$$

М.1.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

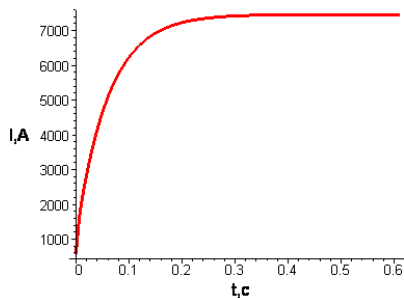


$$I_{\text{кз}} = 9300 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 588,3 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{588,3 - 565}{0,0001} = 233000 \text{ A/c.}$$

М.1.6. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)

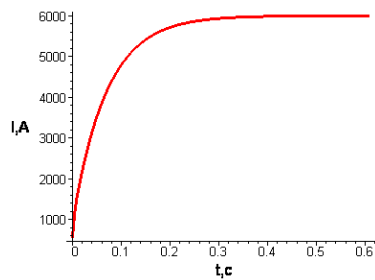


$$I_{\text{кз}} = 7480 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 582 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{582 - 565}{0,0001} = 17000 \text{ A/c.}$$

М.1.7. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися чотири обмотки якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

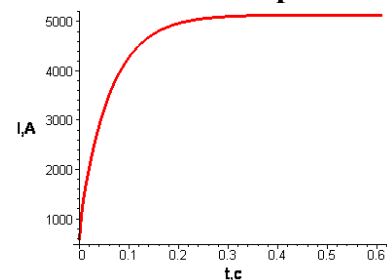


$$I_{\text{кз}} = 6000 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 578,1 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{578,1 - 565}{0,0001} = 131000 \text{ A/c.}$$

М.1.8. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися п'ять обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

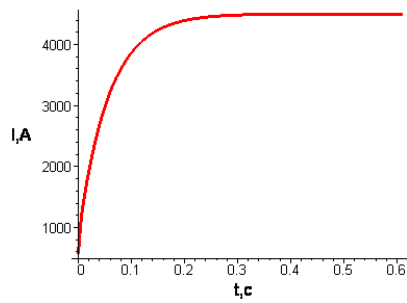


$$I_{\text{кз}} = 5140 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 577,1 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{577,1 - 565}{0,0001} = 121000 \text{ A/c.}$$

М.1.9. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились шість обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

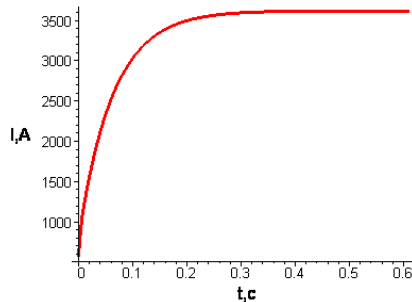


$$I_{кз} = 4500 \text{ A}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 576,3 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{576,3 - 565}{0,0001} = 113000 \text{ A/c.}$$

М.1.10. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились шість обмоток якоря та п'ять обмоток збудження тягових електродвигунів)

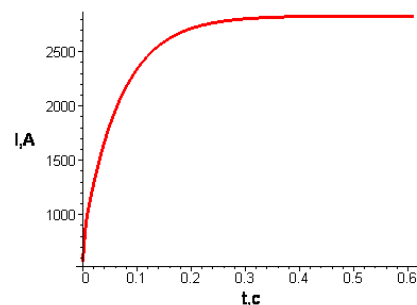


$$I_{кз} = 3620 \text{ A}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 574 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{574 - 565}{0,0001} = 90000 \text{ A/c.}$$

М.1.11. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились шість обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

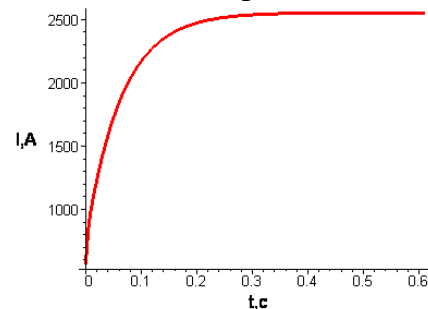


$$I_{кз} = 2840 \text{ A}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 572,5 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{572,5 - 565}{0,0001} = 75000 \text{ A/c}$$

М.1.12. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились сім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

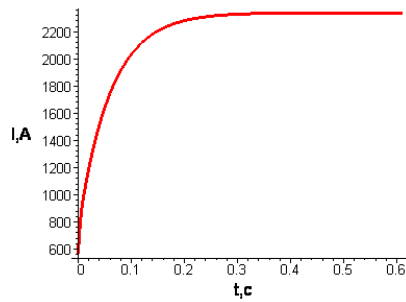


$$I_{кз} = 2550 \text{ A}$$

$$I_{кз(0,0001с)} = 572 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{572 - 565}{0,0001} = 70000 \text{ A/c.}$$

М.1.13. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились вісім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

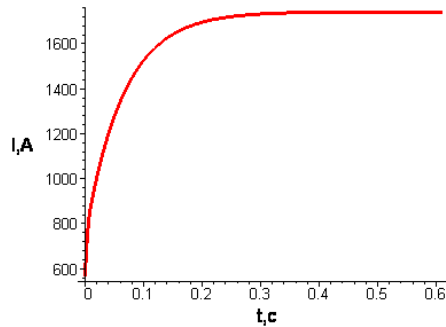


$$I_{\text{кз}} = 2340 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 571,7 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{571,7 - 565}{0,0001} = 67000 \text{ A/c.}$$

М.1.14. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились вісім обмоток якоря та сім обмоток збудження тягових електродвигунів)



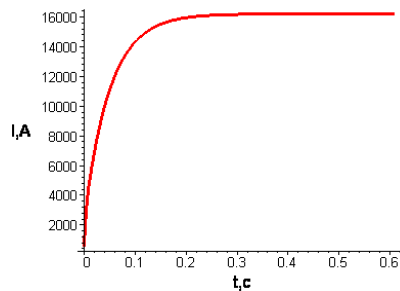
$$I_{\text{кз}} = 1740 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 570,6 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{570,6 - 565}{0,0001} = 56000 \text{ A/c.}$$

М.2. Послідовно-паралельне з'єднання тягових електродвигунів

М.2.1. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

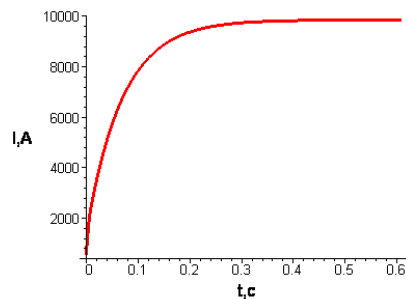


$$I_{\text{кз}} = 16240 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 609 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{609 - 565}{0,0001} = 440000 \text{ A/c.}$$

М.2.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

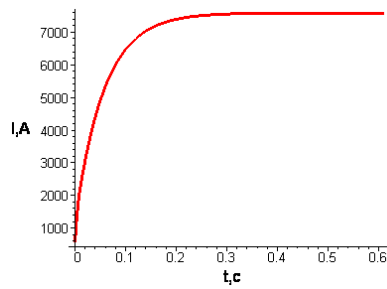


$$I_{\text{кз}} = 9900 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 586,8 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{586,8 - 565}{0,0001} = 218000 \text{ A/c.}$$

М.2.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

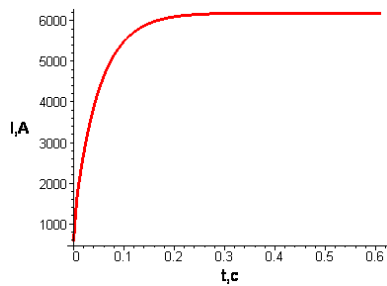


$$I_{\text{кз}} = 7580 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 584 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{584 - 565}{0,0001} = 190000 \text{ A/c.}$$

М.2.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

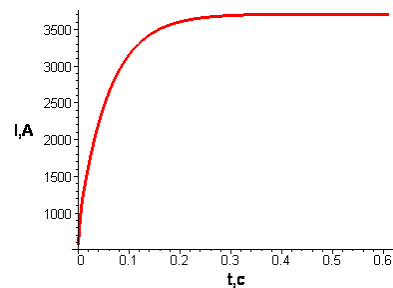


$$I_{\text{кз}} = 6200 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 581,7 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{581,7 - 565}{0,0001} = 167000 \text{ A/c.}$$

М.2.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)



$$I_{\text{кз}} = 3720 \text{ A.}$$

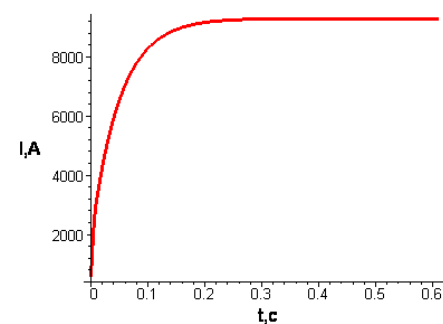
$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 574,4 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{574,4 - 565}{0,0001} = 94000 \text{ A/c}$$

М.3. Паралельне з'єднання тягових електродвигунів

Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

$$\beta = 100\%$$

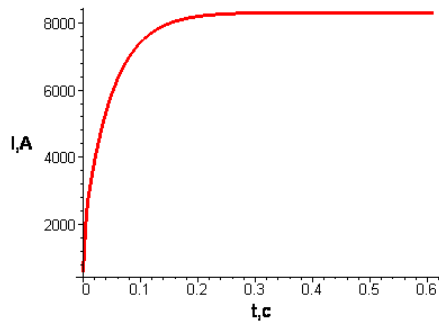


$$I_{\text{кз}} = 9300 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 595,4 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{595,4 - 565}{0,0001} = 304000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 78\%$$

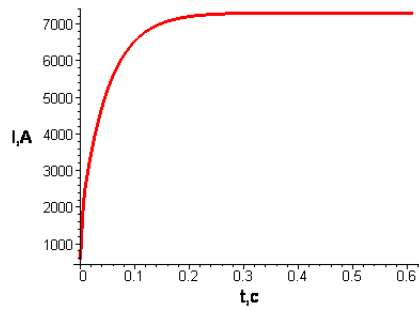


$$I_{K3} = 8330 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 593 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{593 - 565}{0,0001} = 280000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 65\%$$

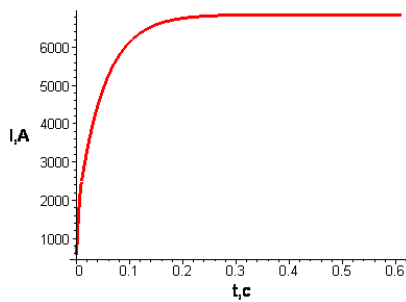


$$I_{K3} = 7340 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 590 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{590 - 565}{0,0001} = 250000 \text{ A/c}$$

$$\beta = 57\%$$

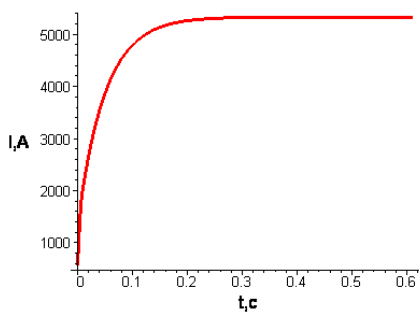


$$I_{K3} = 6870 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 588,8 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{588,8 - 565}{0,0001} = 238000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 43\%$$



$$I_{K3} = 5350 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 584 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{584 - 565}{0,0001} = 190000 \text{ A/c.}$$

Додаток Н

Дослідження перехідних процесів при короткому замиканні в силовому колі електровоза ВЛ8 з врахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності при напрузі контактної мережі 4000 В

Н.1. Послідовне з'єднання тягових електродвигунів

Н.1.1. Перехідний процес при короткому замиканні, коли в силовому колі залишилась одна обмотка якоря тягового електродвигуна

$R_{m1} := 79200$:- магнітний опір на першому участку апроксимованої магнітної характеристики
 $R_{m2} := 150584$:- магнітний опір на другому участку апроксимованої магнітної характеристики
 $R_{m3} := 170883.75$:- магнітний опір на третьому участку апроксимованої магнітної характеристики
 $R_{m4} := 241508.57$: $R_{m5} := 332712.3$:
 $u := 4000$:- напруга живлення двигуна $ra := 0.098$: $rz_b := 0.061$:- опір кола двигуна
 $k_p := (812/60)$: $n := 207.3$: $q := 2$:
 $w := 48$:- кількість витків обмотки головних полюсів
 $wd := 34$:- кількість витків обмотки додаткового полюса
 $F_{нл3} := 9974.4$:- намагнічуюча сила нелінійності на третьому участку магнітної характеристики
 $F_{нл2} := 7104$:- намагнічуюча сила нелінійності на другому участку магнітної характеристики
 $F_{нл4} := 17952$: $F_{нл5} := 30336$:

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ГП

$j := 35000$:- електрична провідність сталі остова
 $j_1 := 17500$:- електрична провідність сталі осердя ГП
 $j_2 := 35000$:- електрична провідність сталі осердя ДП
 $h_j := 7.6$:- висота остова $l_j := 42$:- довжина магнітної лінії
 $a_j := 40$:- довжина остова $ap := 25$:- ширина полюса
 $bp := 41$:- довжина полюса $lp := 7$:- висота полюса
 $gm := (j * h_j * l_j) / (16 * a_j) + ((j_1 * ap * bp * lp) / (6 * 8 * (ap^2 + bp^2)))$; - магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ГП

$gm := 9767.696253$

Визначення магнітної індуктивності основної хвилі магнітного потоку ДП

$adp := 2.5$:- ширина полюса $bdp := 41$:- довжина полюса $ldp := 9.47$:- висота полюса
 $gmd := (j * h_j * l_j) / (16 * a_j) + ((j_2 * adp * bdp * ldp) / (6 * 8 * (adp^2 + bdp^2)))$; - магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ДП

$gmd := 9140.322947$

$I_a := 565$: $ia := I_a / (2 * 3)$: $N := 984$: $w_k := 8$: $k_{pp} := 0.2$: $waq := k_{pp} * 984 / (8 * 3 * 3)$;
 $F_{ko} := I_a * w_k$: $Da := 74$: $\tau := 38.75$: $Alin := ia * N / (3.14 * Da)$:
 $Faq := \tau * Alin / (2) * 0.75$: $v_{ko} := F_{ko} / Faq$;
 $w_1 := w - (1 - v_{ko}) * waq$;

$waq := 2.733333333$

$v_{ko} := .7800178336$

$w_1 := 15.39871541$

Визначення індуктивності обмоток двигуна

Індуктивність якоря

$la := 40$:- довжина якоря

$Da := 74$:- діаметр якоря

```

a:=0.75:- коеф. полюсного перекриття          d:=0.5:- повітряний зазор:
km:=0.3- коефіцієнт насичення сталених частин шляху потоку реакції якоря :
kd:=1.478:- коеф. зубчасті якоря              waq1:=984/(8*3*3):
A:=2.68: la:=40: Z:=123: m0:=0.4*3.14*10^(-6):
L11a:=m0*(4*la*A*waq1^2/(Z));

L11a:=.0008178327704
Індуктивність котушок компенсаційної обмотки
wk:=11: Zk:=8: Ak:=4*p*10^(-7)*(5*d)/(5*a+4*d):
Lk:=2*(wk^2*la*Ak)/(p*Zk);

Lk:=.0002104347826
Індуктивність котушок ДП
Qd:=2.38:-коефіцієнт розсіювання обмотки ДП
Fik:= 1.075*10^(-3):- комутаційний магнітний потік      Iv:=565:-струм збудження
Ld:=(2*q*Qd*Fik*wd)/Iv: Ld:=0.00052;

Ld:=.00052
Індуктивність розсіювання котушок головних полюсів
Fi:=0.105:- основний магнітний потік      Q:=1.25:- коефіцієнт розсіювання головних полюсів
Lzb:=(2*q*w*(Q-1)*Fi)/Iv: Lzb:=0.0049;- індуктивність обмотки головних полюсів при
номінальному усталеному режимі

Lzb:=.0049
dsys1:={i1(t1)*(1*ra+0*rzb)+0*((2*q*w*(Q-1)*x1(t1))/i1(t1))*diff(i1(t1),t1)+
1*(Ld+Lk+L11a)*diff(i1(t1),t1)+1*kp*x1(t1)*n+0*2*q*w*diff(x1(t1),t1)=u,
-0*w1*i1(t1)+1.23*Rm1*y1(t1)+gm*diff(y1(t1),t1)+x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5+
(x1(t1)*(Rm6-Rm1)-Fнл6-(x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5))*Heaviside(-0.117+x1(t1))=0,
-0*w1*i1(t1)+5.29*Rm1*(x1(t1)-y1(t1))+0.477*gm*diff(x1(t1)-y1(t1),t1)+
x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5+(x1(t1)*(Rm6-Rm1)-Fнл6-(x1(t1)*(Rm5-Rm1)-Fнл5))*
Heaviside(-0.117+x1(t1))=0}:
In_C1:={i1(0)=565, y1(0)=0.1045*0.3, x1(0)=0.1045}:
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol1:= dsolve(dsys1 union In_C1, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);

dsol1:=proc(rkf45_x) ... end proc
T1:=array(1..1000, []): Z1:=array(1..1000, []): X1:=array(1..1000, []):
Y1:=array(1..1000, []): H1:=array(1..1000, []): E1:=array(1..1000, []):
k:=0:for t1 from 0 by 0.0001 to 0.00995 do k:=k+1: T1[k]:=op(2,op(1,dsol1(t1))):
H1[k]:=op(2,op(3,dsol1(t1))): E1[k]:=op(2,op(2,dsol1(t1))):
Z1[k]:=op(2,op(4,dsol1(t1))): end do:
i1:=plot([T1[i],E1[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i1:
x1:=plot([T1[i],H1[i],i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,
labels=["t,c","φ,B6"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x1:
print(op(2,op(2,dsol1(0.00995))));

14660.9682140639944
print(op(2,op(3,dsol1(0.01))));

.0763373977022676204
dsys2:={i2(t2)*(1*ra+0*rzb)+(1*(L11a+Ld+Lk)+0*Lzb)*diff(i2(t2),t2)+1*kp*0.076*n=u}:
In_C2:={i2(0)=op(2,op(2,dsol1(0.00995)))}:
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45,
output=array([seq(0.01*b,b=0..10)])):
dsol2:= dsolve(dsys2 union In_C2, numeric,method=rkf45, output=procedurelist);

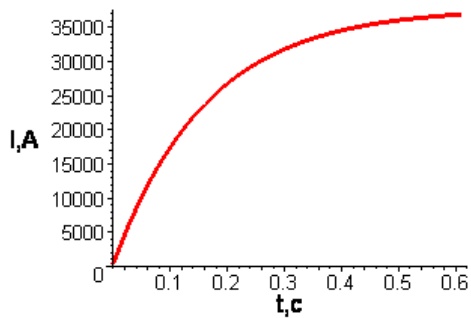
dsol2:=proc(rkf45_x) ... end proc
T2:=array(1..1000, []): Z2:=array(1..1000, []): X2:=array(1..1000, []):
Y2:=array(1..1000, []): H2:=array(1..1000, []): E2:=array(1..1000, []):

```

```

k:=0:for t2 from 0 by 0.005 to 0.6 do k:=k+1: T2[k]:=op(2,op(1,dsol2(t2)))+0.01:
E2[k]:=op(2,op(2,dsol2(t2))): end do:
i2:=plot([T2[i],E2[i],i=1..k],thickness=3,labels=["t,c","I,A"],
labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):i2:
x2:=plot([T2[i],0.156,i=1..k],style=line,color=black,thickness=3,
labels=["t,c","Ф,Вб"],labelfont=[HELVETICA,BOLD,12]):x2:
display(i1,i2);

```



З струму короткого замикання $I_{кз}$

```
print(op(2,op(2,dsol1(0.0001)))) ; 401.316947
```

Величина струму короткого замикання при 0,0001 с –

$I_{кз}(0,0001с)$

```
print(op(2,op(2,dsol1(0.6)))) ; 36291.0460800226356
```

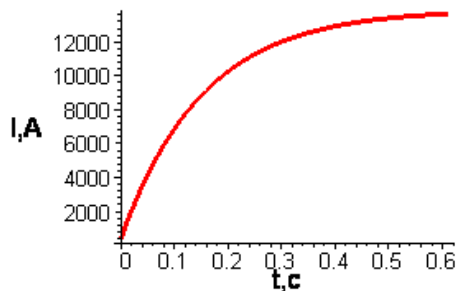
Розрахунок швидкості зростання струму:

$$\frac{di}{dt} = \frac{401,3 - 380}{0,0001} = 213000 \text{ A/c.}$$

Розрахунок перехідних процесів у силовому колі електровоза ВЛ8 при короткому замиканні проведено відповідно до розрахунку в п. Н.1.1. зі зміною в математичній моделі кількості еквівалентних обмоток якоря та збудження, що залишаються в колі при різних варіантах виникнення КЗ, та частоти обертання вала тягових електродвигунів при різному їх з'єднанні.

Результати розрахунку наведені нижче.

Н.1.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

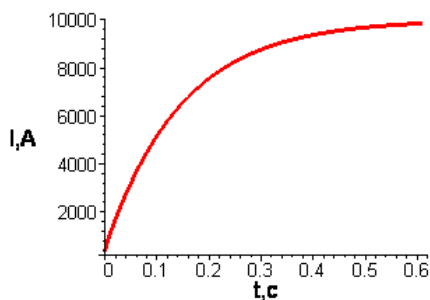


$$I_{кз} = 13600 \text{ A}$$

$$I_{кз}(0,0001с) = 390,3 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{390,3 - 380}{0,0001} = 103000 \text{ A/c.}$$

Н.1.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

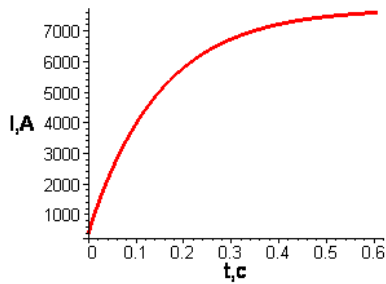


$$I_{кз} = 9820 \text{ A}$$

$$I_{кз}(0,0001с) = 389,1 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{389,1 - 380}{0,0001} = 89100 \text{ A/c.}$$

Н.1.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

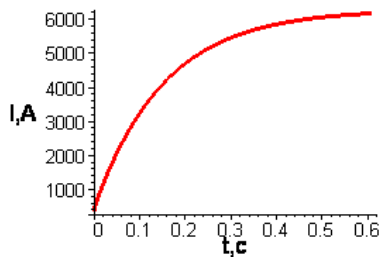


$$I_{\text{кз}} = 7600 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 386,7 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{386,7 - 380}{0,0001} = 67000 \text{ A/c.}$$

Н.1.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

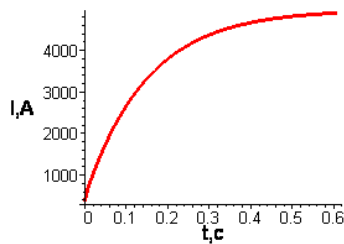


$$I_{\text{кз}} = 6200 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 385,3 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{385,3 - 380}{0,0001} = 53000 \text{ A/c.}$$

Н.1.6. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)

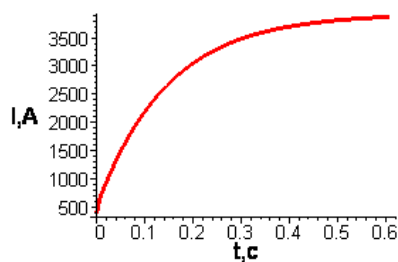


$$I_{\text{кз}} = 4910 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 385 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{385 - 380}{0,0001} = 50000 \text{ A/c.}$$

Н.1.7. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились чотири обмотки якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

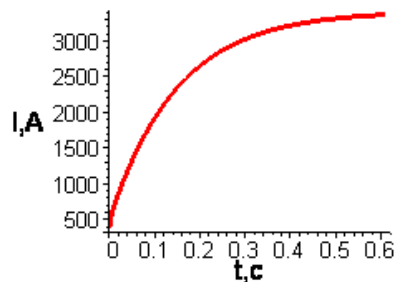


$$I_{\text{кз}} = 3880 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 384,8 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384,8 - 380}{0,0001} = 48000 \text{ A/c.}$$

Н.1.8. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишились п'ять обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

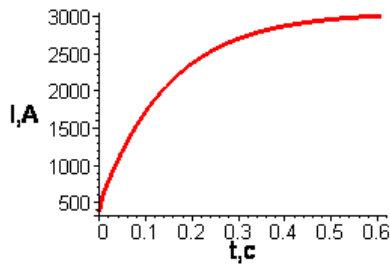


$$I_{\text{кз}} = 3400 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 384 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384 - 380}{0,0001} = 40000 \text{ A/c.}$$

Н.1.9. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та чотири обмотки збудження тягових електродвигунів)

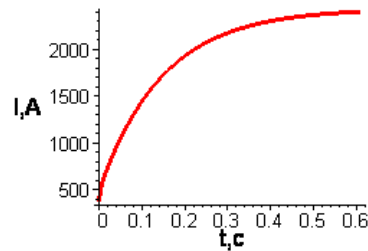


$$I_{\text{кз}} = 3000 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383,5 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,5 - 380}{0,0001} = 35000 \text{ A/c.}$$

Н.1.10. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та п'ять обмоток збудження тягових електродвигунів)

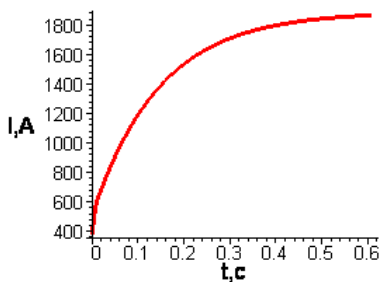


$$I_{\text{кз}} = 2410 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383,4 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,4 - 380}{0,0001} = 34000 \text{ A/c.}$$

Н.1.11. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися шість обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

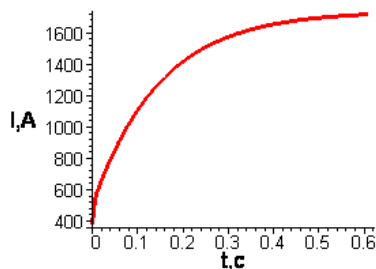


$$I_{\text{кз}} = 1880 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383,3 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,3 - 380}{0,0001} = 33000 \text{ A/c}$$

Н.1.12. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися сім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

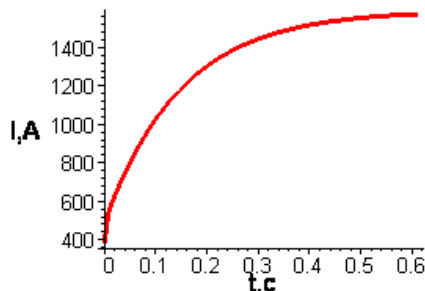


$$I_{\text{кз}} = 1730 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 383 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383 - 380}{0,0001} = 30000 \text{ A/c.}$$

Н.1.13. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися вісім обмоток якоря та шість обмоток збудження тягових електродвигунів)

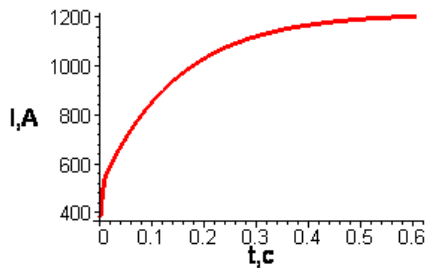


$$I_{\text{кз}} = 1590 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,7 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,7 - 380}{0,0001} = 27000 \text{ A/c.}$$

Н.1.14. Перехідний процес при короткому замиканні (в силовому колі залишилися вісім обмоток якоря та сім обмоток збудження тягових електродвигунів)



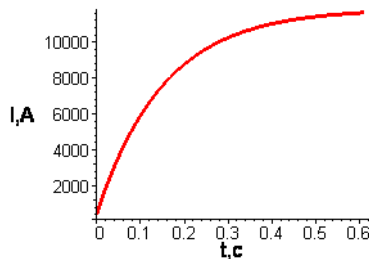
$$I_{\text{кз}} = 1200 \text{ A}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 382,6 \text{ A}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{382,6 - 380}{0,0001} = 26000 \text{ A/c.}$$

Н.2. Послідовно-паралельне з'єднання тягових електродвигунів

Н.2.1. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишилися дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

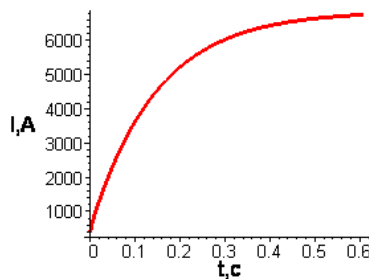


$$I_{\text{кз}} = 12870 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 598,3 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{598,3 - 565}{0,0001} = 333000 \text{ A/c.}$$

Н.2.2. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишилися дві обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

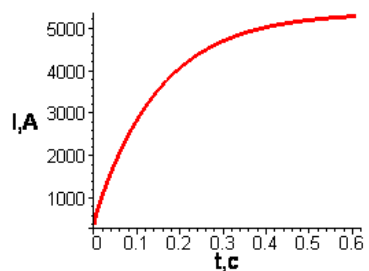


$$I_{\text{кз}} = 7880 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 582,1 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{582,1 - 565}{0,0001} = 171000 \text{ A/c.}$$

Н.2.3. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишилися три обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

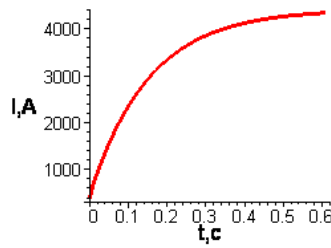


$$I_{\text{кз}} = 6030 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 579,8 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{579,8 - 565}{0,0001} = 148000 \text{ A/c.}$$

Н.2.4. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та дві обмотки збудження тягових електродвигунів)

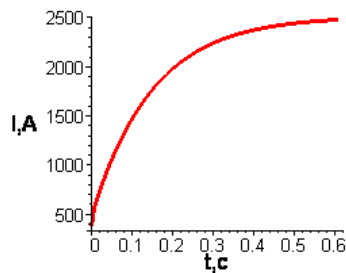


$$I_{\text{кз}} = 4870 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 578 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{578 - 565}{0,0001} = 130000 \text{ A/c.}$$

Н.2.5. Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились чотири обмотки якоря та три обмотки збудження тягових електродвигунів)



$$I_{\text{кз}} = 2970 \text{ A.}$$

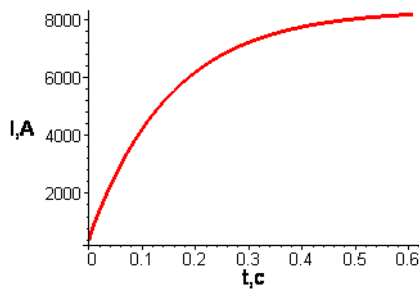
$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 572,8 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{572,8 - 565}{0,0001} = 78000 \text{ A/c}$$

Н.3. Паралельне з'єднання тягових електродвигунів

Перехідний процес при короткому замиканні (в колі залишились дві обмотки якоря та одна обмотка збудження тягових електродвигунів)

$$\beta = 100\%$$

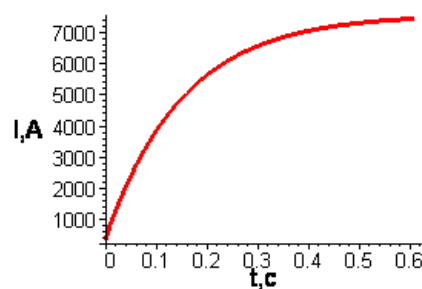


$$I_{\text{кз}} = 8300 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 386,5 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{386,5 - 380}{0,0001} = 65000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 75\%$$

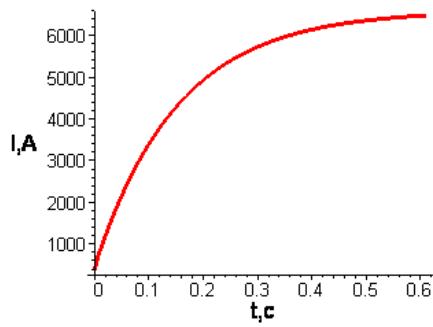


$$I_{\text{кз}} = 7400 \text{ A.}$$

$$I_{\text{кз}(0,0001\text{с})} = 386 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{386 - 380}{0,0001} = 60000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 55\%$$

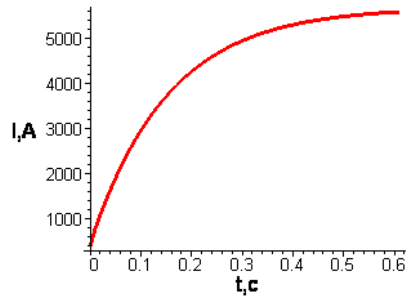


$$I_{K3} = 6480 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 385,2 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{385,2 - 380}{0,0001} = 52000 \text{ A/c}$$

$$\beta = 43\%$$

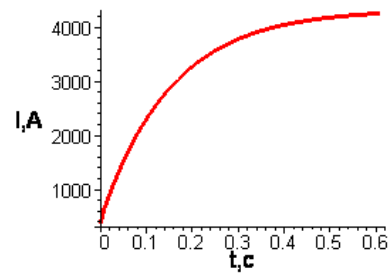


$$I_{K3} = 5650 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 384,5 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{384,5 - 380}{0,0001} = 45000 \text{ A/c.}$$

$$\beta = 36\%$$



$$I_{K3} = 4290 \text{ A.}$$

$$I_{K3(0,0001c)} = 383,4 \text{ A.}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{383,4 - 380}{0,0001} = 34000 \text{ A/c.}$$

Додаток П

П.1. Визначення закону розподілення швидкості зростання струму для значень $\frac{di}{dt}$ електровоза ДЕ1 при напрузі контактної мережі 2200 В

Таблиця П.1.1

Знаходження кількості випадків швидкості зростання струму та розподілу відносних частот

Інтервали X_i , $A/c \cdot 10^3$	Кількість випадків, коли $\frac{di}{dt}$ відповідає значенню на обраному інтервалі, n	Розподіл відносних частот, n_i	X_i^*
[0...100)	9	0,39	50
[100...200)	12	0,52	150
[200...300)	2	0,09	250
	$\Sigma n = 23$	$\Sigma n_i = 1$	

Таблиця П.1.2

Розрахунок характеристик вибірки

X_i	n_i	u_i	$n_i u_i$	$n_i u_i^2$	$n_i \cdot (u_i + 1)^2$
50	0,391	-1	-0,391	0,391	0,000
150	0,522	0	0,000	0,000	0,522
250	0,087	1	0,087	0,087	0,348
	$\Sigma n_i = 1$		$\Sigma n_i u_i = -0,304$	$\Sigma n_i u_i^2 = 0,478$	$\Sigma n_i (u_i + 1)^2 = 0,87$

$$\Sigma n_i \cdot (u_i + 1)^2 = \Sigma n_i u_i^2 + 2 \Sigma n_i u_i + n_i,$$

$$0,87 = 0,478 + 2 \cdot (-0,304) + 1 = 0,87.$$

Таблиця П.1.3

Розрахунок теоретичних частот вибірки

№ інтер- валу	X_i	X_{i+1}	$X_i - \bar{X}_B$	$X_{i+1} - \bar{X}_B$	Z_i	Z_{i+1}	$\Phi(Z_i)$	$\Phi(Z_{i+1})$	$\Phi(Z_{i+1}) - \Phi(Z_i)$	n_i'
1	0	100	-	-20	-	-0,32	-0,5000	-0,1255	0,375	0,375
2	100	200	-20	80	-0,32	1,29	-0,1255	0,4015	0,527	0,527
3	200	300	80	-	1,29	-	0,4015	0,5000	0,099	0,099
									$\Sigma 1$	$\Sigma 1$

Таблиця П.1.4

Визначення спостережуваного значення $\chi^2_{\text{сп}}$

№ інтервалу	n_i	n'_i	$n_i - n'_i$	$(n_i - n'_i)^2$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n_i}$	n_i^2	$\frac{n_i^2}{n'_i}$
1	0,391	0,375	0,017	0,0003	0,001	0,153	0,409
2	0,522	0,527	-0,005	0,0000	0,000	0,272	0,517
3	0,087	0,099	-0,012	0,0001	0,001	0,008	0,077
	$\Sigma n_i = 1$	$\Sigma n'_i = 1$	$\Sigma n_i - n'_i = 1$		$\chi^2_{\text{сп}} = 0,002$		$\Sigma \frac{n_i^2}{n'_i} = 1,002$

П.2.Визначення закону розподілення швидкості зростання струму для значень $\frac{di}{dt}$ електровоза ДЕ1 при напрузі контактної мережі 4000 В

Таблиця П.2.1

Знаходження кількості випадків швидкості зростання струму та розподілу відносних частот

Інтервали X_i , А/с·10 ³	Кількість випадків, коли $\frac{di}{dt}$ відповідає значенню на обраному інтервалі, n	Розподіл відносних частот, n_i	X_i^*
[0...100)	6	0,26	50
[100...200)	7	0,30	150
[200...300)	6	0,26	250
[300...400)	2	0,09	350
[400...500)	1	0,04	450
[500...600)	1	0,04	550
	$\Sigma n = 23$	$\Sigma n_i = 1$	

Таблиця П.2.2

Розрахунок характеристик вибірки

X_i	n_i	u_i	$n_i u_i$	$n_i u_i^2$	$n_i \cdot (u_i + 1)^2$
50	0,261	-1	-0,261	0,261	0,000
150	0,304	0	0,000	0,000	0,304
250	0,261	1	0,261	0,261	1,043
350	0,087	2	0,174	0,348	0,783
450	0,043	3	0,130	0,391	0,696
550	0,043	4	0,174	0,696	1,087
			$\Sigma n_i u_i = 0,478$	$\Sigma n_i u_i^2 = 1,957$	$\Sigma n_i (u_i + 1)^2 = 3,913$

$$\sum n_i \cdot (u_i + 1)^2 = \sum n_i u_i^2 + 2 \sum n_i u_i + n_i,$$

$$3,913 = 1,957 + 2 \cdot 0,478 + 1 = 3,913.$$

Таблиця П.2.3

Розрахунок теоретичних частот вибірки

№ інтер-валу	X_i	X_{i+1}	$X_i - \bar{X}_B$	$X_{i+1} - \bar{X}_B$	Z_i	Z_{i+1}	$\Phi(Z_i)$	$\Phi(Z_{i+1})$	$\Phi(Z_{i+1}) - \Phi(Z_i)$	n_i'
1	0	100	-	-98	-	-0,75	-	-0,2734	0,227	0,227
2	100	200	-98	2	-0,75	0,02	-	0,0080	0,281	0,281
3	200	300	2	102	0,02	0,78	0,0080	0,2823	0,274	0,274
4	300	400	102	202	0,78	1,54	0,2823	0,4382	0,156	0,156
5	400	500	202	302	1,54	2,30	0,4382	0,4893	0,051	0,051
6	500	600	302	-	2,30	-	0,4893	0,5000	0,011	0,011
										$\Sigma 1$

Таблиця П.2.4

Визначення спостережуваного значення $\chi^2_{\text{сп}}$

Номер інтервалу	n_i	n_i'	$n_i - n_i'$	$(n_i - n_i')^2$	$\frac{(n_i - n_i')^2}{n_i'}$	n_i^2	$\frac{n_i^2}{n_i'}$
1	0,261	0,227	0,034	0,0012	0,005	0,068	0,300
2	0,304	0,281	0,023	0,0005	0,002	0,093	0,329
3	0,261	0,274	-0,013	0,0002	0,001	0,068	0,248
4	0,087	0,156	-0,069	0,0048	0,030	0,008	0,049
5	0,043	0,051	-0,008	0,0001	0,001	0,002	0,037
6	0,043	0,011	0,033	0,0011	0,100	0,002	0,177
	$\Sigma n_i = 1$	$\Sigma n_i' = 1$			$\chi^2_{\text{сп}} = 0,14$		$\Sigma \frac{n_i^2}{n_i'} = 1,14$

П.3. Визначення закону розподілення швидкості наростання струму для значень $\frac{di}{dt}$ електровоза ВЛ8 при напрузі контактної мережі 3000 В

Таблиця П.3.1

Знаходження кількості випадків швидкості зростання струму та розподілу відносних частот

Інтервали X_i , $A/c \cdot 10^2$	Кількість випадків, коли $\frac{di}{dt}$ відповідає значенню на обраному інтервалі, n	Розподіл відносних частот, n_i	X_i^*
[0...100)	0	0,000	50
[100...200)	0	0,000	150
[200...300)	4	0,174	250
[300...400)	7	0,304	350
[400...500)	6	0,261	450
[500...600)	2	0,087	550
[600...700)	2	0,087	650
[700...800)	1	0,043	750
[800...900)	1	0,043	850
	$\Sigma 23$	$\Sigma 1$	

Таблиця П.3.2

Розрахунок характеристик вибірки

X_i	n_i	u_i	$n_i u_i$	$n_i u_i^2$	$n_i \cdot (u_i + 1)^2$
50	0,000	-3	0,000	0,000	0,000
150	0,000	-2	0,000	0,000	0,000
250	0,174	-1	-0,174	0,174	0,000
350	0,304	0	0,000	0,000	0,304
450	0,261	1	0,261	0,261	1,043
550	0,087	2	0,174	0,348	0,783
650	0,087	3	0,261	0,783	1,391
750	0,043	4	0,174	0,696	1,087
850	0,043	5	0,217	1,087	1,565
	$\Sigma 1$		$\Sigma n_i u_i = 0,913$	$\Sigma n_i u_i^2 = 3,348$	$\Sigma n_i \cdot (u_i + 1)^2 = 6,174$

$$\sum n_i \cdot (u_i + 1)^2 = \sum n_i u_i^2 + 2 \sum n_i u_i + n_i,$$

$$6,174 = 3,348 + 2 \cdot 0,913 + 1 = 6,174.$$

Таблиця П.3.3

Розрахунок теоретичних частот вибірки

№ інтер валу	X_i	X_{i+1}	$X_i - \bar{X}_B$	$X_{i+1} - \bar{X}_B$	Z_i	Z_{i+1}	$\Phi(Z_i)$	$\Phi(Z_{i+1})$	$\Phi(Z_{i+1}) - \Phi(Z_i)$	n_i'
1	0	100	-	-341,3	-	-2,15	-	-0,4838	0,016	0,016
2	100	200	-341,3	-241,3	-2,15	-1,52	-	-0,4357	0,048	0,048
3	200	300	-241,3	-141,3	-1,52	-0,89	-	-0,3133	0,122	0,122
4	300	400	-141,3	-41,3	-0,89	-0,26	-	-0,1026	0,211	0,211
5	400	500	-41,3	58,7	-0,26	0,37	-	0,1443	0,247	0,247
6	500	600	58,7	158,7	0,37	1,00	0,0753	0,0398	-0,036	-
7	600	700	158,7	258,7	1,00	1,63	0,0398	0,4484	0,409	0,409
8	700	800	258,7	358,7	1,63	2,26	0,4484	0,4881	0,040	0,040
9	800	900	358,7	-	2,26	-	0,4881	0,5000	0,012	0,012

Таблиця П.3.4

Визначення спостережуваного значення $\chi^2_{\text{сп}}$

Номер інтервалу	n_i	n_i'	$n_i - n_i'$	$(n_i - n_i')^2$	$\frac{(n_i - n_i')^2}{n_i'}$	n_i^2	$\frac{n_i^2}{n_i'}$
1	0,000	0,016	-0,016	0,0003	0,016	0,000	0,000
2	0,000	0,048	-0,048	0,0023	0,048	0,000	0,000
3	0,174	0,122	0,052	0,0027	0,022	0,030	0,247
4	0,304	0,211	0,094	0,0088	0,042	0,093	0,440
5	0,261	0,247	0,014	0,0002	0,001	0,068	0,276
6	0,087	-0,036	0,122	0,0150	-0,422	0,008	-0,213
7	0,087	0,409	-0,322	0,1035	0,253	0,008	0,019
8	0,043	0,040	0,004	0,0000	0,000	0,002	0,048
9	0,043	0,012	0,032	0,0010	0,084	0,002	0,159
	$\Sigma 1$	$\Sigma 1$			$\chi^2_{\text{сп}} = 0,043$		$\Sigma 0,974$

П.4. Визначення закону розподілення швидкості наростання струму для значень $\frac{di}{dt}$ електровоза ВЛ8 при напрузі контактної мережі 2200 В

Таблиця П.4.1

Знаходження кількості випадків швидкості зростання струму та розподілу відносних частот

Інтервали X_i , $A/c \cdot 10^3$	Кількість випадків, коли $\frac{di}{dt}$ відповідає значенню на обраному інтервалі, n	Розподіл відносних частот, n_i	X_i^*
[0...100)	0	0,00	50
[100...200)	0	0,00	150
[200...300)	9	0,39	250
[300...400)	8	0,35	350
[400...500)	3	0,13	450
[500...600)	1	0,04	550
[600...700)	2	0,09	650
	$\Sigma 23$	$\Sigma 1$	

Таблиця П.4.2

Розрахунок характеристик вибірки

X_i	n_i	u_i	$n_i u_i$	$n_i u_i^2$	$n_i \cdot (u_i + 1)^2$
50	0,000	-2	0,000	0,000	0,000
150	0,000	-1	0,000	0,000	0,000
250	0,391	0	0,000	0,000	0,391
350	0,348	1	0,348	0,348	1,391
450	0,130	2	0,261	0,522	1,174
550	0,043	3	0,130	0,391	0,696
650	0,087	4	0,348	1,391	2,174
			$\Sigma 1,087$	$\Sigma 2,652$	$\Sigma 5,826$

$$\sum n_i \cdot (u_i + 1)^2 = \sum n_i u_i^2 + 2 \sum n_i u_i + n_i,$$

$$5,826 = 2,652 + 2 \cdot 1,087 + 1 = 5,826.$$

Таблиця П.4.3

Розрахунок теоретичних частот вибірки

№інтервалу	X_i	X_{i+1}	$X_i - \bar{X}_B$	$X_{i+1} - \bar{X}_B$	Z_i	Z_{i+1}	$\Phi(Z_i)$	$\Phi(Z_{i+1})$	$\Phi(Z_{i+1}) - \Phi(Z_i)$	n_i'
1	0	100	-	-259	-	-2,14	-	-0,4828	0,017	0,017
2	100	200	-259	-159	-	-1,31	-	-0,4049	0,078	0,078
3	200	300	-159	-59	-	-0,49	-	-0,1879	0,217	0,217
4	300	400	-59	41	-	0,34	-	0,1331	0,321	0,321
5	400	500	41	141	0,34	1,17	0,1331	0,3790	0,246	0,246
6	500	600	141	241	1,17	1,99	0,3790	0,4767	0,098	0,098
7	600	700	241	-	1,99	-	0,4767	0,5000	0,023	0,023

Таблиця П.4.4

Визначення спостережуваного значення $\chi^2_{\text{сп}}$

Номер інтервалу	n_i	n_i'	$n_i - n_i'$	$(n_i - n_i')^2$	$\frac{(n_i - n_i')^2}{n_i'}$	n_i^2	$\frac{n_i^2}{n_i'}$
1	0,000	0,017	-0,017	0,0003	0,017	0,000	0,000
2	0,000	0,078	-0,078	0,0061	0,078	0,000	0,000
3	0,391	0,217	0,174	0,0304	0,140	0,153	0,706
4	0,348	0,321	0,027	0,0007	0,002	0,121	0,377
5	0,130	0,246	-0,115	0,0133	0,054	0,017	0,069
6	0,043	0,098	-0,054	0,0029	0,030	0,002	0,019
7	0,087	0,023	0,064	0,0041	0,174	0,008	0,325
	$\Sigma 1$	$\Sigma 1$			$\chi^2_{\text{сп}} = 0,496$		$\Sigma 1,496$

П.5. Визначення закону розподілення швидкості наростання струму для значень $\frac{di}{dt}$ електровоза ВЛ8 при напрузі контактної мережі 4000 В

Таблиця П.5.1

Знаходження кількості випадків швидкості зростання струму та розподілу відносних частот

Інтервали X_i , А/с·10 ³	Кількість випадків, коли $\frac{di}{dt}$ відповідає значенню на обраному інтервалі, n	Розподіл відносних частот, n_i	X_i^*
[0...100)	0	0,00	50
[100...200)	0	0,00	150
[200...300)	2	0,09	250
[300...400)	6	0,26	350
[400...500)	4	0,17	450
[500...600)	4	0,17	550
[600...700)	4	0,17	650
[700...800)	0	0,00	750
[800...900)	0	0,00	850
[900...1000)	2	0,09	950
[1000...1100)	1	0,04	1050
	$\Sigma 23$	$\Sigma 1$	

Таблиця П.5.2

Розрахунок характеристик вибірки

X_i	n_i	u_i	$n_i u_i$	$n_i u_i^2$	$n_i \cdot (u_i + 1)^2$
50	0,000	-3	0,000	0,000	0,000
150	0,000	-2	0,000	0,000	0,000
250	0,087	-1	-0,087	0,087	0,000
350	0,261	0	0,000	0,000	0,261
450	0,174	1	0,174	0,174	0,696
550	0,174	2	0,348	0,696	1,565
650	0,174	3	0,522	1,565	2,783
750	0,000	4	0,000	0,000	0,000
850	0,000	5	0,000	0,000	0,000
950	0,087	6	0,522	3,130	4,261
1050	0,043	7	0,304	2,130	2,783
			$\Sigma 1,783$	$\Sigma 7,783$	$\Sigma 12,348$

$$\sum n_i \cdot (u_i + 1)^2 = \sum n_i u_i^2 + 2 \sum n_i u_i + n_i,$$

$$12,348 = 7,783 + 2 \cdot 1,783 + 1 = 12,348.$$

Таблиця П.5.3

Розрахунок теоретичних частот вибірки

№ інтервалу	X_i	X_{i+1}	$X_i - \bar{X}_B$	$X_{i+1} - \bar{X}_B$	Z_i	Z_{i+1}	$\Phi(Z_i)$	$\Phi(Z_{i+1})$	$\Phi(Z_{i+1}) - \Phi(Z_i)$	n'_i
1	0	100	-	-428,3	-	-2,00	-	-0,4772	0,023	0,023
2	100	200	-428,3	-328,3	-	-1,53	-	-0,4370	0,040	0,040
3	200	300	-328,3	-228,3	-	-1,06	-	-0,3554	0,082	0,082
4	300	400	-228,3	-128,3	-	-0,60	-	-0,2257	0,130	0,130
5	400	500	-128,3	-28,3	-	-0,13	-	-0,0517	0,174	0,174
6	500	600	-28,3	71,7	-	0,33	-	0,1293	0,181	0,181
7	600	700	71,7	171,7	0,33	0,80	0,1293	0,2881	0,159	0,159
8	700	800	171,7	271,7	0,80	1,27	0,2881	0,3980	0,110	0,110
9	800	900	271,7	371,7	1,27	1,73	0,3980	0,4582	0,060	0,060
10	900	1000	371,7	471,7	1,73	2,20	0,4582	0,4861	0,028	0,028
11	1000	1100	471,7	-	2,20	-	0,4861	0,5000	0,014	0,014
										$\Sigma 1$

Таблиця П.5.4

Визначення спостережуваного значення $\chi^2_{\text{сп}}$

Номер інтервалу	n_i	n'_i	$n_i - n'_i$	$(n_i - n'_i)^2$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$	n_i^2	$\frac{n_i^2}{n'_i}$
1	0,000	0,023	-0,023	0,0005	0,023	0,000	0,000
2	0,000	0,040	-0,040	0,0016	0,040	0,000	0,000
3	0,087	0,082	0,005	0,0000	0,000	0,008	0,093
4	0,261	0,130	0,131	0,0172	0,133	0,068	0,525
5	0,174	0,174	0,000	0,0000	0,000	0,030	0,174
6	0,174	0,181	-0,007	0,0001	0,000	0,030	0,167
7	0,174	0,159	0,015	0,0002	0,001	0,030	0,190
8	0,000	0,110	-0,110	0,0121	0,110	0,000	0,000
9	0,000	0,060	-0,060	0,0036	0,060	0,000	0,000
10	0,087	0,028	0,059	0,0035	0,125	0,008	0,271
11	0,043	0,014	0,030	0,0009	0,063	0,002	0,136
	$\Sigma 1$	$\Sigma 1$			$\chi^2_{\text{сп}} = 0,556$	0,176	$\Sigma 1,556$

Додаток Р

```

;-----
;Подпрограмма проверки дельта U
;-----

```

ProvDelta

```

    bcf     INTCON,7      ;запретили все прерывания (на всякий случай)
    bcf     STATUS,0      ;принудительно сбросили флаг C
    movwf   Tochka1ST,0   ;переносим содержимое Tochka1ST в аккумулятор
    subwf    Tochka2ST,0   ;вычитаем аккумулятор (1-ю точку) из 2-й точки (Tochka2st-Tochka1ST) и
                           ;результат сохраняем в аккумуляторе (старший байт)

    btfss    STATUS,0      ;проверка флага C на знак разницы - если "-" переход на DIODE2 если "+"
                           ;на проверку разницы с опорной

    goto     DIODE2
    bcf     STATUS,0      ;СБРОС ФЛАГА C ПЕРЕД ВЫЧИТАНИЕМ ОПОРНОЙ РАЗНИЦЫ
    subwf    OpDeltaS,0    ;вычитаем аккумулятор из OpDeltaS
    btfss    STATUS,0      ;проверка флага C (если флаг C не поднят то дельта>дельта опорной)
    goto     DIODE1
    movwf    Tochka1ML,0   ;переносим содержимое Tochka1ML в аккумулятор
    subwf    Tochka2ML,0   ;вычитаем аккумулятор (1-ю точку) из 2-й точки и результат сохраняем в
                           ;аккумуляторе (младший байт)

    btfss    STATUS,0      ;проверка флага C на знак разницы - если "-"(C-опущен) переход на
                           ;DIODE2 если "+"(C-поднят) на проверку разницы с опорной

    goto     DIODE2
    bcf     STATUS,0      ;СБРОС ФЛАГА C ПЕРЕД ВЫЧИТАНИЕМ ОПОРНОЙ РАЗНИЦЫ
    subwf    OpDeltaM,0    ;вычитаем аккумулятор из OpDeltaM
    btfss    STATUS,0      ;проверка флага C (если флаг C не поднят то дельта>дельта опорной)
    goto     DIODE1
    goto     DIODE2

```

DIODE1

```

    bcf     STATUS,RP0    ;выбрали банк 0
    bsf     GPIO,2        ;включаем диод-СРАБОТАЛА ЗАЩИТА
    goto     DIODE1

```

DIODE2

```

    bcf     STATUS,RP0    ;выбрали банк 0
    bcf     GPIO,2        ;не включаем диод
    movwf    Tochka2ST,0   ;ЗАГРУЗКА НОВОЙ ТОЧКИ ОТСЧЁТА (ТОЧКА 2 ДЛЯ ПРЕДЫДУЩЕГО
                           ;ИНТЕРВАЛА)

    movwf    Tochka1ST
    movwf    Tochka2ML,0   ;ЗАГРУЗКА НОВОЙ ТОЧКИ ОТСЧЁТА (ТОЧКА 2 ДЛЯ ПРЕДЫДУЩЕГО
                           ;ИНТЕРВАЛА)

    movwf    Tochka1ML
    goto     TMR02

```

ДОДАТОК С

Акти про використання результатів дисертаційної роботи



АКТ

Про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи Карзової Оксани Олександрівни «Підвищення ефективності захисту силових кіл електрорухомого складу залізниць постійного струму»

м. Дніпропетровськ

2012 р.

Цей акт складений про те, що в Державному підприємстві «Науково-виробничий комплекс «Електрозовозобудування» прийняті для розгляду на предмет впровадження результати, викладені в кандидатській дисертації Карзової О. О.:

1. Розроблений новий пристрій захисту з використанням сучасних мікроконтролерів.
2. Дослідження по встановленню закономірності розподілу швидкості зростання струму короткого замикання в залежності від точки виникнення короткого замикання з метою розробки рекомендацій по визначенню уставки нового пристрою захисту.

Головний конструктор

А. Я. Гривнак

Вч. секр. ради Д08.820.01

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Перший проректор Дніпропетровського
національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна
доктор техн. наук, професор

«13» червня 2012 р.
Б.С. Боднар

АКТ

Про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи
Карзової Оксани Олександрівни «Підвищення ефективності
захисту силових кіл електрорухомого складу залізниць постійного
струму»

м. Дніпропетровськ

2012 р.

Цей акт складено про те, що у навчальному процесі, який ведеться в
університеті, прийняті для використання наукові та практичні результати,
викладені в кандидатській дисертації Карзової О. О.:

1. Метод визначення уставки пристроїв захисту від коротких замикань по швидкості зростання струму. Розроблений пристрій захисту від коротких замикань у колах двигунів постійного струму на базі сучасних мікроконтролерів (дисципліна «Електричні апарати» для студентів третього курсу спеціальності 6.05070204).
2. Встановлення закономірності розподілу швидкостей зростання струму короткого замикання в залежності від точки його виникнення у схемі, яка захищається (дисципліна «Теорія електроприводу» та «Системи керування електроприводами» для студентів четвертого курсу спеціальності 6.05070204).
3. Результати по дослідженню впливу вихрових струмів та динамічної індуктивності обмоток збудження електродвигунів на значення швидкості зростання струму при короткому замиканні у колі цих двигунів («Теорія електроприводу» для студентів четвертого курсу спеціальності 6.05070204).

Зав. кафедрою АЕП
доктор техн. наук, доцент

А. М. Муха