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

На правах рукопису

МИХАЛІЧЕНКО Павло Євгенович

УДК 621.33: 629.423.3

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

ДИСЕРТАЦІЯ
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант –
доктор технічних наук, професор
КОСТІН Микола Олександрович.

Дніпропетровськ – 2013

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ (за абеткою) 5
ВСТУП 7
1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ 21
1.1 Характеристика аварійних режимів роботи системи електричної тяги 21
1.2 Види захисту системи електричної тяги та вимоги до них 31
1.3 Оцінка експлуатаційних умов роботи швидкодіючих вимикачів фідерів тягових підстанцій 38
1.4 Методи аналізу перехідних аварійних процесів в системі «тягова підстанція – тягова мережа – електрорухомий склад» 45
1.5 Висновки до розділу 1 55
2. МЕТОДИКИ ТА ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ І ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ 58
2.1. Об’єкти та умови проведення експериментальних досліджень короткого замикання в тяговій мережі 58
2.2. Технічні засоби експериментальних досліджень перехідних електричних величин 63
2.3. Технічні та програмні засоби теоретичних розрахунків 67
2.4. Висновок до розділу 2 68
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ У ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ БЕЗ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ 69
3.1. Реакція швидкодіючих вимикачів різних типів у режимі короткого замикання. Експериментальні результати 69
3.2. Порівняльна характеристика різних типів швидкодіючих вимикачів тягових підстанцій 81
3.3 Гармонійний склад фідерних струмів при аварійних вимиканнях швидкодіючих вимикачів 89

3.4 Енергетичні показники систем тягового електропостачання в режимі короткого замикання 102
3.5 Моделювання режиму короткого замикання в системі тяги без електрорухомого складу 107
3.6 Теорія роботи системи захисту тягового електропостачання, основаній на новому принципі 137
3.7 Висновки до розділу 3 149
4. КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ З ЕЛЕКТРОРУХОМИМ СКЛАДОМ 152
4.1 Схеми заміщення електрорухомого складу та значення параметрів їх елементів 152
4.2 Теоретичні передпосилки і причини виникнення генераторних струмів 157
4.3 Математична модель процесу короткого замикання в тяговій мережі 166
4.4 Коротке замикання в тяговій мережі з вузловою схемою живлення і різними координатами точок короткого замикання і електрорухомої одиниці 195
4.5 Коротке замикання в тяговій мережі з паралельною схемою секціонування і різними координатами точок короткого замикання і електрорухомої одиниці 206
4.6. Перехідні електромагнітні процеси в аварійних режимах короткого замикання в силових тягових колах електровозів 217
4.7 Метод «залишкової напруги» селективного визначення електротягової підсистеми з коротким замиканням 261
4.8 Коротке замикання чи перенавантаження тягової мережі 272
4.9 Висновки до розділу 4 274
5. АВАРІЙНИЙ РЕЖИМ «ЗНЯТТЯ-ВІДНОВЛЕННЯ» НАПРУГИ НА СТРУМОПРИЙМАЧІ 280
5.1 Етапи і наслідки режиму «зняття-відновлення» напруги 280

5.2. Режим пуску електровоза і набір позицій до ходової на «С»-з’єднанні 285
5.3 Режим «зняття-відновлення» напруги при русі на «СП»-з’єднанні тягових двигунів 303
5.4 Оцінка адекватності математичних моделей електромагнітних процесів в режимі відриву струмоприймача від контактного проводу з подальшим його торканням 315
5.5 Висновки до розділу 5 320
6. ЗАСОБИ І МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ В АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ 323
6.1 Розробка мікропроцесорної системи фідерного захисту, що реагує на швидкість лінійного зменшення фронту фідерної напруги 323
6.2 Розробка мікропроцесорної системи за принципом «залишкової напруги» 337
6.3 Енергетика і спосіб зменшення генераторних струмів електрорухомого складу 342
6.4 Методи зниження кидків струму в режимі «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі 355
6.5 Розробка системи, що реалізує захист за приростом фідерного струму 366
6.6 Оцінка економічної ефективності застосування нових засобів багато параметричного захисту, нових принципів захисту, методики вибору уставок 373
6.7 Висновки до розділу 6 380
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 382
ЛІТЕРАТУРА 390

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ (за абеткою)

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ВКЗ – випробувач коротких замикань

ВОП – високовольтний обчислювальний пристрій

ВРО – блок виводу результатів обробки

ДОН – джерело опорної напруги

ДПЯЕ – динамічні показники якості електроенергії

ДР – диференціальне реле

ЗОД – автоматизована систем збирання та обробки даних

ЕРС – електрорухомий склад

е.р.с. – електрорушійна сила

ІШ – індуктивний шунт

КВ – кремніьовий випрямляч

КЗ – коротке замикання

КМ – контактна мережа

КП – контактний провід

ММ – математична модель

МК – мікроконтролер

МП – магнітний потік

МРС – магніторушійна (намагнічувальна) сила

МСЗ – максимальний струмовий захист

МІСЗ – максимальний імпульсний струмовий захист (захист за приростом струму)

НОП – низьковольтний обчислювальний пристрій

ОЗ – обмотка збудження

ОЗХ – оптимальна захисна характеристика

“П” – паралельне з’єднання ТЕД

ПЗ – послаблення збудження

ПП – повне збудження (повне поле)

ППІ – перетворювач первинної інформації

ППП – пристрій приймання-передачі

ППр – перехідний процес

ППС – пункт паралельного з’єднання

ПСК – пункт секціонування

ПУ – початкові умови

ПЯЕ – показники якості електроенергії

РВ – розмагнічуючий виток

“С” – послідовне (серіїсне) з’єднання тягових електродвигунів

“СП” – послідовно-паралельне з’єднання ТЕД

СЕТ – система електричної тяги

СТЕП – система тягового електропостачання

ТВ – технічні вказівки

ТЕД – тяговий електродвигун

ТМ – тягова мережа

ТП – тягова підстанція

ТС – тяговий струм

ТФ – тяговий фідер

УЗ – Укрзалізниця

ФЗ – фідерна зона

ФЧ – фідерна чарунка

ХС – характеристика спрацьовування

ЦЗО – цифровий запам’ятовуючий осцилограф

ШВ – швидкодіючий вимикач

ЯЕ – якість електроенергії

ВСТУП

Актуальність роботи

Експлуатаційна довжина залізниць України, електрифікованих на постійному струмі, складає 47,2 % від загальної довжини електрифікованих колій [1, 2]. Ця система живлення використовується майже на усіх залізницях України, окрім Одеської та Південно-Західної. Її споживачі зараховуються до споживачів 1-ої категорії і тому надійність і безперебійність роботи підсистеми тягового електропостачання є головними умовами швидкого, якісного і безпечного перевезення вантажів та пасажирів. В той же час, в сучасних реальних умовах експлуатації усієї системи електричної тяги виникає велика кількість аварійних режимів, про що свідчить відповідно велика кількість вимикань швидкодіючих захисних апаратів. За рік на всіх, електрифікованих на постійному струмі, ділянках Укрзалізниці фіксується 200…350 вимикань захисних апаратів тягових підстанцій на головних коліях і 300…400 – на привокзальних [3-8]. Зокрема, за 2010 рік по Придніпровській залізниці загальна кількість вимикань швидкодіючих вимикачів тягових підстанцій, постів секціонування, а також пунктів паралельного з'єднання склала 42673, тобто, 56,1 вимикань на один захисний автомат, а по ДП «Донецька залізниця» ці значення складають 18393 і 28,2 відповідно.

Основними причинами зазначених вимикань є, насамперед, аварійні режими і, зокрема, короткі замикання, а також перенавантаження, несправність електрорухомого складу, спрацювання земляного захисту, атмосферні явища (грози) та інші. При цьому найбільш енергетично небезпечним і найбільш частим аварійним режимом є режим короткого замикання. Відсоток вимикань швидкодіючих вимикачів тягових підстанцій Донецької та Придніпровської залізниць через коротке замикання в тяговій мережі і на електрорухомому складі становить ~33% від усіх вимикань, які припадають на один фідер (в середньому на одній тяговій підстанції встановлено 6…8 фідерних чарунок). Частка вимикань, обумовлених несправністю електрорухомого складу у випадку, коли швидкодіючі вимикачі електрору-

хомого складу не спрацьовують, складає біля 32%. З невизначених причин спостерігається до 31% комутацій захисних апаратів, в тому числі незареєстровані короткі замикання. Зрозуміло, що останнє обумовлено як відсутністю селективності апаратів захисту тягових підстанцій і електрорухомого складу, так і недостатньою швидкодією системи захисту електрорухомого складу, що призводить до значних часових та матеріальних витрат. Крім того, слід зазначити, що 5% від загальної кількості вимикань є хибними. Окрім короткого замикання, частим аварійним режимом є режим «відрив-торкання» струмоприймача контактного проводу.

У більшості своїх випадків зазначені аварійні режими супроводжуються горінням електричної дуги в місцях їх виникнення. При цьому, як відомо, ступінь можливих пошкоджень контактної підвіски визначається кількістю електрики, що проходить в реальному контакті під час аварійного режиму. Наслідками горіння дуги, щонайменше, є відпал контактного проводу з втратою механічної міцності, в найгіршому випадку – його перепал. Контактні проводи є найбільш пошкоджуваними пристроями тягової мережі. Кількість їхніх відмов у рік на 100 км розгорнутої довжини у системі електротяги постійного струму України становить 16% [9]. Особливо варто вказати на імовірність перепалу при опусканні струмоприймача під навантаженням; у середньому вона складає 0,39. Ця ймовірність залежить від тягового струму і становить: 0,13 - при струмах 300...350 А; 0,29 - при 750 - 950 А и 0,75 - при 1350...1550 А.

Частка перепалених контактних проводів над струмоприймачем у загальній кількості пошкоджень контактної мережі на ділянках постійного струму становить близько 50% [9]. При цьому кількість перепалів і обривів (внаслідок раніше утворених кратерів і шийок) коливається від 0,5 до 1,1 випадків у рік на кожні 100 км розгорнутої довжини контактної мережі [3-8]. На електрифікованих ділянках Донецької та Придніпровської залізниць, наприклад, у 2009 році відбулося відповідно 9 та 11 випадків перепалів [6]. При цьому зауважимо, що на відновлення перепаленого (і обірваного) контактного проводу необхідно 3,5…4,0 години, а найменша вартість одного такого

відновлення становить 15,2 тис. грн. І до цього треба додати, що з перепалом і обривом проводу, як правило, пошкоджується і струмоприймач електрорухомого складу. В тому ж 2009 році на Донецькій та Придніпровській залізницях було зафіксовано відповідно 10 і 5 пошкоджень струмоприймачів [6], собівартість відновлення кожного з яких складає ~20 тис. грн. Зрозуміло, що кожен випадок обриву контактного проводу впливає на графік руху поїздів. Наприклад, на найбільш інтенсивній ділянці Придніпровської залізниці між станціями Нижньодніпровськ-Вузол – Синельникове за одну годину проходить 124 пари поїздів. У випадку відновлення контактної підвіски на протягом 4-х годин загальні втрати від простою складають 13045 грн.

Зазначені вище пошкодження є одними із основних причин затримки поїздів, кількість і термін часу яких достатньо значні (див. додаток Б). Наприклад, у період з 2005 по 2011 роки по Донецькій залізниці середня кількість затримок поїздів склала 68 випадків, а середня тривалість простою поїздів склала 96,6 годин, для Придніпровської залізниці за аналогічний період ці значення відповідно склали 106 і 122,9 годин. Проте, слід уточнити, що відсоток від загальної кількості затримок поїздів через пошкодження тягової мережі коливається у межах 58…67% (таблиця Б.2 додатку Б).

Крім цього, дослідження режиму «зняття-відновлення» напруги, який спостерігається при «відриві-доторканні» струмоприймача, особливо важливо для швидкісного руху поїздів на Україні і загалом на створюваних з Україною Європейських Транспортних коридорах. Однак це питання мало досліджене навіть для ділянок не швидкісного руху.

Тому проблема наукового обґрунтування і розробки засобів по підвищенню ефективності функціонування пристроїв і підсистем електричної тяги постійного струму в аварійних режимах її роботи є актуальною і вимагає негайного вирішення, що і передбачено «Програмою електрифікації залізниць України на 2008-2020 роки» (затвердженої наказом № 525-ц від 08.11.2007) та «Програмою розвитку господарства електрифікації та електропостачання Укрзалізниці на період до 2020 року».

Зв'язок з науковими програмами, планами темами

Робота виконана у відповідності з Постановою Кабінету Міністрів України від 23.04.1999 р. №661 «Про заходи підтримки залізничного транспорту», головними напрямками «Програми енергозбереження на залізничному транспорті України на період 1996-2010 рр.», розробленої Укрзалізницею у червні 1996 р., та «Концепцією Державної цільової економічної програми енергоефективності на 2010-2015 роки», схваленої Кабінетом Міністрів України 19.11.2008., № 1446-р.

Дослідження здійснювались також згідно з Програмою електрифікації залізниць України на 2008-2020 роки (затвердженої наказом № 525-ц від 08.11.2007) та Програмою розвитку господарства електрифікації та електропостачання Укрзалізниці на період до 2020 року.

Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з виконанням автором науково-дослідних робіт за темами: «Розробка комплексів багато- параметричного захисту систем електропостачання на тягових підстанціях постійного струму», державний реєстраційний номер 0108U010669 ; «Експериментальні та теоретичні дослідження аварійних електричних режимів роботи тягової мережі системи електропостачання постійного струму», державний реєстраційний номер 0110U006289; «Підвищення ефективності електроспоживання ділянками системи електричної тяги постійного струму», державний реєстраційний номер 0109U000478; «Підвищення ефективності системи електропостачання об'єктів залізничного транспорту».

Дисертаційна робота є також складовою досліджень за координаційним планом Наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» за напрямком «Розробка та удосконалення пристроїв та систем електричного транспорту».

Результати дисертаційної роботи отримані в ході проведення вищенаведених науково-дослідних робіт, у яких автор був науковим керівником, основним виконавцем окремих розділів і є співавтором звітів.

Мета і задачі досліджень

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування системи електричної тяги постійного струму шляхом розробки нових засобів, науково обґрунтованих на основі результатів досліджень перехідних електромагнітних процесів, що протікають в пристроях тягової підстанції, тягової мережі та електрорухомого складу в аварійних режимах їх роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі.

1. Побудувати узагальнену схему заміщення міжпідстанційної зони системи електричної тяги постійного струму і визначити значення параметрів її основних елементів. В схемі заміщення силового тягового кола електрорухомого складу врахувати нелінійні властивості суцільного остова, протиелектрорушійної сили та вихрові струми, що виникають в магнітопроводі тягової електричної машини.
2. Розробити та виконати чисельні розрахунки математичних моделей режиму короткого замикання в різних місцях системи тягового електропостачання без електрорухомого складу, проаналізувати отримані результати.
3. Виконати за спеціальними Програмами експериментальні дослідження аварійного режиму короткого замикання на ряді діючих електрифікованих ділянках Придніпровської залізниці. Користуючись результатами досліджень, перевірити і пересвідчитися в адекватності розроблених математичних моделей.
4. Розробити та виконати чисельні розрахунки математичних моделей аварійних режимів короткого замикання в контактній мережі при наявності електрорухомого складу, що рухається на фідерній зоні, і різних схемах секціонування системи тягового електропостачання; проаналізувати закономірності виникнення величин кидків і тривалості генераторних струмів в різних умовах аварійного режиму.
5. За результатами експериментальних та теоретичних досліджень виявити нові ознаки і запропонувати та обґрунтувати на їх основі нові принципи побудови систем захисту та інформаційних систем фідерів 3,3 кВ постійного струму.

6. Розробити математичні моделі аварійного режиму «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі з урахуванням системи електропостачання. За результатами чисельного інтегрування проаналізувати характер зміни електричних величин, визначити енергетичні показники цього режиму.

7. Здійснити експериментальні дослідження аварійного режиму «відрив-доторкання» струмоприймача електровоза до контактного проводу на деяких діючих ділянках Придніпровської залізниці; пересвідчитися в адекватності розроблених математичних моделей.

8. Розробити математичні моделі системи електричної тяги за умов різних видів короткого замикання на електровозі, а саме: внутрішнє і зовнішнє короткі замикання; перекриття дахового ізолятора. Розрахувати моделі шляхом чисельного інтегрування.

9. Дати рекомендації по підвищенню ефективності роботи систем захисту фідерів 3,3 кВ тягових підстанцій постійного струму, а також силових тягових кіл електричних локомотивів. Зокрема, розробити методи підтримання магнітного потоку тягової електричної машини в режимі відриву струмоприймача від контактного проводу та розробити засоби щодо зменшення негативного впливу дії генераторних струмів в аварійних режимах, що їх спричинили.

10. Використовуючи сучасні мікропроцесорні елементи, розробити первинні зразки багатопараметричних систем захисту та інформаційних систем, в яких принцип виявлення аварійного режиму ґрунтується на винайдених ознаках.

11. Розробити нові методи вибору уставки, що ґрунтуються на сучасному рівні теоретичних знань в області роботи системи електричної тяги постійного струму в аварійних режимах. Методи, що розглядаються, повинні бути налаштовані до використання в існуючих інтелектуальних комплексах захисту і фідерної автоматики тягових підстанцій 3,3 кВ постійного струму.

Об’єктом досліджень є електромагнітні та електроенергетичні процеси в аварійних режимах роботи системи електричної тяги постійного струму.

Предмет дослідження.

Система електричної тяги постійного струму магістральних залізниць.

Методи дослідження

Для розробки електричних схем заміщення пристроїв і всієї системи електричної тяги постійного струму, а також при аналізі отриманих результатів, використовували методи теорії електричної тяги, теорії електропостачання залізниць, основи конструкції і роботи тягових підстанцій, а також методи теорії лінійних, нелінійних електричних і магнітних кіл. Математичні моделі досліджуваної системи в різних режимах її роботи були створені із застосуванням загальних методів математичного моделювання. Для розв'язання систем диференціальних рівнянь електромагнітного стану у формі Коши застосовували чисельний методом Адамса зі змінним кроком інтегрування.

Вимірювання перехідних електричних величин на діючих електрифікованих ділянках залізниць здійснювали за допомогою цифрової запам'ятовуючої осцилографічної приставки типу АСК-3106 (точність 2,0 %), яку приєднували до електровимірювальних перетворювачів: шунтів (клас точності 0,2), подільників напруги (клас точності 0,2). Обробку експериментальних даних виконували на ПЕОМ з використанням спеціалізованого програмного забезпечення осцилографа АКТАКОМ Oscilloscope Pro, APP-3009, ASW3001, EXCEL.

Для виконання теоретичних досліджень, а також обробки їх результатів, були використані системи комп'ютерної математики MAPLE, а також система візуально-орієнтованого програмування MATLAB/Simulink.

Наукова новизна одержаних результатів

В дисертаційній роботі на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна проблема підвищення ефективності функціонування системи електричної тяги постійного струму в аварійних режимах її роботи. Основні наукові результати дисертації полягають у наступному.

1. Вперше теоретично та експериментально встановлено явище лінійного зменшення переднього фронту часової залежності фідерної напруги в режимі короткого замикання і на його основі теоретично обґрунтовано новий принцип фідерного захисту, що дало можливість розробити нову мікропроцесорну систему захисту фідерів +3,3 кВ, яка володіє рядом переваг перед існуючими системами.

2. Вперше запропоновано та експериментально і теоретично обґрунтовано новий метод селективного розпізнавання підсистеми (тягова мережа чи електрорухомий склад) з коротким замиканням, який полягає у визначені в кінці перехідного процесу аварійного режиму рівня фідерної напруги з боку тягової мережі міжпідстанційної зони, так званої «залишкової напруги», що дозволило розробити нову інформаційну мікропроцесорну систему для прискорення і узгодження дій енерго- та поїзного диспетчерів при визначенні місця аварійного режиму.

3. Розроблено математичні моделі аварійних електромагнітних процесів в нелінійній динамічній системі електричної тяги постійного струму, які відрізняються від існуючих моделей врахуванням різних схем живлення та секціонування тягової мережі, параметрів швидкодіючих вимикачів та фільтруючих пристроїв тягових підстанцій, елементів силових тягових кіл електрорухомого складу, стадій горіння електричної дуги в дугогасних камерах швидкодіючих вимикачів, а також місця розташування на фідерній зоні і взаємного впливу двох електрорухомих одиниць, що дозволило більш достовірно і точно визначати миттєві і максимальні значення, тривалість та характер зміни, а також енергетичні та спектральні характеристики струмів і напруг в аварійних режимах роботи системи електричної тяги.

4. Знайшли подальший розвиток існуючі уявлення про механізм, умови виникнення і характер протікання генераторних струмів в аварійних режимах короткого замикання в тяговій мережі і на електрорухомому складі, а також вперше встановлено закономірності залежності їх тривалості та максимальних значень кидків від схеми живлення, секціонування і параметрів тягової мережі, кількості електровозів на фідерній зоні, схеми з’єднання і ступені по-

слаблення збудження тягових двигунів, а також від відстані електрорухомого складу до точки короткого замикання, що дало можливість для кожного із цих факторів оцінити імовірність перепалу контактного проводу в генераторному режимі і запропонувати новий спосіб, що суттєво полегшує протікання аварійного генераторного режиму і, тим самим, зменшує пошкодження контактного проводу.

5. Вперше встановлено закономірності впливу схеми з'єднання тягових двигунів, ступеня послаблення збудження, початкового значення струму електровозів та координати поїзда, що рухається, на кидки тягових струмів у різних елементах системи електричної тяги, а також перенапруг, що виникають на затискачах тягових підстанцій та електровозу в аварійних режимах «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі, що дозволило запропонувати і обґрунтувати метод зниження кидків струму електровоза в період відновлення напруги на основі вмикання ємнісного накопичувача паралельно обмотці збудження тягового двигуна.

6. Розроблено і обґрунтовано новий метод вибору уставки існуючого максимального імпульсного захисту фідерів +3,3 кВ за приростом струму на основі оптимальної захисної характеристики з урахуванням графіку руху поїздів, що дозволяє використовувати цей вид захисту в сучасних інтелектуальних мікропроцесорних терміналах.

7. Запропоновано і теоретично обґрунтовано дві ознаки перехідного процесу вимикання швидкодіючого вимикача тягової підстанції, які дають можливість розпізнавати вид режиму в тяговій мережі, коротке замикання чи струмове перенавантаження і які полягають у знанні рівня максимального значення напруги на швидкодіючому вимикачі безпосередньо після його вимикання і тривалості цього вимикання, що дозволяє енергодиспетчеру прийняти правильне рішення про можливість і доцільність повторного вмикання.

Практична цінність отриманих результатів

1. Запропоновані концептуальні засади побудови математичних моделей системи електричної тяги дають змогу створювати адекватні математичні

моделі будь-яких ділянок систем електричної тяги і, зокрема, системи тягового електропостачання і електровозів постійного струму і при цьому забезпечують врахування ряду важливих, реально діючих в умовах експлуатації залізниць, факторів.

2. Створені математичні моделі системи електричної тяги постійного струму та розроблені програми придатні для аналізу перехідних експлуатаційних і аварійних електромагнітних режимів роботи, що дозволяє на стадії їх проектування оцінити параметри основного електроустаткування елементів системи.

3. Отримані нові закономірності від різних факторів максимальних значень кидків струмів і напруг на різних елементах системи електротяги можуть бути застосовані для прогнозування показників їх експлуатаційної надійності, удосконалення систем їх захисту та розробці технічних вимог на створення нових елементів.

4. Теоретично обґрунтовано та розроблено варіант системи мікропроцесорного фідерного захисту, що базується на новій ознаці, а саме, на крутизні фронту лінійного зменшення фідерної напруги в початковий термін виникнення короткого замикання.

5. Розроблена на основі нового методу «залишкової напруги» і побудована інформаційна мікропроцесорна система для розпізнавання підсистеми (тягова мережа чи електрорухомий склад), в якій відбулося коротке замикання.

6. Виконані експериментальні дослідження режиму короткого замикання в діючих тягових мережах електрифікованих ділянок Придніпровської залізниці дають можливість здійснити порівняльну характеристику функціонування підстанційних швидкодіючих вимикачів типів ВАБ-43, ВАБ-49, ВАБ-206 і UR-40-64S Secheron і на її результаті видати рекомендації щодо ефективної роботи зазначених вимикачів.

7. За результатами досліджень службі електропостачання ДП «Придніпровська залізниця» запропоновано і нею прийнято до використання (додаток А) ряд заходів, призначених підвищити ефективність роботи системи тягово-

го електропостачання постійного струму в аварійних режимах роботи, зокрема, при налаштуванні фідерів тягових підстанцій і ділянок електропостачання залізниці використовуються результати досліджень режиму «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі електрорухомого складу, які дають можливість встановлювати імовірність перепалу контактного проводу.

8. За результатами виконаних досліджень для зменшення впливу генераторних струмів в режимі короткого замикання, а також кидків струмів в момент відновлення живлення запропонована певна модернізація силових кіл тягових двигунів електровозів, що дозволить уникнути пошкоджень контактної мережі від дії надструмів та перенапруг під час аварійних перехідних процесів.

9. Впровадження нового принципу виявлення короткого замикання за швидкістю зменшення напруги дозволить зменшити енергетичну напруженість перспективних бездугових комутуючих апаратів, оскільки процес вимикання останніх буде здійснюватися на ранньому періоді розвитку аварійного режиму.

10. Основні теоретичні положення, методи математичного моделювання аварійних режимів, а також прикладні результати дисертації можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці спеціалістів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Особистий внесок здобувача полягає в плануванні та проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, обробці та аналізі отриманого матеріалу, формулюванні наукових положень і висновків. Постановку мети і задачі досліджень виконано спільно з науковим консультантом. Крім цього, в публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, автору належить в: [71, 157] – визначення показників ефективності роботи швидкодіючих вимикачів тягових підстанцій постійного струму; [155] – особливості визначення початкових умов для диференціаль-

них рівнянь електромагнітного стану системи електричної тяги; [165, 170, 172] – розкладання на гармонійні складові за допомогою дискретного перетворення Фур'є неперіодичних перехідних електричних величин; [178, 182] – вибір основних методик визначення енергетичних показників системи електричної тяги в перехідних режимах її роботи; [194] – розробка математичних моделей перехідних аварійних режимів в системі тягового електропостачання залізниць України; [203, 251] – чисельні розрахунки математичних моделей аварійних режимів в системі електричної тяги; [219] – аналіз схем можливої реалізації захисту, основаного на новому принципі; [222] – визначення значень імовірностних характеристик випадкової функції напруги на струмоприймачі електровозів; [267, 272] – визначення етапів моделювання режиму «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі; [224, 259] – вибір схемотехнічної елементної бази для реалізації мікропроцесорної системи захисту; [276, 292] – визначення основних вимог, критеріїв побудови мікропроцесорних систем фідерного захисту та автоматики, основаних на нових принципах та розробка загальних алгоритмів їх роботи. В роботах, які було написано автором особисто, викладено: [152] – розробка моделі перехідних аварійних режимів короткого замикання системи тягового електропостачання в програмному забезпечені MATLAB/Simulink; [156] – результати експериментальних досліджень режимів короткого замикання у тяговій мережі; [169, 171] – виконання спектрального аналізу перехідних електричних величин; [179, 180] – визначення енергетичних показників системи електричної тяги в перехідних режимах її роботи; [208, 217, 218, 225] – розробка та розрахунок математичної моделі перехідних аварійних режимів короткого замикання системи електричної тяги; [216] – визначення методу розрахунку математичних моделей перехідних режимів в системі тягового електропостачання; [243, 246] – визначення залежностей генераторних струмів електровоза постійного струму при короткому замикання в тяговій мережі; [279] – новий спосіб зменшення генераторних струмів електровоза постійного струму при короткому замикання в тяговій мережі; [260, 271, 273] – розробка математичної моделі перехідних аварійних режимів «зняття-

відновлення» напруги на струмоприймачі електровозу; [291] – розробка для мікропроцесорної системи захисту нової методики вибору уставки максимального імпульсного захисту фідерів 3,3 кВ постійного струму; [275, 293, 294] – розробка багатопараметричної мікропроцесорної системи захисту фідерів 3,3 кВ постійного струму, а також вибір її елементів; [280] – спосіб зниження кидків струму в системі електричної тяги в аварійному режимі «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі. Роботи [152, 156, 169, 171, 179, 180, 208, 217, 218, 225, 216, 243, 246, 279, 260, 271, 273, 291, 275, 293, 294, 280] опубліковано особисто.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та отримали схвалення на наступних міжнародних науково-технічних конференціях: «Сучасні інформаційні технології на транспорті в промисловості та освіті», Дніпропетровськ, 2008 р.; VI-ій «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств», Маріуполь, 2008 р.; X-ій «Проблеми сучасної електротехніки», Київ 2008 р.; IV-ій «Электрификация железнодорожного транспорта (Трансэлектро-2010)», Мисхор, 2010 р.: 16-ій «Силова електроніка та енергоефективність», Алушта, 2010 р.; 12th International Workshop «Computational Problems of Electrical Engineering», Kostryno, Trans-Carpathian region, Ukraine, 2011; 71-ій «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2011 р.; V-ій «Электрификация железнодорожного транспорта (Трансэлектро-2011)», Днепропетровск, 2011 р.; 6-ій «Информационная техника, электромеханика и электротехника», Луганск, 2011 г.; XIII-ій «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика», Кременчуг, 2011 р.; 17-ій «Силова електроніка та енергоефективність», Алушта, 2011 р.; 72-ій Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2012 р.; XII-ій «Проблеми сучасної електротехніки», Київ, Вінниця 2012 р.

Крім того, матеріали дисертаційної роботи доповідалися на засіданні науково-технічної наради служби електрифікації та електропостачання ДП «Придніпровська залізниця» під час звіту за госпдоговірну науково-дослідну роботу «Експериментальні та теоретичні дослідження аварійних електричних режимів роботи тягової мережі системи електропостачання постійного струму» державний реєстраційний номер 0110U006289. Протокол наради представлено в додатку В.

Результати дисертаційної роботи у повному обсязі доповідалися і отримали схвалення на науковому міжкафедральному семінарі при кафедрі «Електричний транспорт та тепловозобудування» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», а також на науковому семінарі кафедри «Теоретичні основи електротехніки» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Публікації

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 42 наукових працях, у тому числі: 29 – у фахових наукових виданнях; 2 – у не фахових наукових виданнях; 11 – у матеріалах міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура і обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, викладених на 422 сторінках, ілюстрованих 332 рисунками, з них 146 рисунків на окремих 62 сторінках та 187 рисунків за текстом, таблиць 34, списку використаної літератури з 300 джерелами на 33 сторінках, додатків 9.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Характеристика аварійних режимів роботи системи електричної тяги

Із аварійних режимів, що найчастіше виникають в елементах системи електричної тяги постійного струму, є режими: короткого замикання (КЗ), режим «зняття (втрати)-відновлення» та поштовхи напруги на струмоприймачі електрорухомого складу (ЕРС). Експериментальних і теоретичних досліджень цих режимів, особливо на електрифікованих залізницях України й особливо в останні 20...30 років, дуже замало.

1.1.1 Види й режими короткого замикання

Найбільш енергетично небезпечним аварійним режимом у системі електричної тяги (СЕТ) постійного струму є режим КЗ [9, 12-18]. До того ж в СЕТ коротке замикання відносно часте явище.

На залізницях України використовують дві системи тяги однофазного змінного струму 25 кВ, 50 Гц і постійної напруги +3,3 кВ. Остання використовується на електрифікованих ділянках Донецької, Львівської, Південної, та Придніпровської залізниць (таблиця Б.1, додатку Б). Проте, згідно розглядуваної таблиці Б.1, дві залізниці, Донецька та Придніпровська, майже повністю електрифіковані на постійному струмі, тому подальший аналіз роботи захисного обладнання СЕТ постійного струму буде присвячений лише їм. Нижче викладено докладний аналіз причин і кількості вимикань швидкодіючих вимикачів (ШВ) тягових підстанцій на залізницях України.

За причиною виникнення КЗ можуть бути поділені на дві групи [12]. До першої групи відносять причини випадкового характеру: перекриття ізоляторів повітряних проміжків, перекриття рогових розрядників внаслідок атмосферних і комутаційних перенапруг, а також птахами; з’єднання прово-

дів з заземленими частинами різних споруд і конструкцій, внаслідок їх руйнування чи стихійних лих; особливі погодні умови (сильний вітер, ожеледь); торкання проводів контактної мережі (КМ) обірваних листів дахів пошкоджених вагонів та інші. В таблиці 1.1 представлено кількісні показники пошкодження ізоляторів.

Таблиця 1.1

Кількість пошкоджень контактної мережі з різних причин на Донецькій та Придніпровській залізницях

Залізниця	Рік	Кількість пошкоджень					Пошкодження струмоприймачів із-за несправності контактної мережі	
		Всього	Пробої і перекриття ізоляторів		Перепали контактних проводів			
			Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%
Донецька	2005	22	0	0	2	9,1	3	13,6
	2006	30	*	*	*	*	*	*
	2007	28	1	3,57	2	7,14	7	25,0
	2008	37	4	10,81	11	29,7	13	35,1
	2009	30	1	3,33	9	30,0	10	33,3
	2010	35	1	2,85	2	5,71	7	20,0
	2011	45	1	2,22	1	2,22	8	17,8
Придніпровська	2005	35	1	2,85	8	22,8	9	25,7
	2006	27	*	*	*	*	*	*
	2007	40	4	10,0	6	15,0	10	25,0
	2008	32	3	9,37	11	34,3	9	28,1
	2009	37	3	8,11	11	29,7	5	13,5
	2010	53	2	3,77	3	5,66	8	15,1
	2011	53	1	1,89	6	11,3	8	15,1

Примітка: * – інформація відсутня

До другої групи відносять причини виникнення КЗ експлуатаційного характеру: замикання струмоприймачем секційного ізолятора чи повітряного проміжку, що відокремлює секцію мережі, яка знаходиться під напругою, від заземленої; неправильне регулювання рогового розрядника, що призводить до періодичного торкання рогів при вібрації опори в момент проходу потягу чи при вітрі, а також замикання рогів забрудненими каплями роси чи дощу; зниження електричної міцності ізоляторів внаслідок забрудненості їх повер-

хні, механічні пошкодження і старіння; руйнування конструкції і обрив КП, що виникають при неправильному їх регулюванні, недопустимому навантаженні і зниженні міцності в експлуатації; помилкові дії обслуговуючого персоналу; торкання кранами та іншими механізмами КП під напругою, під час виконання під ними вантажних робіт.

Автор роботи [19] окремо виділяє ще дві групи, з чим не можна не погодитися: причини КЗ, що пов'язані з ЕРС; причини, що пов'язані з неправильною експлуатацією постів секціонування (ПСК) і пунктів паралельного з'єднання (ППС).

До третьої групи слід віднести: неправильну взаємодію КП і струмоприймача електровоза внаслідок дефектів підвіски і струмоприймача; всі види КЗ на ЕРС; неправильні дії локомотивних бригад; схід з рейок рухомого складу.

До останньої групи слід віднести помилкові вмикання в схемі секціонування. Основні місця й види КЗ, згідно [15], показано на рис. 1.1.

Короткі замикання призводять до різних порушень нормальної роботи системи електропостачання. При КЗ, що виникають поблизу ТП, струми можуть досягати 20…40 критичних перевищень струмів нормального навантаження [12, 15, 20, 21]. Такі аварійні режими з великими значеннями надструмів, навіть при дуже малій їх тривалості, в результаті динамічного впливу можуть призвести до руйнування комутаційних апаратів та приладів, до термічних пошкоджень струмопровідних частин. При цьому найбільш чутливим до термічного впливу є контактні проводи, у яких внаслідок термічного впливу змінюються механічні властивості [22, 23]. Якщо ж струм КЗ протікає тривалий час та ще й супроводжується горінням дуги, то тепловий вплив може призвести до перепалу КП [24, 25]. Для їх уникнення виконують ряд заходів на КМ особливо в місцях розгону ЕРС, а також враховують при виборі уставок ШВ ТП і апаратури секціонування КМ.

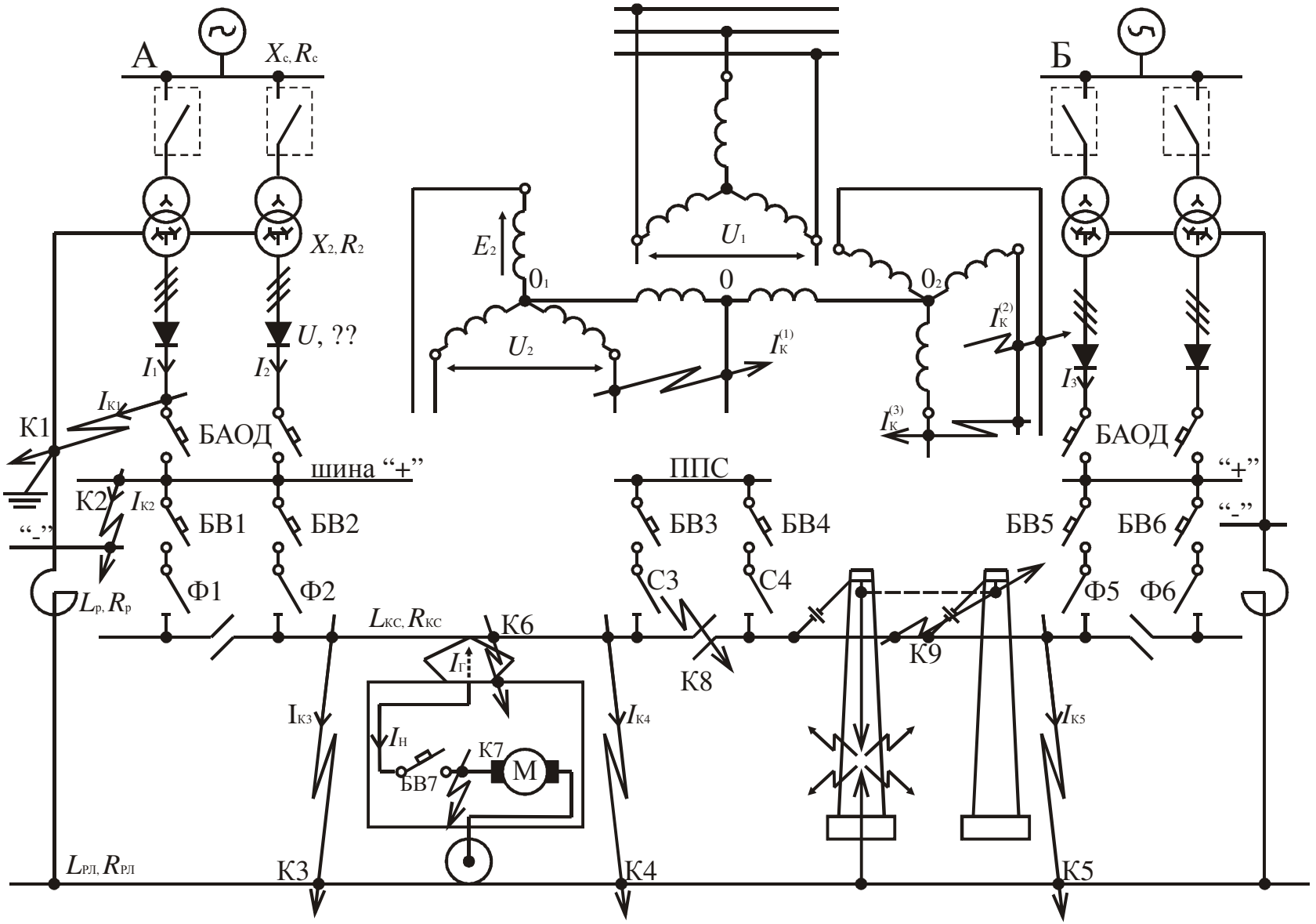


Рисунок 1.1 – Основні елементи тягової мережі (ТМ) постійного струму та місця типових КЗ [15].

Обриви проводів інколи супроводжуються зламом струмоприймачів, результати моніторингу пошкоджень струмоприймачів приведено в таблиці 1.1 [3-8]. Вищезазначене призводить до значних затримок поїздів, результати аналізу кількості і тривалості затримок представлено в таблицях Б.2…Б.5 додатку Б.

Короткі замикання можуть виникати на значних відстанях від ТП, наприклад, поблизу суміжної підстанції. У такому випадку струми можуть бути настільки незначними, що в окремих випадках виявляються навіть менше звичайних струмів навантаження. Такі режими є найбільш небезпечними, оскільки при тривалому протіканні цих струмів вони можуть призвести до найбільш важких ушкоджень КМ, внаслідок відпалу на великій протяжності КП і несучих тросів, що унеможливлює їх подальшу експлуатацію, зважаючи на знижену механічну міцність. Аварія, яка є наслідком невимкненого КЗ, може призвести до тривалої перерви нормальної експлуатації електрифікованої ділянки. Тому проблемі захисту від струмів КЗ від самого початку електрифікації залізниць приділялося багато уваги.

Дослідженням аварійного режиму КЗ в елементах СЕТ науковці почали займатися від самого початку впровадження електрифікації на залізниці. Найбільший внесок у дослідження явища КЗ в СЕТ постійного струму було зроблено такими вченими як - Радченко В. Д., Векслер М. Й., Пупинін В.М., Кучма К.Г.

Робота [15] стала узагальнюючою в науковій діяльності її автора. Автор виділив основні причини виникнення в ТМ надструмів, досліджуючи експериментально отримані осцилограми перехідних процесів різних режимів роботи СЕТ. Автор один з найперших почав розглядати режим КЗ в ТМ при наявності тягового навантаження (електровозу що рухається) на фідерній зоні. Аналізуючи осцилограми перехідних струмів під час вимикання КЗ, було встановлено, що час затухання генераторних струмів створених ЕРС може досягати 2…3 с. Недоліками цих робіт автора є обмежена кількість проведених експериментів і відсутність теоретичної основи, яка б дозволила більш

глибоко дослідити цей аварійний режим. Проведені автором експерименти були виконані при наявності електровозів серії ВЛ19, які значно відрізняються від сучасного електрорухомого складу, тому результати досліджень автора не можна застосовувати для сучасних; тим більше українських залізниць. Крім того, слід підкреслити одну хибну рекомендацію зроблену автором в роботі, а саме: вимикати вантажний електровоз, що рухається, при падінні напруги на струмоприймачі нижче деякого мінімального значення. З точки зору експлуатації сучасних залізниць ця рекомендація просто неприпустима.

В роботі [26] автор досліджував причини зменшення надійності системи фідерного захисту при вимикання КЗ на фідерній зоні. Було встановлено, що основними причинами цього є: низька точність налаштування електромеханічних ШВ; коливання напруги утримуючої котушки; знос головних контактів ШВ; взаємний вплив магнітних полів вимикачів однієї фідерної чарунки; вплив магнітного поля реактора. Автором внесені деякі пропозиції для зменшення впливу цих факторів.

В роботі [27] автор за допомогою телеграфних рівнянь оцінював наведену напругу в проводах паралельно розташованих до ТМ постійного струму під час протікання перехідних надструмів КЗ в останній. Однак в роботі відсутні чисельні розрахунки, результати яких дійсно дали б значення наведеної напруги.

Робота [17] присвячена, головним чином, розробці імпульсного захисту фідерів від струмів КЗ. Автором було розроблено імпульсне реле, проте широкого розповсюдження ця розробка не набула. Теоретичні дослідження, головним чином, стосуються розробки магнітного кола реле. У роботі взагалі відсутні будь-які експериментальні дослідження процесу КЗ, а математичні моделі СТЕ виконані на низькому рівні, на скільки того дозволяють аналітичні методи розрахунку перехідних процесів в нелінійних колах.

Автор роботи [28] досліджував явища перенапруги на реакторі і затискачах ТП під час вимикання КЗ в ТМ без електровозу. Дослідження було проведено теоретично для ТП з ртутними випрямлячами. Встановлено, що

під час вимикання КЗ на затискачах ТП виникає перенапруга, величина якої може досягати 12,5 кВ. Вона залежить від відстані до точки КЗ. Проте, під час спрощення схеми заміщення пасивного фільтру ТП автором було допущено помилку у визначені еквівалентних індуктивності та ємності. Оскільки фільтр увімкнено паралельно до затискачів ТП то, зважаючи на цю помилку, можна припустити, що отримані автором результати є далекими від дійсних.

В роботах [18, 29, 30] автор висвітлював результати своєї наукової діяльності з оцінки та розподілення потенціалу рельс-земля в перехідних режимах КЗ. І у роботі [18] оцінював умови електробезпеки під час обслуговування рейкових кіл. Всі теоретичні розрахунки проведені автором, що характерно для науковців того часу, були проведені операторним методом, який є чинним для лінійних кіл В початкових своїх роботах, наприклад [30], автор розглядає СТЕП з однією ТП, тобто розглядалося лише консольне живлення ТМ. В роботі було визначено закон зміни потенціалу рейки, а також його розподілення навколо точки КЗ. В роботі [29] автор теоретичним шляхом розробив схему заміщення рейки, оцінив вплив явища гістерезису і поверхневого ефекту на зміну струму в режимі КЗ. В цій роботі вперше було наголошено, що для більш докладного дослідження режиму КЗ рейки слід розглядати як масивний стальний елемент. В усіх роботах автора жодного разу не оцінюється вплив ЕРС на систему тягового електропостачання.

Робота [31] присвячена вивченню впливу режиму КЗ на рейкові кола. В ній використано основні положення, висновки, схеми заміщення, які були головним надбанням попереднього автора, це і зрозуміло: адже він був керівником автора даної роботи. Автор роботи запропонував захист ТМ від струму КЗ за допомогою датчика, що вмикається до дросель-трансформатора. Слід зазначити, що автор поверхнево дослідив вплив ЕРС на струм в рейках під час аварійного режиму. Однак, його представлення силової схеми електровозу обмежилося врахуванням лише резистором та індуктивністю обмоток тягових електричних двигунів (ТЕД).

Автор роботи [32] займався вивченням впливу аварійного режиму КЗ в ТМ на роботу ртутних випрямних агрегатів, до того ж, автор в своїх теоретичних викладках не оцінював вплив ЕРС, власне, це є зрозумілим враховуючи низький рівень обчислювальної техніки в той період.

Слід відмітити дослідження режимів КЗ, що проведені автором роботи [33] для сучасних електрифікованих на постійному струмі залізниць Росії. Головним своїм надбанням автор роботи вважає нову розрахункову модель для вибору уставки ШВ, що враховує перехідні процеси в ТМ і на ЕРС. Встановлено, що селективна робота захисних апаратів ТП і ЕРС не може бути забезпечена, якщо КЗ виникло при послаблені збудження ТЕД. Зважаючи на попередні дослідження викладені вище, на нашу думку, автор зробив хибний висновок про те, що ЕРС в тяговому режимі не погіршує умов вимикання ШВ ТП в момент виникнення КЗ.

Приведені в роботі [34] розрахунки показали, що наявність землі паралельно рейковому колу значно впливає на розрахунковий опір кола КЗ. Якщо цей вплив не врахувати, то розрахункові струми КЗ будуть занижені: для літніх умов – до 20%; для зимових – до 10 %.

1.1.2 Режим «зняття-відновлення» та поштовхи напруги на струмоприймачі електрорухомого складу

Через низку обставин ковзання струмоприймача по проводу не є ідеальним і в процесі струмознімання супроводжується відривами струмоприймачів, що сприймається двигунами ЕРС як короткочасне зняття і повторне подання напруги [35]. Перехідні процеси, що виникають при цьому, залежно від часу відсутності напруги, призводять до сплесків струму, що значно перевищують попередні струми навантаження і сприймаються мережею і живлячими апаратами як короткочасний поштовх-приріст навантаження. При цьому швидкість зростання таких струмів в залежності від типу двигуна і параметрів схеми досягає 60…80 А/мс при тривалості переривання живлення 0,03…0,4 с і 100…180 А/мс при перериванні живлення 1…3 с [15, 16].

Режим «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі ЕРС є найменш досліджуваним. По цьому аварійному режиму автору відомо лише декілька робіт, які присвячені, головним чином, впливу цього режиму на електромагнітні процеси в силовому колі ЕРС. Жодна з робіт, розглянутих далі, не оцінює вплив цього режиму на електромагнітний стан в елементах СТЕП.

В роботі [36] досліджено перехідні процеси, що виникають у силових колах ТЕД типу ДПЕ-340 і НБ-406 для електровозів постійного струму відповідно типу ВЛ-19 і ВЛ-23 при їх роботі в режимах з послабленням збудження. Розрахунки для режиму «втрата-відновлення» електроживлення виконано за лінійною моделлю, аналіз виконаний операторним методом при номінальній напрузі та з врахуванням вихрових струмів одним еквівалентним короткозамкненим контуром з незмінними параметрами.

Роботи [37, 38] присвячені дослідженню нестаціонарних режимів: «втрата-відновлення» напруги, а також КЗ у силових колах з двигунами НБ – 406 електровозів постійного струму типу ВЛ 8, ВЛ 23. У фізичних моделях вихровими струмами автор нехтує, тому що якір є шихтованим, а потокозчеплення додаткових полюсів у багато разів менше, ніж у головних. Встановлено, що величина кидка струму при зміні напруги живлення визначається магнітним станом ТЕД в момент відновлення напруги; при тривалості втрати живлення до 0,1 с кидки струму при різних індуктивностях шунта та ступенях послаблення збудження однакові і перевищують кидки струму на повному полі не більш, ніж на 20 %. Кратність струму КЗ тим більше, чим глибше розмагнічене магнітне коло ТЕД. При зовнішньому КЗ кратність генераторного струму складає $I_{\max} = 4 \cdot I_{\text{ном}}$ при коефіцієнті послаблення збудження $\beta = 43\%$.

Вплив коливань напруги в контактній мережі, в межах 20...35 % від номінального, на перехідні процеси в силовому та допоміжному колах електровозів досліджено в [39]. Нажаль, в роботі відсутня математична модель, а також результати розрахунків, крім того, автор не вказав ні типи двигунів, ні типи електровозів.

Автор роботи [40] випробував вплив відхилення напруги в контактній мережі від номінальної $U_{ном} = 3000\,B$ на нагрівання тягових двигунів типів ДПЭ-340 та НБ-406 електровозів ВЛ22М та ВЛ8. Для цього дослідник розв'язував системи диференціальних та алгебричних рівнянь теплового балансу різних частин ТЕД.

В роботі [41] на основі приведених теоретичних та експериментальних випробувань встановлено, що розподілення потенціалу по колектору машини постійного струму в перехідних режимах виявляється сумісною дією електрорушійної сили обертання та самоіндукції, яка виникає в обмотці якоря.

Автор робіт [42, 43] розв'язує аналітично лінійну систему рівнянь, яка описує перехідні процеси в двигунах послідовного збудження типу ДП-72, ДК-255 та ДПЭ-340 в режимі «зняття-відновлення» напруги, термін часу розриву кола струму збудження складає 0,01...0,02 с. Час спадання магнітного потоку в ДК-255 при втраті електричного живлення складає 0,4 с. Розрахунки рівняння перевірено осцилографуванням процесів спадання та зростання магнітних потоків в ТЕД ДК-255.

В роботі [44] проведено аналіз факторів, що впливають на протікання перехідних процесів і розглянуті способи їх розрахунку на аналогових обчислювальних машинах. Дослідження електромагнітних процесів в силових колах електровозів показали, що при зміні початкового струму в діапазоні $(0{,}5...1{,}3)I_{ном}$ величина струму змінюється в 1,8…2 рази в режимі поштовху напруги $\Delta U = 0{,}3U_{ном}$ і в 1,1…1,5 рази в режимі відновлення напруги на ТЕД. У випадку коли $U_{поч} = (1{,}15...1{,}2)U_{ном}$ залежність максимального струму від $U_{поч}$ в режимі його відновлення на ТЕД є прямою лінією.

В роботі [45] автори пояснили деякі фізичні аспекти прояву цього режиму і на рівні ідеї запропонували використовувати накопичувачі електроенергії для зменшення кидків струму.

В роботі [46] розроблено математичні моделі і на основі їх чисельних розрахунків докладно досліджено вплив імовірнісного характеру зміни на-

пруги, початкового усталеного значення тягового струму, ступені послаблення збудження, параметрів вітки шунтування та тривалості зняття напруги на перехідні електричні та магнітні величини у аварійних режимах роботи електровоза: «зняття-відновлення» напруги; поштовхів напруг; внутрішнього та зовнішнього коротких замикань. Всі розрахунки приведені для першого українського електровозу ДЕ1. Встановлено, що при відриві струмоприймача від КП більш, ніж на 0,8 с максимальне значення струму в силових тягових колах електровоза зростає до $(4...4,5)\cdot I_{\text{ном}}$,тобто спостерігається кидок струму, який може призвести до виходу із ладу ТЕД. Зрозуміло, що такі кидки струму впливають і на ТМ, і на ТП, але автор такий вплив на тягове електропостачання не аналізувала.

Найбільш вагомою є робота [47], в якій автором на лабораторному стенді було проведено ряд дослідів по вивченню проблем перепалів: при горінні дуги між полозом струмоприймача і контактним проводом; при горінні дуги між полозам і двома паралельно розміщеними проводами; при підійманні та опусканні струмоприймача. Встановлено, що перепал виникає не в момент торкання струмоприймача до проводу, а в момент відриву, коли з’являється електрична дуга.

Для уникнення перепалів контактних проводів ТМ авторами роботи [48] запропоновано апаратуру теплового захисту від відпалу. Апаратура забезпечує захист від відпалу проводів будь-якого типу контактної підвіски постійного струму в нормальних робочих, вимушених та аварійних режимах роботи ділянок ТМ. Крім того, вона забезпечує захист ТМ при струмах КЗ, менших максимального струму навантаження.

1.2 Види захисту системи електричної тяги та вимоги до них

Режими роботи пристроїв СТЕП залізниць принципово відрізняються від загальноенергетичних, що суттєво ускладнює створення систем захисту

від струмів КЗ. Особливості цих режимів докладено та висвітлено в роботі [12].

Найпростішим видом захисту, яким володіє сам ШВ, є **максимальний струмовий захист** (МСЗ). Даний захист від КЗ у КМ постійного струму є найбільше простим і надійним. Принцип її дії оснований на порівнянні струму, що протікає по фідеру, зі струмом уставки цього захисту. Слід зазначити, що на сьогодні, на ТП для захисту фідерів 3,3 кВ застосовується тільки цей вид захисту, не дивлячись на велику кількість принципів розроблених науковцями. Проте МСЗ технічно реалізований швидкодіючими захисними апаратами, володіє значними недоліками: ШВ не вимикають далекі КЗ в «мертвих зонах» з малими струмами; часті випадки неселективного спрацьовування.

За всю історію електрифікації залізничного транспорту було виконано багато робіт, в результаті яких в різні часи були запропоновані різні схеми захисту від струмів КЗ, побудовані на найрізноманітніших принципах. Проте, загальним для всіх цих схем є те, що МСЗ контактної мережі за допомогою ШВ залишається основним видом захисту. Його лише доповнюють такими спеціальними пристроями чи схемами, які підвищують чутливість захисту по відношенню до малих струмів КЗ, їх класифікація представлена в роботі [17].

Розглянемо більш докладно лише деякі з існуючих видів захисту, і виконаємо їх оцінку з точки зору відповідності запропонованих принципів дії захисту дійсним умовам роботи електрифікованих залізниць; величини зони захисту; швидкодії; надійності роботи; відносної вартості.

На польських залізницях набуває широкого розповсюдження система захисту від КЗ з груповими заземлювачами і короткозамикачами [49]. Цікавою є сама схема безконтактного короткозамикача (тип TZD), роль ключа виконує тиристор. Стан тиристора визначають спеціальні блоки керування, які контролюють напруги між рейкою та землею. Якщо напруга між тросом групового заземлення і рейкою перевищує граничне значення 120±5 В за певний час, спрацьовує тиристор. Це викликає КЗ заземлених конструкцій на рейку. Недоліком такої системи є висока вартість і низька надійність.

Автором роботи [50] вперше було запропоновано схему з використанням трансформатора з повітряним проміжком і зазначено, що максимальне значення вторинного струму такого трансформатора залежить від швидкості зміни первинного струму. Проте, як було зазначено в роботах [12, 14, 17], на електрифікованих залізницях постійного струму швидкість зміни струму КЗ не завжди перевищує швидкість при експлуатаційних режимах. Тому, як пристрої підвищення чутливості вимикачів, у відношенні до виявлення малих струмів КЗ, ці види захисту на сьогодні не використовують.

Тривалий час дослідники вважали імпульсний захист «панацеєю» у вирішені проблеми захисту тягової мережі, було присвячено велика кількість робіт, найбільш визначні з них це [12, 15, 17, 21, 51-54]. Застосування, розглянутих в цих роботах, пристроїв хоч і дозволило підвищити чутливість захисту ТМ до малих струмів КЗ, але все ж, призвело до деяких незручностей в експлуатації. Одна з них пов’язана з підвищенням кількості помилкових вимикань вимикачів, обладнаних такими пристроями, і викликані вищезазначеними властивостями інтегруючих кіл. Другі пов’язані з неселективними вимиканнями пристроїв захисту. Тому пристрої захисту, виконані на цьому принципі, доводиться налаштовувати на збільшення струму, що відповідає кожному окремому стрибку струму, а не сумі накладених один за другим стрибків, з урахуванням загасання кожного з них, що відбувається з постійної часу інтегруючого кола. Такий інтегрований струм, хоча й менше відповідного сумарного приросту струму, але більше приросту кожного окремого стрибка. Тому пристрої захисту, реалізовані з використанням даного способу, мають загрублену уставку й не дозволяють реалізувати високу чутливість, яку дало б виділення приросту від кожного окремого стрибка. Істотно зменшити постійну часу інтегруючого кола для уникнення зазначеного недоліку не можна, тому що в цьому випадку вихідна величина втрачає залежність від приросту струму і стає залежною від швидкості його зростання [51]. Треті, найбільш неприємні незручності, проявляються при проїзді ЕРС, що йде під струмом, повітряного проміжку. Для уникнення помилкових вимикань ШВ

ТП під час проїзду потягом повітряного проміжку автором роботи [55] запропоновано використовувати схему з заблокованими ШВ. Блокування здійснюється за допомогою реле напруги.

В роботі [52] теоретично обґрунтовано і запропоновано структурну схему пристрою, що дозволяє розпізнавати кількість кидків струму в ТМ. Застосування такого реле дозволяє виділяти кидки струмів віддалених КЗ на фоні ступінчатого регулювання швидкості руху ЕРС. Проте використання на практиці, з невідомих причин, ця схема не знайшла.

Продовженням теми імпульсного захисту є так званий двозонний захист [21, 51], побудований на двох послідовно увімкнених ШВ з ІШ і РВ. Двозонний захист показав відносно непогані результати по селективності вимикання на початку його впровадження [56], який, крім того, забезпечує максимальну захищеність фідерної зони і одночасно знижує кількість помилкових вимикань. Проте, під час комутації струмів КЗ обидва ШВ спрацьовують неодночасно, що призводить до: по-перше, збільшення часу вимикання аварійного режиму; по-друге, нерівномірного зносу контактів; знижує захищеність фідерної зони. Для усунення цих недоліків систему захисту фідерів 3,3 кВ доповнювали спеціальними струмовими реле на герконах [21, 57].

З появою сучасних ШВ та інтелектуальних терміналів, побудованих на мікропроцесорній елементній базі, деякі спеціалісти пропонують для двозонного захисту використовувати інші показники, а саме [58]: в якості струмової відсічки використовувати максимальний струмовий захист, а для вимикання віддалених КЗ застосовувати захист за значенням опору ТМ з програмуванням витримки часу. Проте, на думку автора даної роботи, таке поєднання дещо змінює поняття двозонного захисту і є не зовсім коректним. До речі, подібне поєднання видів захисту було запропоновано в роботі [59]: поєднувалися дистанційний і максимальний імпульсний захист. Проте, автор цієї роботи не називав її двозонною.

Захист, що реагує на зміну струму і напруги, хоча і володіє доброю селективністю у порівнянні з іншими видами захисту, але практично складний і

має велику вартість реалізації. В роботі [60] представлено функціональну схему датчика, що встановлюється на ПСК і ППС двопутньої ділянки і реагує на поєднання рівня напруги з величиною і напрямком струму.

Деякий час принцип дії захисту по змінній складовій струму в мережі (резонансний захист) вважався найбільш перспективним. Проте дослідження показали, що зона дії захисту за зміною складовою тягового струму в мережі вкрай обмежена і складає лише 6…12 км [17].

Як було зазначено вище, струми робочих режимів в мережах постійного струму при великій інтенсивності руху потягів і струми КЗ, що виникають на відстані 8-12 км від підстанцій, неможливо відрізнити по їх значенню один від одного. Вважається, що вирішити вказану проблему можна, тільки використовуючи багатопараметричні пристрої, що аналізують одночасно декілька параметрів робочих і аварійних режимів, що дозволить перейти на новий якісний рівень. Реалізація такого багатопараметричного захисту на старій електро-магніто-механічній базі принципово неможлива, отже, необхідний новий підхід до побудови пристроїв, що обслуговують фідери КМ електрифікованих залізниць постійного струму [10]. Більшість авторів наголошують про необхідність об’єднання в єдиному пристрої функцій захисту і автоматики фідера [14, 19]. Крім того, вже в роботі [9] наголошувалося, що при створенні нових систем захисту слід шукати зовсім інші принципи, а не вдосконалювати ті, що існують від самого початку електрифікації залізниць, в яких використовуються ШВ як струмові реле.

Сучасні системи багатопараметричного захисту фідерів повинні бути побудовані на мікропроцесорній елементній базі, і на думку як вітчизняних так і іноземних фахівців [61], повинні задовольняти багатьом реально необхідним вимогам [14]. Загальним підходом до використання мікропроцесорної техніки для керування систем захисту тягових підстанцій постійного струму є створення багатопараметричних, високочутливих, селективних, адаптивних (параметри яких легко налаштовуються для умов певного фідера з його типовими режимами роботи) систем захисту фідерів. Багатомашинні і

багатопроцесорні децентралізовані інтелектуальні комплекси здатні здійснювати різні за призначенням і складністю функції керування, у тому числі функції пристроїв автоматики і телемеханіки. Крім того, як показує досвід Франції, яка є світовим лідерів в залізничному транспорті [62], можливості промислових мікропроцесорів дозволяють здійснювати більш гнучке і відносно просте налаштовування до подальшого розвитку.

В роботі [63] представлено одну з найперших електронних систем захисту, що одночасно аналізує декілька параметрів, а саме: дві ступені дистанційного захисту; захист за швидкістю зміни струму; за приростом струму; захист за інтегралом приросту струму КЗ за час його зростання. Це дозволило перекласти на фідерні ШВ лише функції максимального струмового захисту від близьких КЗ. Застосування такого електронного блоку дозволило підвищити уставку ШВ на 40…50%.

На залізницях Японії для виявлення порушень в роботі системи тягового електропостачання постійного струму застосовують селективні електронні реле типу delta-I [64]. Такі реле дозволяють розпізнавати струми короткого замикання по характеру їх зміни.

Для вимикання струмів короткого замикання великого значення на тягових підстанціях постійного струму отримали широкого розповсюдження швидкодіючі повітряні вимикачі механічного типу. Пізніше були розроблені мережеві вимикачі на тиристорах GTO, а також вакуумні, які знайшли застосування на деяких приватних залізницях Японії. Вони характеризуються майже повною безшумністю в роботі і не потребують обслуговування. При вимиканні кола постійного струму вимикачі як на GTO, так і вакуумні мають нелінійний опір, але останні вмикають також комутаційне коло для проходження струму у зворотному напрямку.

На сьогодні найбільш ефективним (з високими експлуатаційними показниками), перспективним для впровадження на електрифікованих залізницях постійного струму України, є пристрій цифрового захисту та автоматики фідера ЦЗАФ-3,3 [65], розроблений співробітниками Московського державного

університету шляхів сполучень (МІІТу) та Всеросійським науково дослідним інститутом залізничного транспорту (ВНИИЖТ), виробником цього комплексу стало підприємство НІІЕФА ім. Єфремова м. Санкт-Петербург. Вартість мікропроцесорного інтелектуального терміналу ЦЗАФ-3,3 на Україні складає 40 тис. грн. Опису цього комплексу багатопараметричного мікропроцесорного захисту присвячено багато наукових робіт, наприклад, [19, 66-69], особливо слід відмітити роботу [19] самого автора цієї розробки.

Автори роботи [70] звертають увагу на значну гнучкість цього інтелектуального терміналу: шляхом доповнення програмного забезпечення ЦЗАФ-3,3, здатен виконувати функції пристроїв резервування відмов ШВ. На залізницях постійного струму України впровадження цього мікропроцесорного пристрою набуває все більшої популярності. В роботі [66] відмічено, що його використання замінює цілий ряд існуючих пристроїв, виконує функції пристроїв, яких раніше не було на більшості ТП. В усіх публікаціях присвячених цьому пристрою, головним недоліком, автор даної роботи вбачає відсутність будь-якого моніторингу його роботи, аналізу причин вимикань фідерних вимикачів за сигналом ЦЗАФ-3,3. Більшість авторів публікацій наголошують на тому, що використання цього пристрою (високої вартості) доцільне лише на напрямках залізниці з великою завантаженістю.

Також вже декілька років на двох фідерах тягової підстанції «Зелений Клин» ЕЧ-1 Красний лиман Донецької залізниці встановлені і працюють пристрої захисту і управління фідерів КМ постійного струму типу МРЗС-05А-02 виробництва ВО «Київприлад». Пристрій виконує наступні функції релейного захисту: направлена струмова відсічка; направлений МСЗ; МІСЗ; максимальний струмовий захист за швидкістю зростання струму; дистанційний захист; захист мінімальної напруги. Крім того, він також виконує деякі функції автоматики, управління, реєстрації аналогових і дискретних сигналів тощо. Проте, на сьогодні ці інтелектуальні термінали все ще знаходяться на експлуатаційних випробуваннях. Аналізу ефективності роботи цих пристроїв

багатопараметричного захисту ще не було проведено тому стверджувати про його певні переваги чи недоліки неможливо.

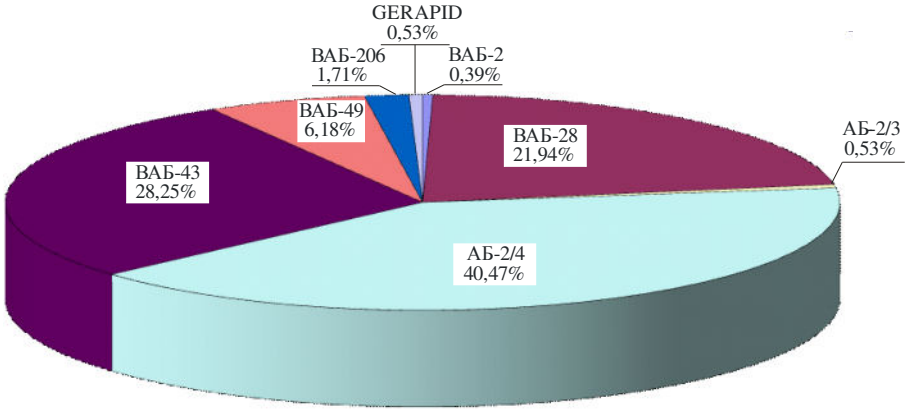
Розглянуті інтелектуальні термінали ЦЗАФ-3,3 і МРЗС-05А-02, головним чином, працюють за принципом аналізу величини і параметрів струму фідера, а основним видом захисту є МСЗ. У більшості випадків інші допоміжні види вимкнуті і тому говорити про переваги впровадження цих пристроїв не можна. Це пов'язано з тим, що для зв'язку з комутаційним апаратом використовуються проміжні блоки, які також мають реальний час спрацювання, який в деяких випадках може досягати 10 мс [14].

1.3 Оцінка експлуатаційних умов роботи швидкодіючих вимикачів фідерів тягових підстанцій

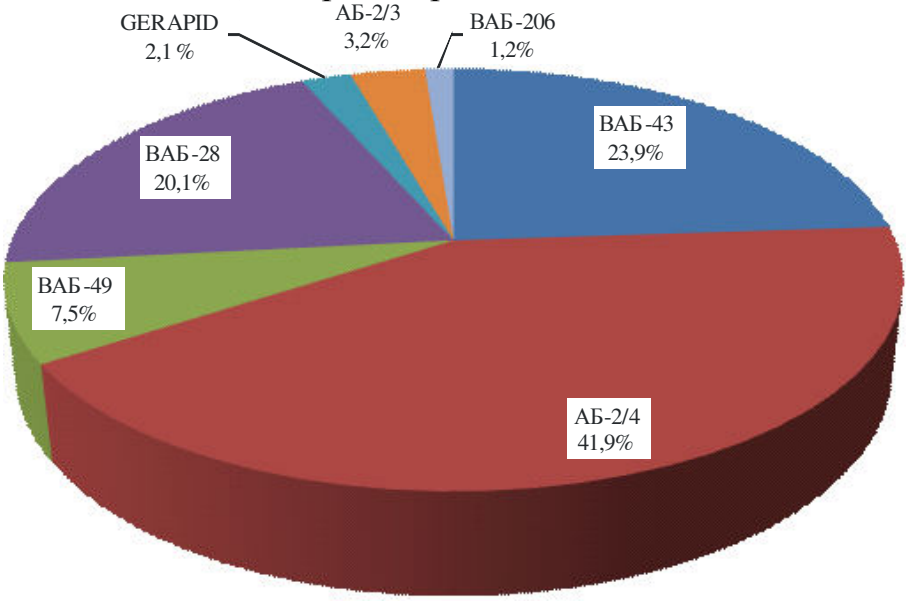
Як відомо, нормальна робота існуючих на сьогодні релейно-струмових систем захисту фідерів 3,3 кВ [13, 14] залежить від уставки ШВ, на основі яких побудовані ці системи. На практиці уставки ШВ часто бувають надто занижені, що призводить до значної кількості помилкових та неселективних вимикань ШВ ТП. Причинами помилкових спрацьовувань також є стрибкоподібна зміна струму навантаження в ТМ під час перегрупування ТЕД ЕРС в їх нормальних режимах роботи, а також у режимах «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі [46]. Неселективні вимикання ШВ відбуваються за рахунок нескоординованої роботи систем захисту ТП та ЕРС.

На рис. 1.2-1.7 і в таблицях 1.2, 1.3 на прикладі електрифікованих ділянок ДП «Придніпровська залізниця» [71] і «Донецька залізниця» відповідно, представлено систематизований автором дисертації матеріал кількості і причин вимикань ШВ фідерного захисту за період 2009, 2010 рр. З ілюстраційного матеріалу (таблиці 1.2, 1.3 і рис. 1.2-1.7) видно, що стан роботи фідерного захисту СТЕП подібний для цих двох залізниць, тому подальший аналіз експлуатації пристроїв захисту системи електричної тяги будемо виконувати для Придніпровської залізниці.

На ДП «Придніпровська залізниця» найбільша кількість швидкодіючих автоматів серії АБ-2/4 40,47% (рис. 1.2, а). Проте найбільшу кількість вимикань виконують ШВ типу ВАБ-43 36,76% (рис. 1.3, а). Слід зазначити, що в останні роки почалося впровадження нових типів ШВ, а саме, ВАБ-49, ВАБ-206, GERAPID.

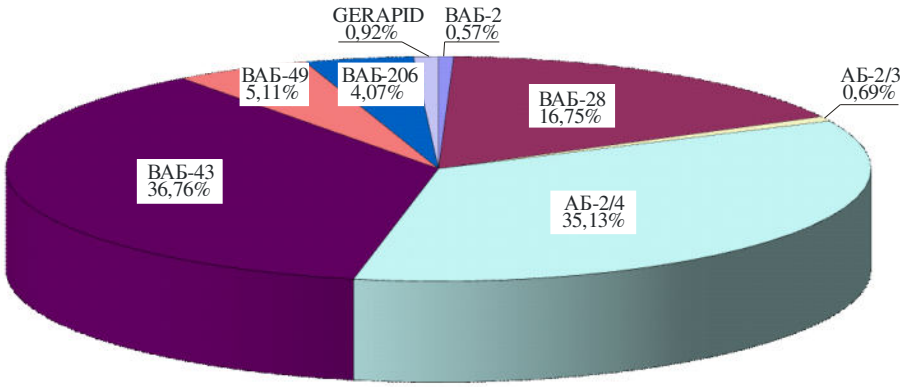


а) ДП «Придніпровська залізниця»

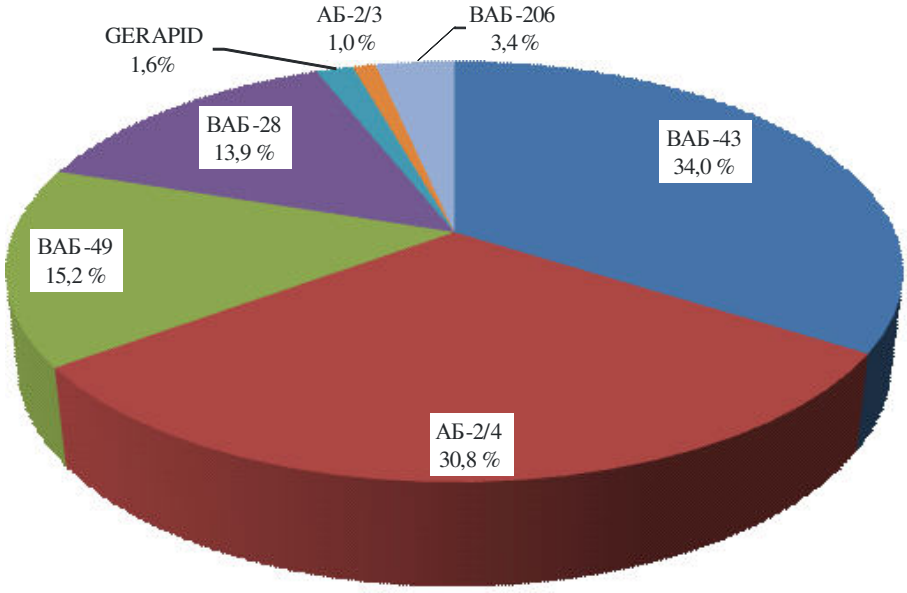


б) ДП «Донецька залізниця»

Рисунок 1.2 – Відносна кількість ШВ за їх типами



а) ДП «Придніпровська залізниця»



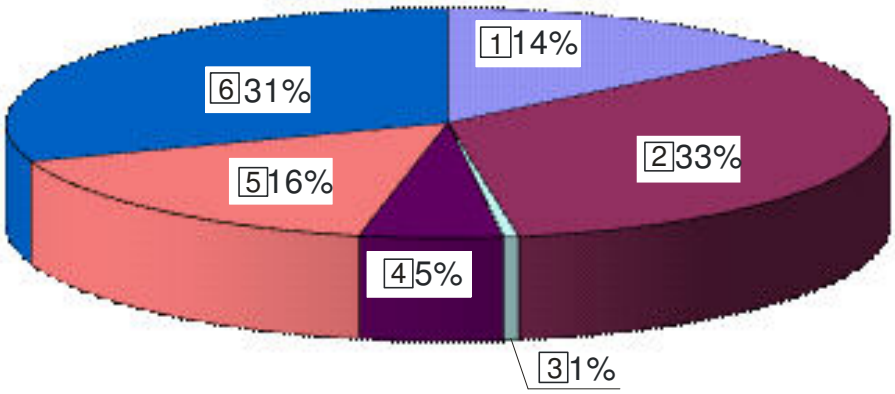
б) ДП «Донецька залізниця»

Рисунок 1.3 – Відносна кількість вимикань ШВ за їх типами

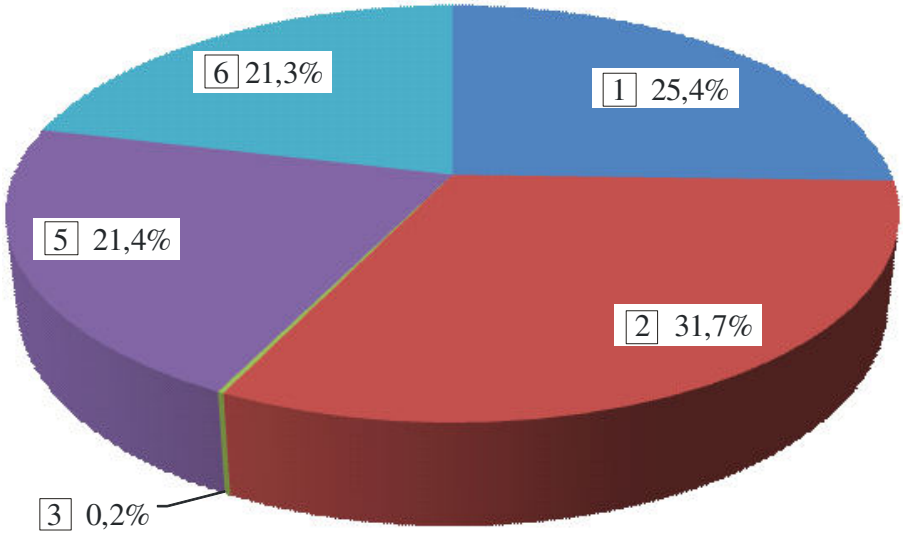
За рік на один фідер ТП постійного струму залізниць України приходиться: 200...350 вимикань на головних коліях й 300...400 - на привокзальних [3-8]. Трохи інші дані наведені в [72]: близько 120 всіх вимикань ШВ на фідер за рік. На рис. 1.4 наведено типові причини спрацьовування ШВ фідерів 3,3 кВ ТП на шести дистанціях електропостачання Придніпровської залізниці (ЕЧ1-Нікополь, ЕЧ2-Нижньодніпровськ-Вузол, ЕЧ3-Верхівцеве, ЕЧ4-Запоріжжя, ЕЧ6-Кривий-Ріг, ЕЧ7-Павлоград) за період 2000-2005 рр. [71].

Аналіз діаграми показує, що значну частку вимикань ШВ, 33 %, становлять короткі замикання СЕТ, які виникають, як на ЕРС так і в ТМ. На один ШВ підстанційного фідера, через КЗ в ТМ, приходиться 40...60 вимикань за

рік [73]. Близько 31 % вимикань з невизначених причин, в своїй більшості це є неселективні та нез'ясовані взагалі, крім того, вони включають також не зареєстровані короткі замикання; причинами такої кількості невизначених причин є недостатня кількість інформації про режими роботи системи.



а) ДП «Придніпровська залізниця»



б) ДП «Донецька залізниця»

Рисунок 1.4 – Частки основних причин вимикань ШВ тягових підстанцій: 1-перенавантаження; 2-короткі замикання в СЕТ; 3-земляний захист; 4-хибне спрацювання; 5-гроза; 6- причини невизначені (в тому числі короткі замикання)

Із динаміки зміни причин вимикань ШВ (рис. 1.5) випливає, що середня загальнорічна кількість вимикань по кожній з причин мало в чому змінилася в кращу сторону, а то й погіршилася. Так, наприклад, помітне зростання кількості вимикань ШВ з причин перевантаження ТМ та

пошкодження ЕРС. Причинами цього, як зазначалося вище, є необґрунтовано занижені уставки та неузгодженість роботи систем захисту ЕРС і ТП.

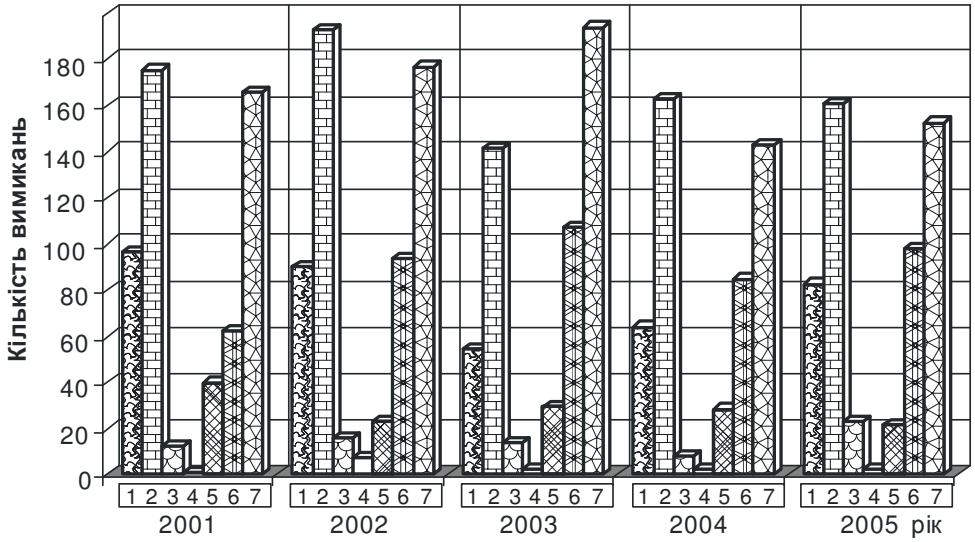


Рисунок 1.5 – Динаміка зміни причин вимикань ШВ за 2001-2005 рр.

Про незначну зміну середньої кількості вимикань ШВ також свідчить щорічний графік зміни цієї величини (рис. 1.6). У порівнянні з минулими 2000-2003 рр. середня кількість зменшилась лише у межах 8…10 вимикань за рік, до того ж ця зміна не є стабільною, оскільки у 2005 р. знову спостерігається зростання кількості спрацьовувань ШВ.

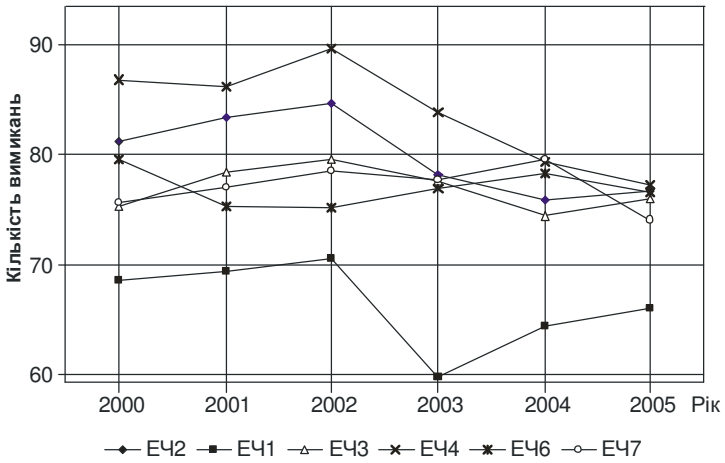


Рисунок 1.6 – Середньорічна кількість вимикань ШВ за 2000-2005 рр.

Згідно таблиці 1.2 на Придніпровській залізницях середня кількість вимикань фідерних ШВ коливається у межах 41,7…72,7, а на Донецькій (таблиця 1.3) 18,8…47,3.

Таблиця 1.2

Результати експлуатації швидкодіючих фідерних автоматів по ДП «Придніпровська залізниця» за період 2009-2010 рр.

ЕЧ	КІЛЬКІСТЬ		ТИП ШВ								Сума всіх ШВ по ЕЧ	
			ВАБ-2	ВАБ-28	АБ-2/3	АБ-2/4	ВАБ-43	ВАБ-49	ВАБ-206	GERAPID	Кількість вимикань по ЕЧ	Кількість вимикань на 1 БВ
ЕЧ-1 Нікополь	Кількість ШВ		0	18	0	13	11	5	0	0	47	
	Кількість вимикань	2009	0	651	0	471	383	456	0	0	1961	41,7
		2010	0	923	0	661	651	578	0	0	2813	59,9
ЕЧ-2 Н-Д вузол	Кількість ШВ		0	19	0	18	52	12	7	4	112	
	Кількість вимикань	2009	0	1563	0	1497	3361	339	993	386	8139	72,7
		2010	0	985	0	712	3079	116	987	127	6006	53,6
ЕЧ-3 Верхівцеве	Кількість ШВ		3	20	3	41	36	5	6	0	114	
	Кількість вимикань	2009	237	608	266	2019	2251	297	705	0	6383	56,0
		2010	822	599	279	1973	2757	320	509	0	7259	63,7
ЕЧ-4 Запоріжжя	Кількість ШВ		0	28	0	58	27	9	0	0	122	
	Кількість вимикань	2009	0	650	0	2600	2245	481	0	0	5976	49,0
		2010	0	617	0	2496	2857	890	0	0	6860	56,2
ЕЧ-5 Сімферопіль	Кількість ШВ		0	26	0	110	26	6	0	0	168	
	Кількість вимикань	2009	0	962	0	5457	2094	215	0	0	8728	52,0
		2010	0	907	0	4549	2117	273	0	0	7846	46,7
ЕЧ-6 Кривий-Ріг	Кількість ШВ		0	40	1	44	34	2	0	0	121	
	Кількість вимикань	2009	0	1622	22	1645	2961	141	0	0	6391	52,8
		2010	0	1876	37	1824	3650	151	0	0	7538	62,3
ЕЧ-7 Павлоград	Кількість ШВ		0	16	0	24	29	8	0	0	77	
	Кількість вимикань	2009	0	938	0	974	2049	205	0	0	4166	54,1
		2010	0	1088	0	919	2144	200	0	0	4351	56,5
Служба «Е»	Кількість ШВ		3	167	4	308	215	47	13	4	761	
	Частка ШВ, %		0,4	21,9	0,5	40,5	28,3	6,2	1,7	0,5		
	Кількість вимикань	2009	237	6994	288	14663	15344	2134	1698	386	41744	54,9
		2010	822	6995	316	13134	17255	2528	1496	127	42673	56,1
	Кільк вим на 1 ШВ	2009	79	41,9	72	47,6	71,4	45,4	130,6	96,5		
		2010	274	41,9	79	42,6	80,3	53,8	115,1	31,8		

Таблиця 1.3

Результати експлуатації швидкодіючих фідерних автоматів по ДП «Донецька залізниця» за період 2010 рр.

ЕЧ	КІЛЬКІСТЬ	ТИП ШВ							Сума всіх ШВ по ЕЧ	
		ВАБ-28	АБ-2/3	АБ-2/4	ВАБ-43	ВАБ-49	ВАБ-206	GERAPID	Кількість вимикань по ЕЧ	Кількість вимикань на 1 БВ
ЕЧ-1 Красний Лиман	Кількість ШВ	27	0	65	19	10	0	0	121	
	Кількість вимикань	649	0	757	704	529	0	0	2639	21,8
ЕЧ-2 Волноваха	Кількість ШВ	11	0	44	13	7	0	4	79	
	Кількість вимикань	234	0	272	548	271	0	163	1488	18,8
ЕЧ-4 Луганск	Кількість ШВ	10	0	10	0	2	0	10	32	
	Кількість вимикань	78	0	640	0	163	0	131	1012	31,6
ЕЧ-5 Дебальцево	Кількість ШВ	27	0	22	34	4	0	0	87	
	Кількість вимикань	829	0	715	734	205	0	0	2483	28,5
ЕЧ-6 Красноармійськ	Кількість ШВ	17	4	32	19	13	0	0	85	
	Кількість вимикань	274		176	820	667	0	0	1937	22,8
ЕЧ-7 Ілловайськ	Кількість ШВ	7	0	44	32	2	0	0	85	
	Кількість вимикань	391	0	2055	1496	81	0	0	4023	47,3
ЕЧ-8 Славянськ	Кількість ШВ	13	17	45	26	5	6	0	112	
	Кількість вимикань	103	183	958	1092	221	418	0	2975	26,6
ЕЧ-9 Ясинувата	Кількість ШВ	19	0	11	13	6	2	0	51	
	Кількість вимикань	0	0	100	867	661	208	0	1836	36
Служба «Е»	Кількість ШВ	131	21	273	156	49	8	14	652	
	Частка ШВ, %	20,1	3,2	41,9	23,9	7,5	1,2	2,1	100	
	Кількість вимикань	2558	183	5673	6261	2798	626	294	18393	28,2
	Кільк вим на 1 ШВ	19,5	8,7	20,8	40,1	57,1	78,3	21,0		

Слід також зазначити, що на протязі року інтенсивність вимикань кожного ШВ змінюється. Як показують графіки помісячної зміни кількості вимикань ШВ (рис. 1.7) на прикладі ТП ЕЧЕ-17 Іларіонове (дистанція електропостачання ЕЧ2, Нижньодніпровськ-Вузол), середня кількість вимикань змінюється кожного місяця. Треба виділити максимуми кількості вимикань, які припадають на 5-ий, 7-ий та 8-ий місяці, що можна пояснити великою кількістю гроз (грозовий період).

Виконаний аналіз спрацьовувань свідчить лише про те, що обладнання систем фідерного захисту сучасних ТП, яке до того ж є електромеханічним, застаріло як морально, так і фізично. Існуючі високовольтні швидкодіючі апарати типів АБ-2/4, ВАБ-28, ВАБ-43, ВАБ-49, які широко використовуються підрозділами дистанції електропостачання, не задовольняють вимоги якості та надійності роботи. Враховуючи це, Укрзалізницею вже з 2009 р планується заміна ШВ АБ 2/4 на вимикачі нових типів [3-8, 74].

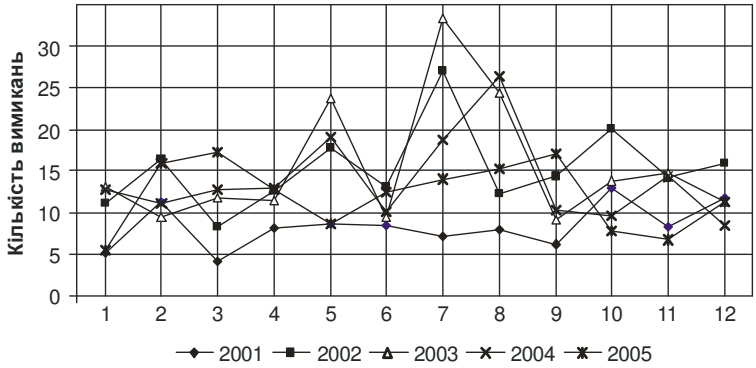


Рисунок 1.7 – Графік помісячних змін кількості вимикань ШВ на тяговій підстанції ЕЧЕ-17 Іларіонове

1.4 Методи аналізу перехідних аварійних процесів в системі «тягова підстанція – тягова мережа – електрорухомий склад»

Дослідження перехідних режимів у нелінійній динамічній системі «ТП-ТМ-ЕРС» можливо: експериментальним шляхом у реальних умовах експлуатації; фізичним моделюванням на лабораторних стендах; методами математичного моделювання.

Вивчення перехідних процесів в умовах реальної експлуатації вимагає значних матеріальних витрат, нерідко приводячи до виходу з ладу елементів системи, якщо процес аварійний. Дуже часто експериментальні дослідження вимагають додаткових умов і тривалого часу на випробування. Проведенню експериментів передує великий об'єм підготовчих робіт у питаннях: юридичного оформлення; підготовки обладнання; організації проведення тощо. Головною перевагою такого методу вивчення фізичних процесів є їх повна відповідність реальним явищам. Тому на сьогодні результати натурного експерименту в наукових дослідженнях є головним доказом правильності теоретичного обґрунтування, підтвердження адекватності застосованих моделей системи.

Яскравим прикладом наукового дослідження, що ґрунтується на великій кількості експериментів, слід відмітити роботу [75].

Лабораторні експерименти передбачають дослідження об'єктів і явищ на фізичних моделях, коли досліджуваний процес відтворюють зі збереженням його фізичної природи або використовують інше фізичне явище, аналогічне досліджуваному [76, 77]. При цьому фізичні моделі припускають, як правило, реальне втілення тих фізичних властивостей оригіналу, які є істотними у вивченні певних явищ. У зв'язку із цим фізичне моделювання називають також макетуванням [76].

В якості прикладу застосування лабораторних експериментів слід привести роботи [78-83]. Коротко розглянемо їх зміст.

Робота [78] присвячена фізичному моделюванню електрифікованих ділянок змінного струму. Автори створеної установки описують деякі особливості виконання основних блоків, масштаби моделі, компонування обладнання. У Всесоюзному заочному інституті інженерів транспорту була розроблена потужна установка [79-82], модель якої відтворює наступні пристрої: лінію зовнішнього електропостачання; тягові підстанції; швидкодіючі вимикачі ТП і ПСК; тягову мережу; електровоз. Модель відтворювала ділянку електропостачання довжиною 100 км, п'ять ТП і чотири ПСК і здатна вирішувати задачі, пов'язані з проектуванням та експлуатацією систем елек-

тропостачання змінного струму. Конструктивно модель виконана у вигляді стенду з мнемосхемою, всі елементи, вузли і прилади взаємозамінні. При розрахунках задач на моделюючих установках, розрахунки виконуються практично миттєво, аналіз нетипових схем не викликає якихось труднощів, спрощується врахування характеристик пристроїв електропостачання. Проте ці установки не дозволяють досліджувати зміну навантаження у часі і визначати параметри, які залежать від характеру протікання цього процесу. Крім цього, взагалі лабораторні стендові випробування також обмежені як матеріальними витратами, так і об'ємом і вірогідністю отриманої інформації.

Враховуючи вищезазначене, в роботах [83, 84] описані подібні моделюючі системи, що поєднують переваги цифрової техніки і фізичних моделей. Таке поєднання може дати гібридний пристрій, що складається з аналогової і цифрової частин. Аналогова частина представляє фізичну модель СЕТ. В якості елемента тягового навантаження (блок потягу) може слугувати цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Однак слід зазначити, що розглядуваний пристрій за своєю структурою настільки складний, що його виготовлення не було завершене.

Найбільш доцільним методом дослідження перехідних експлуатаційних та аварійних електромагнітних процесів у СЕТ є метод математичного моделювання на ЕОМ. Цей метод поєднує у собі переваги як теорії, так і експерименту використання математичного моделювання дозволяє не тільки спростити і скоротити наступні натурні випробування, але й розширює можливості досліджень тому, що допускає широку варіацію значень параметрів елементів силових електричних кіл системи тяги без значних матеріальних витрат. Останнім часом з'явилися публікації в спеціалізованих іноземних журналах [85-91], які свідчать про те, що цей напрямок у найближчі роки буде пріоритетним для розвитку систем захисту ТМ.

Ідея моделювання процесів у тяговому електропостачанні і перші, хоча й прості, роботи в цій області належать російському вченому проф. Марквардту Г.Г. [92, 93]. В своїх роботах він разом із своїми учнями займався визначенням статистичних показників розподілу фідерних напруг і струмів

[94-102]. Метою цих та інших його робіт є визначення закону розподілення електричних величин СТЕП і відповідно створення графіку навантаження системи. Необхідність виконання таких статистичних досліджень пов'язана з випадковим впливом багатьох факторів на зміну тягового навантаження. Завершальною в розробці цього питання стала робота [101].

Найбільш фундаментально і здавна досліджено режим КЗ в ТМ в роботах [12, 15, 16-18]. Розглянемо основні і визначальні положення викладені в цих і деяких інших роботах, присвячених математичному моделюванню СЕТ.

Робота [12] є однією з найперших робіт де було зазначено, що загальноприйнята залежність струму КЗ у часі $i_{\text{кз}}(t) = I_{\text{поч}}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{с}}}}\right)$ є наближеною. Внаслідок впливу провідності землі, поверхневого ефекту в рейках опір і індуктивність кола КЗ не будуть залишатися сталими на протязі перехідного процесу (далі - ППр) і струм буде значно відрізнятися від експоненціальної форми. У випадку коли під час КЗ на пошкодженій лінії знаходиться ЕРС, що споживає енергію, крива зміни струму до усталеного значення, ще більше буде відхилятись від експоненти, оскільки на розглядуваний ППр в лінії будуть впливати процеси в ТЕД ЕРС.

Спроба оцінити вперше вплив генеруючого ЕРС на перебіг КЗ в ТМ наведена в [15]. Для цього автор представив елементарну схему заміщення силового кола електровоза постійного струму. Схема складалася з однієї чотириполюсної тягової машини увімкненої безпосередньо до ТМ. Автор зобразив на схемі контур шунтуючої вітки і навіть контур вихрових струмів. Проте, автор зупинив свої роздуми лише на схемі заміщення без розкриття самої моделі, а саме головне, не врахував параметри СТЕП.

Автори роботи [16, 28, 103] велику увагу приділили аналізу ППр, які виникають в СЕТ та її елементах при атмосферних, комутаційних перенапругах, а також коротких замиканнях. Встановлено, що при вимиканні фідерним вимикачем струмів перевантаження і КЗ величина перенапруг на шинах ТП досягає 8-12 кВ. Проте на сьогодні, ці роботи мають один значний недолік, а

саме: більшість розглядуваних елементів застаріли і на сучасних залізницях не використовуються, наприклад, ртутні перетворювачі у якості випрямляча, ШВ типу БВП-1 тощо.

Головною відзнакою роботи [16] є те, що автори докладно описали електромагнітні процеси в дугогасній камері ШВ. Запропоновано описувати вплив електричної дуги рівнянням зростання напруги у часі $u_{\text{дг}}(t) = b \cdot t$, де параметр b описує інтенсивність зростання напруги і визначається фізико-конструктивним параметрами дугогасної камери. Представлена схема заміщення подібна до схеми в роботі [15] і навіть представлено математичну модель у формі рівнянь електромагнітного стану, але також для одного ТЕД і відсутній їх розв'язок та аналіз.

Система диференціальних рівнянь (зауважимо, достатньо складна), що описує перехідні електромагнітні процеси в режимі КЗ при односторонньому живленні ТМ, представлена в [17]. Модель призначена для оцінки впливу елементів силового кола ЕРС на дію імпульсного захисту фідерів ТП, запропонованого автором. Проте сам автор наголошує на неможливості розв'язання цієї системи у зв'язку з її надзвичайною складністю. Автором було зазначено, що електричний локомотив, який працює в генераторному режимі на точку КЗ не впливає на кидок фідерного струму ТП.

Великий внесок у питання аналізу електромагнітних процесів в СТЕП вніс Косарєв Б.І. Розпочавши свою роботу з аналізу аварійних ППр в роботі [29], він вдало її продовжив у [18]. На початку своєї роботи [29], автор створив схему заміщення СТЕП, яка враховувала рейку як масивний феромагнітний елемент. Схема заміщення сталевої рейки була представлена у вигляді лінійного двополюсника, який складається з індуктивного і резистивного елементів. Тобто, автор на кінець своїх теоретичних обґрунтувань дійшов висновку про можливість лінеаризувати фізичні властивості рейки, як елементу СТЕП. Однак розрахунки з певними припущеннями були виконані операторним методом, тобто для лінійних кіл.

У продовження своєї роботи Косарєв Б.І. в роботі [18] запропонував новий метод розрахунку струморозподілення по фідерам ТП при двосторонньому живленні і довільній схемі секціонування. На основі математичного моделювання були описані закони розподілення потенціалу у неоднорідній землі. Встановлено, що максимальний потенціал рейок при КЗ може досягати декількох кіловольт. Основним недоліком робіт автора є відсутність врахування ЕРС та лінійність розв'язуваних задач.

Автор роботи [104] скористався надбаннями попереднього дослідника для створення своєї математичної моделі, яка також призначена для оцінки перехідних режимів в СТЕП, однак ця модель відрізняється від попередніх врахуванням фільтр-пристрою ТП.

В роботі [105] автором досліджено перехідні процеси в СЕТ у випадку регулювання напруги на затискачах ТП. Були проаналізовані наступні режими перемикання: при відсутності ЕРС на ділянці; при тяговому режимі ЕРС; при рекуперативному режимі ЕРС; неодночасне спрацьовування перемикаючого обладнання. Розрахунки виконані операторним методом,оскільки розв'язувалась лише лінійна задача.

Цікавим є метод математичного моделювання перехідних процесів в режимі КЗ, запропонований автором роботи [106], в якій ППр в колі постійного струму був приведений до деякого стаціонарного періодичного процесу, кожен період якого рівний досліджуваного процесу. Проте, не вдаючись у подробиці, одразу зазначимо, що автор відмовився від цього складного методу на користь фізичного моделювання.

Визначенню параметрів схеми заміщення ТМ в перехідному режимі присвячені роботи [107, 108]. Зокрема, в [107] встановлено, що схема заміщення ТМ постійного струму в перехідних режимах з достатньою для практичних розрахунків точністю може бути представлена у вигляді двох паралельно з'єднаних двополюсників RL. Параметри двополюсників легко визначаються за частотною характеристикою ТМ.

Крім того, на основі амплітудно-частотних характеристик ТМ в роботі [109], були виконані спроби оцінити вплив ППр на суміжні лінії зв'язку.

Встановлено, що значення амплітудно-частотної характеристики змінюються в розрахунковому діапазоні частот, більш ніж на три порядки і збільшуються із збільшенням довжини фідерної зони.

В роботі [110] розглянуто метод математичного моделювання стосовно до запропонованої автором системи розподіленого живлення КМ постійного струму напругою 3,3 кВ за допомогою глибокого уведення на міжпідстанційну зону електроенергії від потужних підстанцій на підвищеній напрузі 35 кВ. В роботі тягове навантаження представлене у вигляді ідеального джерела струму. На прикладі цієї роботи можна побачити, що методи математичного моделювання можна застосовувати не тільки для аналізу існуючих систем, але і для систем що проектуються.

Математична модель ТМ постійного струму при двосторонньому її живлені, яка відрізняється від попередніх представленням СТЕП у вигляді лінії з розподіленими параметрами розроблена в [111]. Це зрозуміло, адже автор розглядає взаємний вплив ТМ і високовольтної лінії змінного струму, що розташована поруч. Електровоз в моделі зображено як ідеальне джерело струму.

Робота [33] є найбільш наближеною до розглядуваної проблеми, по конструкції та особливостям роботи сучасної СЕТ. В ній досліджено ППр в режимах пуску ЕРС, а також різноманітні режими КЗ. Розроблено схеми заміщення СЕТ для різних режимів з урахуванням багатьох факторів, які можуть вплинути на її роботу системи. Проте автор не представив жодної узагальнюючої системи рівнянь електромагнітного стану і методи їх розв'язання. В більшій ступені автор розв'язує поставлені задачі спираючись на досліди.

В [73] досліджено вплив трьох перехідних режимів, що виникають у ТМ без врахування ЕРС, лише на елементи можливого (розробленого авторами) силового активного енергетичного фільтра ТП постійного струму. Коротко вивчено режими: вмикання напруги на шині ТП; КЗ в ТМ; вимикання КЗ фідерним вимикачем. Встановлено, що найбільш небезпечним є режим, при якому струм, що протікає через елементи фільтра, досягає 1500 А

при тривалості 20...30 мс. Запропоновано структурну схему захисту елементів інвертора фільтра від аварійних режимів. Це виконано без врахування ЕРС.

Автори роботи [112] побудували математичну модель СЕТ постійного струм і визначали реакцію системи на зовнішній, також керуючий вплив. ЕРС в розглядуваних моделях представлено у вигляді ідеального джерела струму.

В останні роки набуває більшого розвитку метод комп'ютерного моделювання електромагнітних та електроенергетичних процесів в системі тягового електропостачання постійного струму [90, 113-116] за допомогою візульно-орієнтованого програмування. Однак недоліками цих робіт є, по-перше, власне недоліки самого методу моделювання, і, по-друге, не врахуванням процесів у такій нелінійній динамічній підсистемі як електрорухомий склад.

В роботах [117, 118] застосовуючи апарат візуально-орієнтованого програмування автори створили математичну модель ТМ, яка складається з контактного проводу і рейок. Схема заміщення рейки передбачає, що вона є феромагнітним циліндром з врахуванням поверхневого ефекту та гістерезису. Це дозволило авторам більш точно проаналізувати показники якості електроенергії в СТЕП змінного струму.

Питання впливу СТЕП на роботу рейкових кіл для залізниць України докладно досліджено в роботах [119-121]. Проте, як відомо цей вплив особливо актуальний для ТМ змінного струму, тому більш докладний аналіз його робіт робити не будемо.

В роботі [122] експериментальним та теоретичним шляхом за допомогою математичної моделі автори аналізують вплив ТМ постійного струму на роботу рейкових кіл. Математична модель побудована на основі системи телеграфних рівнянь для ділянки СТЕП. Встановлено, що в стаціонарному режимі роботи СТЕП в рейках наводиться гармоніка 50 Гц амплітудою 1,8 А. Таке значення завади є критичним оскільки амплітуда кодового сигналу складає не більше 2 А.

Невід'ємною складовою СЕТ є поїзд, що рухається по фідерній зоні, постійно змінюючи своє положення у просторі. В якості тягової одиниці потягу на залізницях України електрифікованих постійним струмом, використовують електричні локомотиви серій ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11, ДЕ1, і з недавніх пір 2ЕЛ4. Всі вони є восьмивісними і побудовані за ідентичною компоновкою силової схеми. Тому автор вбачає необхідним проаналізувати роботи присвячені аналізу перехідних режимів в ЕРС, оскільки, як було видно вище, жодної роботи, яка б в повній мірі розкривала процеси в СЕТ, включно з ЕРС, немає.

Результати впливу випадкового коливання напруги в КМ на роботу ТЕД електричного локомотиву подано в [123]. Запропоновано метод розрахунку впливу рівня напруги в ТМ на роботу ЕРС. Показано, що у випадку нехтування коливань напруги при побудові кривих руху поїзда похибка у визначенні перехідного часу ходу складає близько 10 %, а у визначенні витрати енергії похибка становить декількох десятків відсотків.

В [124] виконано математичне моделювання на аналогових ЕОМ перехідних процесів у силових колах електровозів ЧС 2 в експлуатаційних режимах перемикання групових апаратів.

В роботі [125] автор представив математичну модель ТЕД постійного струму, визначив основні залежності та параметри, які впливають на перебіг електромагнітних процесів.

В питанні математичного моделювання СЕТ особливо слід відзначити роботу [126], в якій приведено результати дослідження шляхом математичного моделювання динаміки електровозів. Велику увагу приділено сумісним електромеханічним процесам для різних режимів руху потягу. Схема заміщення ТЕД включає в себе проти-е.р.с. а також активний опір і індуктивність внутрішніх обмоток.

Авторами роботи [127] зроблена спроба аналізу спрощеної лінійної математичної моделі ТЕД постійного струму типу ЕД-141 У1 електровозу серії ДЕ 1. Чисельні чи графічні результати розрахунків відсутні.

Автор робіт [128, 129] пропонує підвищувати тягові властивості електричних машин електровозів постійного струму шляхом застосування змішаного (послідовно-незалежного) збудження. Для цього дослідник розробив математичну модель силового кола ЕРС з такими ТЕД. Розрахунки показали можливість реалізації сили тяги збільшеної на 15…17 % і покращення протибуксовочних властивостей.

Однією з найбільших проблем у реалізації математичного моделювання є підготовка моделі об'єкта. Цей найбільш важкий перший етап математичного моделювання ефективно вирішуються за допомогою візуально-орієнтованого програмування.

Прикладом наукових робіт із застосуванням математичних моделей СЕТ та її елементів створених у середовищі Simulink є [75, 90, 130].

Зауважимо, що в зазначених вище роботах з досліджень перехідних режимів аналізувався їх вплив або на роботу систем захисту, або на надійність пристроїв систем тяги і зовсім поза увагою залишилось питання енергетичних показників, якості електроенергії, електромагнітної сумісності, безпеки обслуговуючого персоналу й таке інше. Крім того, більшість з них «давні» і, або виконані не на залізницях України, до того ж, як відомо, в останні 20 років, після отримання Україною незалежності, суттєво змінився вантажопотік, з'явились нові типи ЕРС, електрообладнання захисту (ВАБ на ТП) тощо. Тому ці дослідження можуть слугувати лише в орієнтовно методичному плані й ні в якому разі їх результати не можуть бути практично використані для залізниць України.

Нажаль, авторам даної роботи невідомі вітчизняні публікації по даній проблемі щодо електрифікованих залізниць постійного струму України. Більш активно на Україні моделюються процеси в СЕТ змінного струму: це як імітаційне [131], так і математичне [132, 133] моделювання.

Для дослідження певних процесів в системі електричної тяги в сучасних наукових дослідженнях все більш широкого розповсюдження набуває спеціалізоване вузькопрофільоване програмне забезпечення. У зв'язку з цим використовують математичні моделі, що являють собою спеціальні

комп'ютерні програми. На залізницях Німеччини (DBAG) вже на протязі декількох років проводяться роботи в рамках впровадження такої програми. Програма моделювання PrOSA [134], яка використовується як інструмент під час проектування нових, а також для оптимізації існуючих пристроїв і їх компонентів, розроблена інститутом HNI при університеті Патерборна. Зрозуміло, що головним недоліком такого програмного забезпечення є надзвичайно висока вартість.

В [135] приведена спеціалізована обчислювальна програма E-Trac, що призначена для математичного моделювання, за допомогою якого можна отримати данні з енергоспоживання для потягів будь-якої стандартної конфігурації та різних умов їх використання. Програма враховує витрати енергії на такі основні області: розподільчі пристрої, тяга, допоміжні кола, система забезпечення комфорту.

Для уточненого розрахунку потенціалів рейки і струмів розтікання на приміських лініях Німеччини, електрифікованих на постійному струмі, використовується спеціальна система моделювання elbas-SINANET [136]. Вона містить всі елементи тракту зворотного струму, навіть такі як арматуру тунелів, а також кола відгалуження струму і його перерозподілення між цими елементами.

Насамкінець все ж треба зауважити, що, не дивлячись на важливість будь-якого методу моделювання, експериментальні дослідження електромагнітних процесів у системі електротяги є головною основою розв'язання поставленої наукової проблеми.

1.5 Висновки до розділу 1.

1. В реальних умовах експлуатації системи електричної тяги виникає велика кількість аварійних режимів, про що свідчить відповідно велика кількість вимикань швидкодіючих вимикачів на тягових підстанціях: 200…350 вимикань на рік на один фідер на головних коліях і 300…400 на станційних (при 6…7 фідерах на тягових підстанціях). Основними причинами вимикань швидкодіючих вимикачів є: несправність електрорухомого складу; перева-

таження тягової мережі; коротке замикання; хибне спрацювання і 31 % – причини невизначені.

2. З електроенергетичної точки зору найбільш небезпечними є режими короткого замикання і режим «відрив-торкання» струмоприймача. Під час їх протікання спостерігаються кидки струмів, максимальні значення яких, за певних умов, значно перевищують робочі струми. Особливо це стосується режиму короткого замикання, який до того ж найбільш поширений, частий і виникає в різних елементах і точках системи електротяги.

3. Існуючі на сьогодні системи захисту побудовані на принципі порівняння основних параметрів (максимальне значення, швидкість зміни, приріст) перехідних фідерних струмів були розроблені в 50…60-х роках минулого століття. Тому фідерний захист реалізований і побудований на основі швидкодіючих вимикачів вже не здатний в повній мірі забезпечувати основні вимоги по швидкодії, надійності, селективності тощо. Ці вимикачі, що реалізують принципи релейно-струмового захисту, застаріли як технічно, так і морально і не задовольняють сучасним вимогам роботи системи електричної тяги.

4. Підвищення ефективності роботи систем захисту фідерів 3,3 кВ на сучасному етапі розвитку пристроїв фідерної автоматики можна досягти лише за умов: а) пошуку нових принципів, а також поєднання роботи систем захисту основаних на декількох ознаках; б) використання мікропроцесорних систем.

5. Існуючі експериментальні дослідження аварійних режимів роботи системи електричної тяги постійного струму були проведені в 50…70-х роках минулого століття для електрифікованих залізниць колишнього СРСР. Автору невідомі подібні роботи на сучасних електрифікованих залізницях України.

6. Серед існуючих методів теоретичних досліджень електромагнітних процесів використання математичного моделювання дозволяє з найменшими економічними і технічними втратами проаналізувати перебіг нестаціонарних

режимів в системі електричної тяги, як в процесі експлуатації, так і на стадії її проектування.

7. В існуючих роботах з математичного моделювання електромагнітного стану системи електричної тяги в аварійних режимах автори нехтують багатьма реально діючими факторами, що робить отримані результати дуже наближеними, а то й зовсім такими, що не відповідають дійсності, зокрема:

- поверхнево і неточно (а то й зовсім не враховано) досліджено взаємний вплив електрорухомого складу і тягового електропостачання. Електровоз в системі електричної тяги враховано у вигляді ідеального джерела струму або, у кращому разі, схема його заміщення складається з проти-е.р.с., опору та індуктивністю обмоток електричних двигунів;
- роботи, в яких схеми заміщення силового кола електровозу враховують вихрові струми електричних машин, обмежені вже на етапі розв'язання. В таких роботах результати моделювання отримані, як правило, фізичним моделюванням, або взагалі відсутні;
- відсутній аналіз впливу постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання, а також не досліджені процеси при наявності на фідерній зоні 2-х і більше одиниць тягового рухомого навантаження, а також двоколійності міжпідстанційної зони.

8. Автори розглянутих робіт не торкаються аналізу енергетичних показників системи при перехідних процесах, що відбуваються в місці виникнення аварійної ситуації і в системі електричної тяги в цілому.

9. Відсутні дослідження такого важливого режиму в системі електричної тяги, яким є генераторний режим, обумовлюючий таке негативне явище як перепал контактного проводу.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ТА ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ І ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для отримання необхідних даних і підтвердження адекватності розроблених математичних моделей, а також інших теоретичних результатів в даній роботі були проведені експериментальні дослідження таких натурних режимів роботи системи електричної тяги: КЗ тягової мережі при односторонньому її живлені від одного фідера; КЗ тягової мережі при двосторонньому живлені фідерної зони; проходження тягового електрорухомого складу по міжпідстанційній зоні. Останній експеримент дозволив зафіксувати такі експлуатаційні та аварійні режими як: в'їзд рухомої одиниці на міжпідстанційну зону, перехід з позиції на позицію під час руху електровоза; втрату та відновлення напруги живлення на струмоприймачі ЕРС. Всі експерименти проводили на електрифікованих ділянках Придніпровської залізниці з залученням обслуговуючого персоналу, оперативно-виробничих працівників та співробітників дорожньої електротехнічної лабораторії (ДЕЛ). Роботи було проведено за затвердженими програмами у відповідності до вимог, обов'язкових для працівників залізничного транспорту, що здійснюють експлуатацію електроустановок пристроїв електропостачання залізниць України [137-145].

2.1 Об'єкти та умови проведення експериментальних досліджень режиму короткого замикання в тяговій мережі

Об'єктом натурних досліджень були складові СЕТ постійного струму дистанцій електропостачання ЕЧ-2 (Нижньодніпровськ-Вузол) і ЕЧ-3 (Верхівцеве), а саме: тягові підстанції ЕЧЕ-15 (Нижньодніпровськ-Вузол), ЕЧЕ-17 (Ілларіонове), ЕЧЕ-83 (Ігрень), ЕЧЕ-14 (Горяїнове), ЕЧЕ-82 (Воскобійня), ЕЧЕ-12 (Баглій), ЕЧЕ-41 (Платина); ділянки районів контактної мережі ЕЧК-

8 (Верхньодніпровськ) Воскобійня – Платина, ЕЧК-13 (Ілларіонове) Нижньодніпровськ-Вузол – Ілларіонове.

Експерименти проводили відповідно до розроблених разом із співробітниками ДЕЛ програм: «Программа проведения эксперимента по снятию временных зависимостей тока и напряжения в аварийных и эксплуатационных режимах работы системы тягового электроснабжения на фидерной зоне подстанций: Воскобойня - Плотина (ЕЧ3- Верховцево)» від «22» липня 2009 р.; «Программа проведения эксперимента по снятию временных зависимостей тока и напряжения в эксплуатационных режимах работы системы тягового электроснабжения на фидерной зоне подстанций Горяиново-Диёвка (ЕЧ3- Верховцево) в зимних условиях» від «10» березня 2011 р.; «Программа проведения замеров временных зависимостей тока и напряжения в контактной сети с быстродействующим автоматом ВАБ-206 тяговой подстанции Нижнеднепровск-Узел при режиме КЗ в системе тягового электроснабжения на межподстанционной зоне Илларионово - Нижнеднепровск-Узел 1 путь ЭЧ-2» від «18» липня 2011 р; «Программа проведения эксперимента по снятию временных зависимостей тока и напряжения в эксплуатационных режимах работы системы тягового электроснабжения на фидерной зоне подстанций Баглей-Воскобойня (ЕЧ3- Верховцево)» від «18» червня 2012 р. (додаток Г), узгоджених начальником та головним енергодиспетчером дистанції електропостачання та затверджених начальником служби електропостачання ДП «Придніпровська залізниця». Безпосередньо експерименту передували підготовчі роботи. Режим КЗ є надзвичайно небезпечним для такої потужної системи як СТЕП. Тому, перш за все, було проведено ряд організаційних заходів, основним з яких є забезпечення «вікна», періодом не менше години, під час яких можливий виїзд співробітників району контактної мережі ЕЧК на лінію для виконання штучного КЗ, а також у разі необхідності усунення пошкоджень на пристроях електропостачання та відновлення живлення.

Для правильного виконання експериментальних дослідів також проводили необхідну технічну підготовку. У разі виконання досліду КЗ при

односторонньому живлені необхідно вимкнути суміжну ТП, а також виключити можливість «підживлення» місця КЗ з іншої сторони від ТП, на якій встановлено вимірювальні пристрої. Крім того, на фідерній зоні були вимкнені всі ПСК, а також ППС для розірвання кола КЗ, утвореного тяговою мережею сусіднього шляху.

Слід зазначити про деякі особливості досліджень реакції ШВ типу ВАБ-206 при двосторонньому живлені, які були виконані на ТП Нижньодніпровськ Вузол (ЕЧЕ-15). Для дослідів було обрано фідерну чарунку Ф-3 у напрямку ТП Ігрень (ЕЧЕ-83) по першій колії. Довжина міжпідстанційної зони Нижньодніпровськ-Вузол - Ігрень склала лише 6,9 км., тому при розробці програми було прийнято рішення продовжити цю зону до ТП Іларіонове (ЕЧЕ-17), відстань до якої складає 18,1 км. При підготовці цього експерименту було вимкнуто на міжпідстанційній зоні всі ППС, а тягову підстанцію Ігрінь переведено в режим ПСК з максимальними уставками на фідерних автоматах (рис. 2.1). Крім того, оскільки була змінена схема живлення та секціонування ТМ, то для зменшення впливу непередбачених факторів оперативно-обслуговуючий персонал ЕЧЕ-15 і ЕЧЕ-17 зменшив уставки фідерних автоматів до мінімальних.

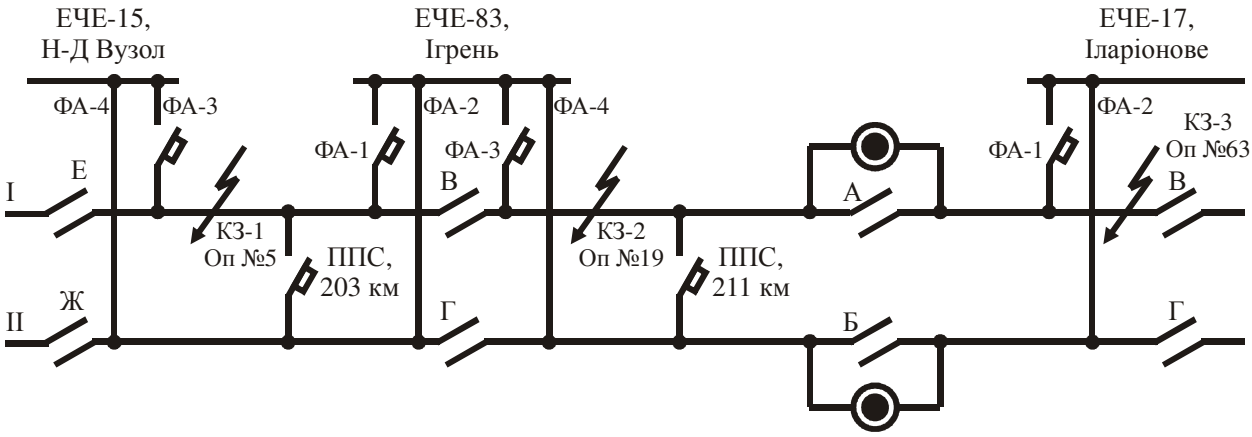


Рисунок 2.1 – Схема секціонування КМ при проведенні досліду КЗ на ділянці Нижньодніпровськ Вузол (ЕЧЕ-15) - Іларіонове (ЕЧЕ-17)

Як відомо, виконувати дослід штучного КЗ в ТМ можна двома шляхами: увімкненням на коротке замикання (попередньо завішується штанга на

лінії (рис. 2.2, а), а далі вмикається фідерний автомат); безпосередньо коротке замикання в тяговій мережі під напругою (рис. 2.2, б).

а) б)

Рисунок 2.2 – Фото виконання штучного КЗ за допомогою заземлюючої штанги: а) - завішування на опорі; б) - торкання до фіксатора під напругою

Дослід КЗ за першою методикою був проведений між тяговими підстанціями Воскобійня (ЕЧЕ-83) та Платина (ЕЧЕ-41). Аналізуючи отримані осцилограми, рис. 2.3, бачимо, що вони вкрай різняться з теоретичними викладками спеціалістів в області електропостачання залізниць [12, 15, 16]. Справа в тім, що, застосовуючи у фідерних чарунках однотипні послідовно з'єднані автомати, не можна уникнути їх асинхронної роботи. У разі застосування одного потужного автомату, наприклад ВАБ-206 чи UR 40-64 S "SECHERON", отримані результати також не відповідають дійсності. Враховуючи вищезазначене всі подальші експерименти з режиму КЗ виконано за другим методом.

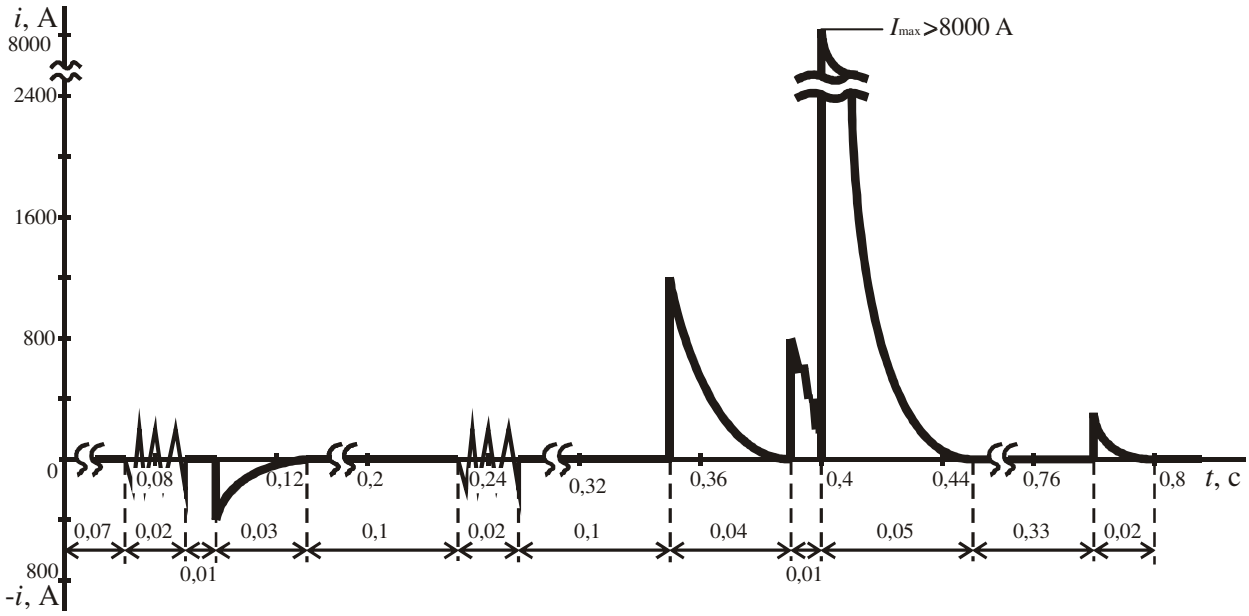


Рисунок 2.3 – Графік залежності струму фідера у часі при його вмиканні на ближнє коротке замикання

Коротке замикання на КМ утворювали шляхом короткочасного торкання вістрям гака переносної заземлюючої штанги, що попередньо приєднувалася до тягової рейки (рис. 2.4), основного фіксатора не ближче 1м від ізолятора. Тим самим була виключена можливість перепалу контактного проводу.

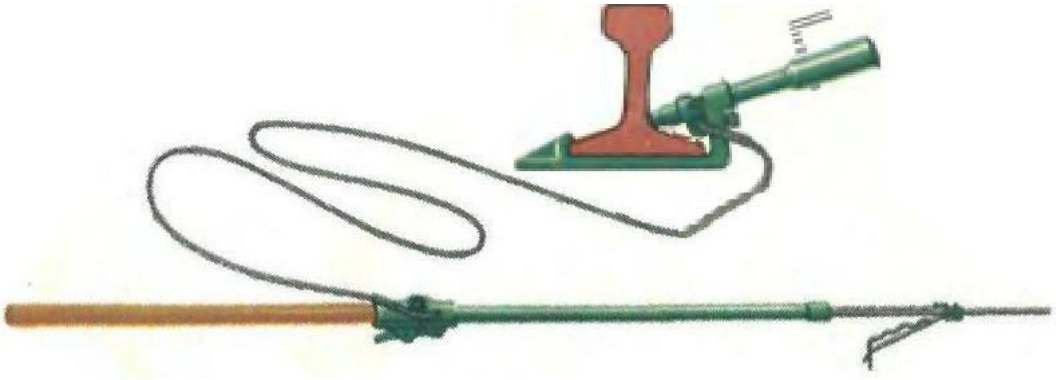


Рисунок 2.4 – Заземлююча штанга з вмиканням до рейки [146]

При завішуванні заземлюючих штанг електромонтерами контактної мережі дотримувалися усі вимоги правил техніки безпеки згідно [147].

Процес вмикання електровимірювального обладнання в фідерній чарунці ТП також проводили з обов’язковим дотриманням правил ТБ згідно

[148]. Особливу увагу під час підготовчих робіт було приділено перевірці опору ізоляції ізолюючого трансформатора, вона становила > 2000 МОм. Під час перевірки на пробивну напругу у лабораторії високих напруг було встановлено, що ізолюючий трансформатор витримує ~ 9 кВ.

2.2 Технічні засоби експериментальних досліджень перехідних електричних величин

Для вимірювання електричних величин в перехідних режимах роботи СЕП в роботі було застосовано цифрову запам'ятовуючу осцилографічну (ЦЗО) приставку АСК-3106 з персональним ЕОМ (ПЕОМ) серії ASUS (рис. 2.5).

Осцилографи АСК-3106 дозволяють з точністю 2% спостерігати форму сигналу, використовуючи два незалежних канали з розширенням 8 біт і чутливістю від 2 мВ/под до 10 В/под у смузі частот від 0 до 100 МГЦ із апаратним буфером розміром від 64 до 512 К вибірок по кожному каналу. Вхідний опір відповідає стандартним значенням, прийнятим для осцилографів; отже, можуть бути використані будь-які стандартні осцилографічні щупи. Програмним забезпеченням підтримуються щупи 1:1, 1:10 і 1:100. Режим відкритого й закритого входу (DC або AC) може бути обраний незалежно для кожного каналу. У режимі AC придушуються частоти нижче, ніж 1 Гц. Кожної із входів може бути заземлений без від'єднання щупів від вимірюваної системи. Вимірювання може синхронізуватися по каналу A, B або за сигналом на зовнішньому вході синхронізації. Для зв'язку з комп'ютером використовували інтерфейси USB 1.1.

Кожний канал має власний аналого-цифровий перетворювач (АЦП). В приладі АСК-3106 обидва канали здійснюють оцифрування одночасно, що дозволяє одночасно спостерігати процеси, що відбуваються. Для забезпечення роботи приладу в режимі самопису існує відповідна панель.

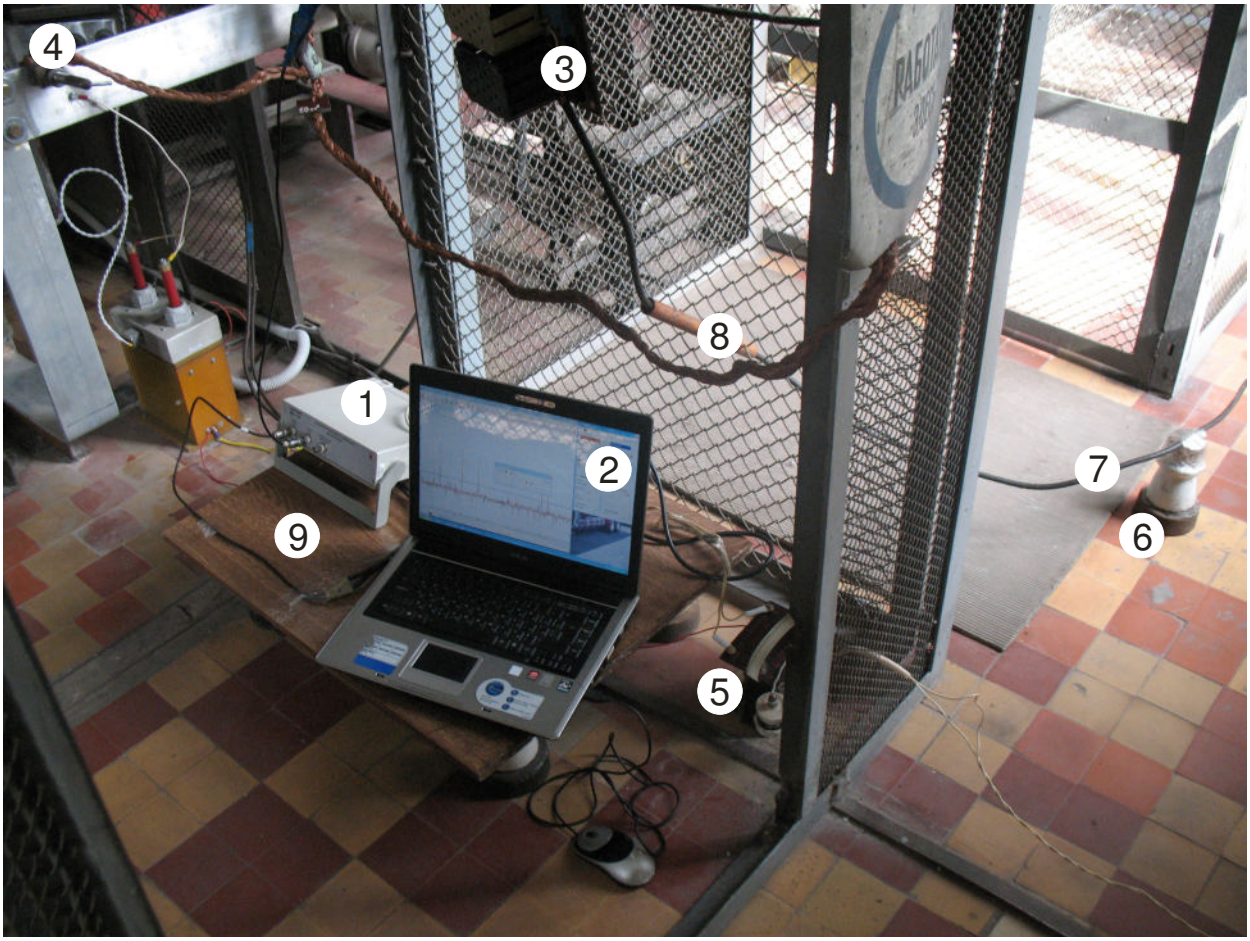


Рисунок 2.5 – Фото установки осцилографування величин короткого замикання на фідері з ШВ типу ВАБ-206. (тягова підстанція Нижньодніпровськ-Вузол ЕЧЕ-15): 1 – ЦЗО АСК-3106; 2 – ПЕОМ ASUS; 3 – подільник напруги; 4 – шунт; 5 – ізолюючий трансформатор; 6 – ізолятори ОФ-10 для прокладання проводу ПС-10 до шини «-»; 7 – провід ПС-10 для вмикання до шини «-»; 8 – бакелітова трубка; 9 – ізольована підставка

Дані, що накопичуються приладом, можуть записуватися у файл, розмір якого в цьому випадку 2ГБ. Надалі цей файл може бути завантажений для перегляду програмою.

Результати вимірювання можуть бути збережені в ПЕОМ для подальшого використання. Отримані дані зберігаються або у вигляді чисельних значень, або у вигляді зображень осцилограм. Для чисельних даних використовується універсальний текстовий формат електронних таблиць CSV, який зручний тим, що працювати з ним можна в будь-якому текстовому або табличному редакторі: від стандартного Блокноту Windows до MS Excel.

Зображення осцилограм можна зберігати як у растровому форматі BMP, так і у векторних форматах WMF або EMF [149].

Наведемо деякі технічні характеристики ЦЗО: кількість вимірювальних каналів – 2; макс. частота дискретизації - 100 Мвиб/с; тип інтерфейсу з ПЕОМ - USB 1.1; споживана потужність, не більше - 8 Вт. Робочі умови експлуатації: температура - +10...+40 °С; відносна вологість повітря - не більше 90 % при 25 °С; атмосферний тиск - від 495 до 795 мм рт. ст. Система вертикального відхилення: діапазон чутливості - 2 мВ/под...10 В/под з кроком 1-2-5; точність: ±(2% поточної величини ±1 відлік). Часова розгортка: осцилографічний режим: 10 нс/виб...1 мс/виб (1 мкс/под...100 мс/под для розтяжки 1000 крапок на екран); режим самопису: 20 мкс/виб...1 с/виб (2 мс/под...100 с/под для розтяжки 1000 крапок на екран); похибка розгортки - не більше 2%. Загальні технічні характеристики ЦЗО АСК-3106 приведені в [150].

Під час вимірювання перехідного струму для розширення меж виміру ЦЗО було застосовано типові шунти 75ШСМ (3000А/75мВ), увімкнені в шину 3,3 кВ фідера ТП. Схема увімкнення електровимірювального обладнання в фідерну чарунку на прикладі досліджені ШВ типу ВАБ-206 представлена на рис. 2.6. Номінальне значення напруги на вході Х ЦЗО відповідно складало 75мВ.

При вимірах напруги на затискачах ТП у якості електровимірювального перетворювача використовували подільник напруги. Схеми їх вмикання також мали деякі особливості, оскільки згідно правил вмикання цих перетворювачів, основний спад напруги має бути з боку високого потенціалу (точка «а» приєднана до шини +3,3 кВ). У цьому випадку різниця потенціалів між двома входами ЦЗО буде складати ~3,3 кВ, і, як наслідок, ЦЗО вийде з ладу. Тому було застосовано схему, в якій основний спад напруги здійснюється з боку шини «-», тим самим входи Х і У осцилографа мали одну спільну точку «b» і відносно неї здійснювалися вимірювання різниці потенціалів по кожному з каналів.

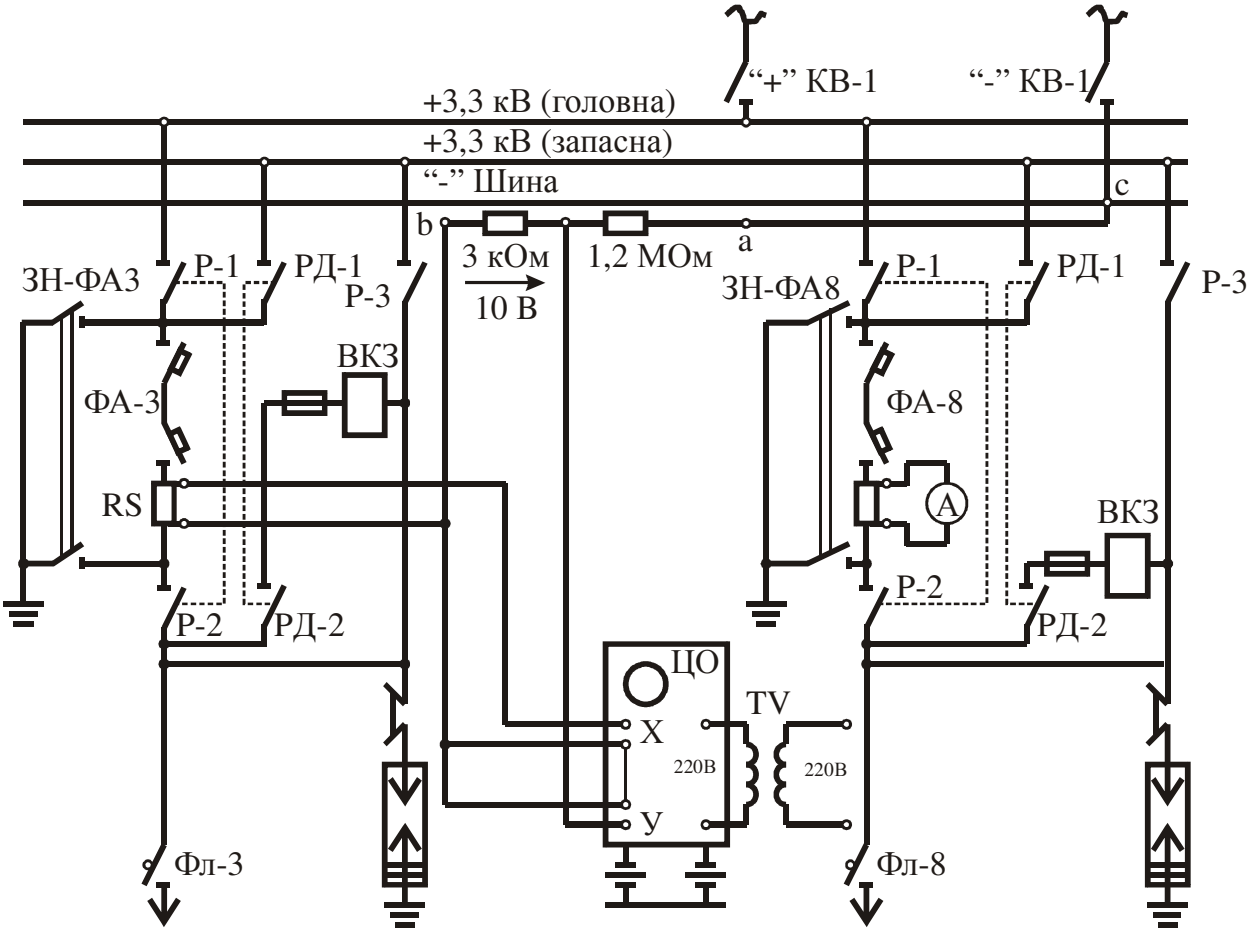


Рисунок 2.6 – Схема вмикання цифрового запам’ятовуючого осцилографа у фідерну чарунку

При вмиканні електровимірювального обладнання під час дослідження ШВ ВАБ-206 автор роботи мав деякі проблеми пов’язані з будовою тягової підстанції Нижньодніпровськ-Вузол (ЕЧЕ-15). Розміщення шин +3,3 кВ і «-» в РУ-3,3 кВ таке, що не було можливості увімкнути подільник напруги в одній фідерній чарунці. Тому точку «а» було увімкнено до точки «с», яка знаходилася у фідерній чарунці Ф-8 на відстані ~10 м від Ф-3. У якості провідника «а-с» було обрано високовольтний провід ПС-10 (номінальна напруга 4 кВ), який було прокладено ззовні від РУ-3,3 кВ на опорних ізоляторах ОФ-10 (номінальна напруга 10 кВ) рис. 2.5.

Слід зауважити, що електровимірювальні перетворювачі електричних кіл постійного струму не забезпечують гальванічного розв’язання вимірювального кола від силової лінії. Тому було прийнято рішення встановити ЦЗО у парі з ПЕОМ на ізоляторах ОФ-10 під один потенціал з лінією 3,3 кВ (рис.

2.5). Тобто, жодним чином неможна було допускати торкання вимірювального обладнання до землі, потенціал якої дорівнює нулю. Для забезпечення живлення електровимірювальних приладів використовували ізолюючий трансформатор з коефіцієнтом трансформації $k_U = 1$.

2.3 Технічні та програмні засоби теоретичних розрахунків

Для виконання теоретичних розрахунків складних математичних моделей системи електричної тяги постійного струму в режимі «втрати-відновлення» живлення на струмоприймачі застосовували програмне забезпечення Maple 11, яка орієнтована на рішення складних завдань теоретичної електротехніки, теорії поля, аеродинаміки, теплопровідності, дифузії тощо, хоча і розв'язання в ній простих завдань цілком можливо й доречно [151]. Можливо для розв'язання таких завдань цілком підійде досить проста, швидка й надійна система Derive або система Mathcad. Однак за кількістю доступних користувачеві математичних функцій ці скромні системи не йдуть ні в яке порівняння з патріархом символьної математики - системою Maple.

Натомість слід зауважити, поряд з рядом переваг моделювання в MATLAB/ Simulink/, SimPowerSystems має, на думку автора, ряд недоліків [152], розглянемо деякі з них. За відносно доброю споглядовістю самої віртуальної моделі MATLAB/Simulink не надає можливості отримати чисельні значення, таких важливих з точки зору моделювання, понять як початкові умови. Але саме вони, головним чином, визначають електромагнітний стан системи, що моделюється. В процесі моделювання режимів короткого замикання в SPS для задання ПУ авторам доводилося в блок ключа «Breaker», який імітував закоротку, вводити термін часу спрацювання ≠0 [153]. Однак відсутня можливість знати, чи правильними є розраховані ПУ. MATLAB з пакетами Simulink/SPS головним чином є математичним програмним забезпеченням: визначення ПУ в ній здійснюється за математичним алгоритмами. Натомість, алгоритм знаходження ПУ в теорії електричних кіл дещо різниться з класичним їх розумінням в математиці. Крім того дуже незручним є

відсутність контролю розрахунку, оскільки часто автору при моделюванні було не зрозуміло, чи відбуваються чисельні інтегрування, чи процес «завис». Крім зазначеного, існує ще ряд незручностей, якими можна знехтувати, Зокрема, що відсутня можливість створити складну магнітоелектромеханічну модель такої складної нелінійної динамічної системи, якою є система електричної тяги (тягова підстанція + тягова мережа + силові кола, а також механічна частина електрорухомого складу) енергоспоживання [154].

Зважаючи на попередні недоліки, автором було прийнято рішення про застосування MATLAB/Simulink при моделюванні електромагнітних процесів відносно простих схем СТЕП.

Основну частину теоретичних досліджень авторами було проведено за допомогою системи комп'ютерної математики «MAPLE». Це можна пояснити тим, що MAPLE з точки зору класичної електротехніки є найбільш зручним програмним забезпеченням при математичному моделюванні [155].

2.4 Висновок до розділу 2

Досліди штучного короткого замикання в тяговій мережі необхідно виконувати шляхом безпосереднього короткого замикання в тяговій мережі під напругою, а не попереднім (до вмикання підстанційних ШВ) завішуванням заземлюючої штанги на лінії.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ У ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ БЕЗ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

Найчастіше зазвичай теоретичні розрахунки та натурні досліди режимів КЗ в ТМ здійснюються з метою вибору типу та параметрів релейного захисту і зокрема: визначення максимального та мінімального струмів КЗ, характеру та швидкості його зміни, повного терміну часу вимикання діючого ШВ тощо. Це обумовлено тим, що в існуючих системах релейного захисту експлуатується або МСЗ, або МІСЗ. В той же час в цій роботі було поставлена задача визначення нових критеріїв, нових ознак характеру роботи системи, на основі яких можливо було б розробити нову (чи нові) системи релейного захисту фідерів +3,3 кВ. Тому далі, в цьому розділі, у певній мірі і вирішується поставлена задача.

3.1 Реакція швидкодіючих вимикачів різних типів у режимі короткого замикання. Експериментальні результати [156]

Нижче наведено результати експериментальних досліджень (рис. 3.1-3.4) (осцилограми та параметри) режимів КЗ в ТМ ряду електрифікованих ділянок, а саме: часові залежності фідерних струмів $i(t)$, вихідної фідерної напруги ТП $u(t)$, спаду напруги на електричній дузі ШВ $u_{д}(t)$, а також терміну часу повного вимикання $t_{вим}$ струму КЗ.

а)

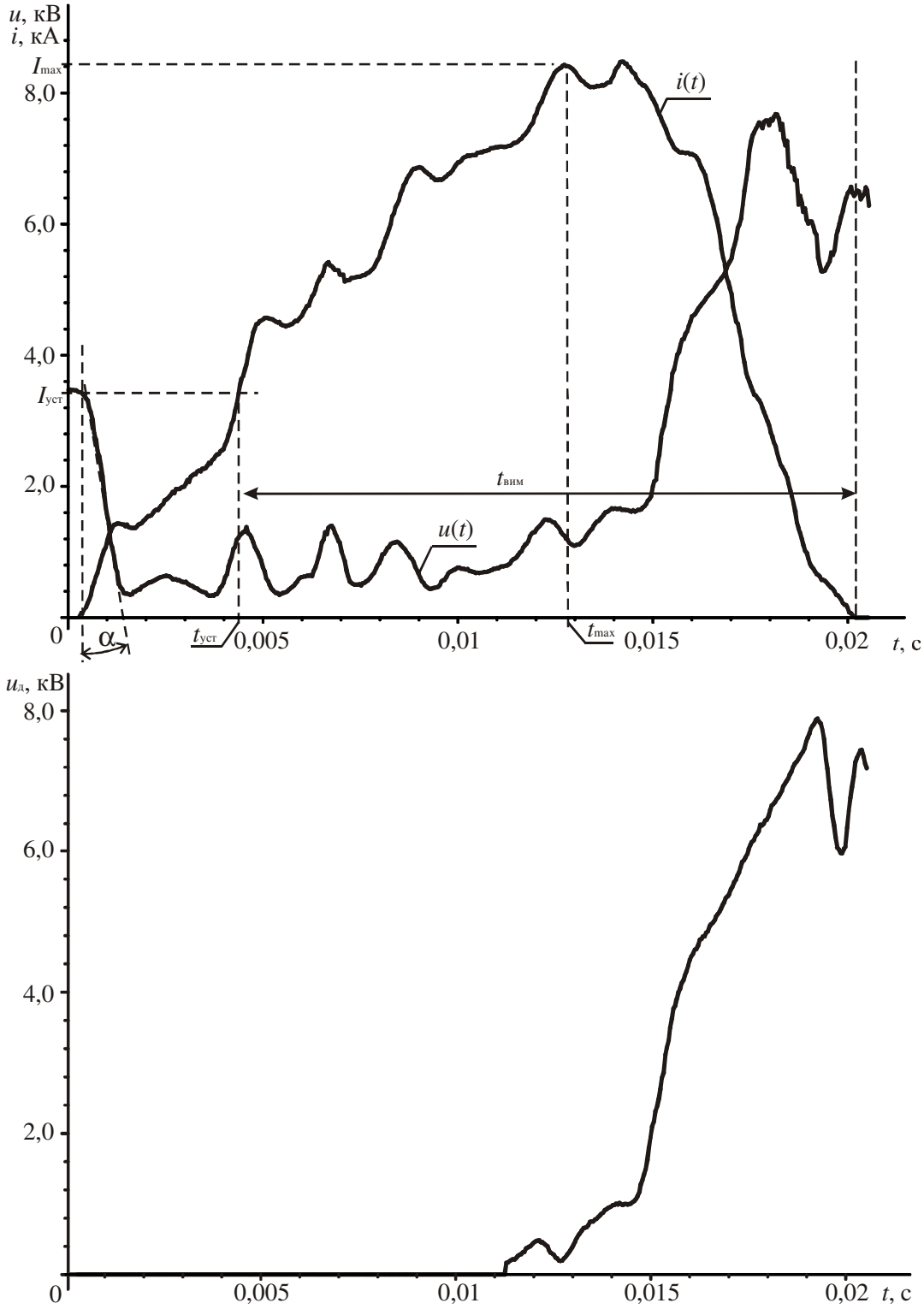


Рисунок 3.1 – Осцилограми зміни перехідних електричних величин під час вимикання ШВ 2×ВАБ-43 на ТП Воскобійня (ЕЧЕ-82), ділянка Воскобійня (ЕЧЕ-82) – Платина (ЕЧЕ-41) при:

а) близькому КЗ, $l = 0{,}5\ км$, струм уставки $I_{\text{у}} = 3500\ A$; б) середньому КЗ, $l = 3{,}3\ км$, $I_{\text{у}} = 3500\ A$; в) дальньому КЗ, $l = 8{,}5\ км$, $I_{\text{у}} = 2550\ A$

б)

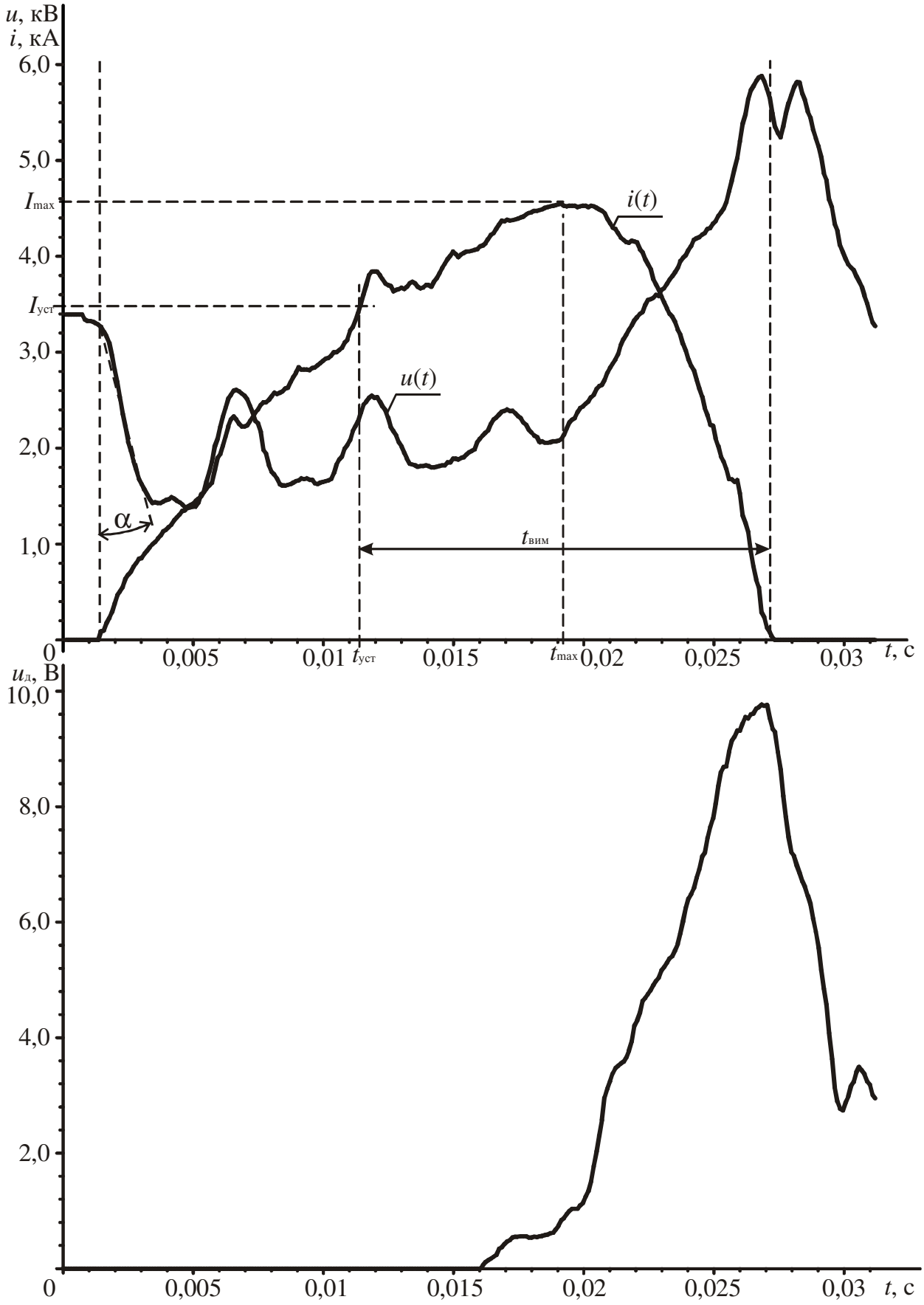


Рисунок 3.1, с.70

в)

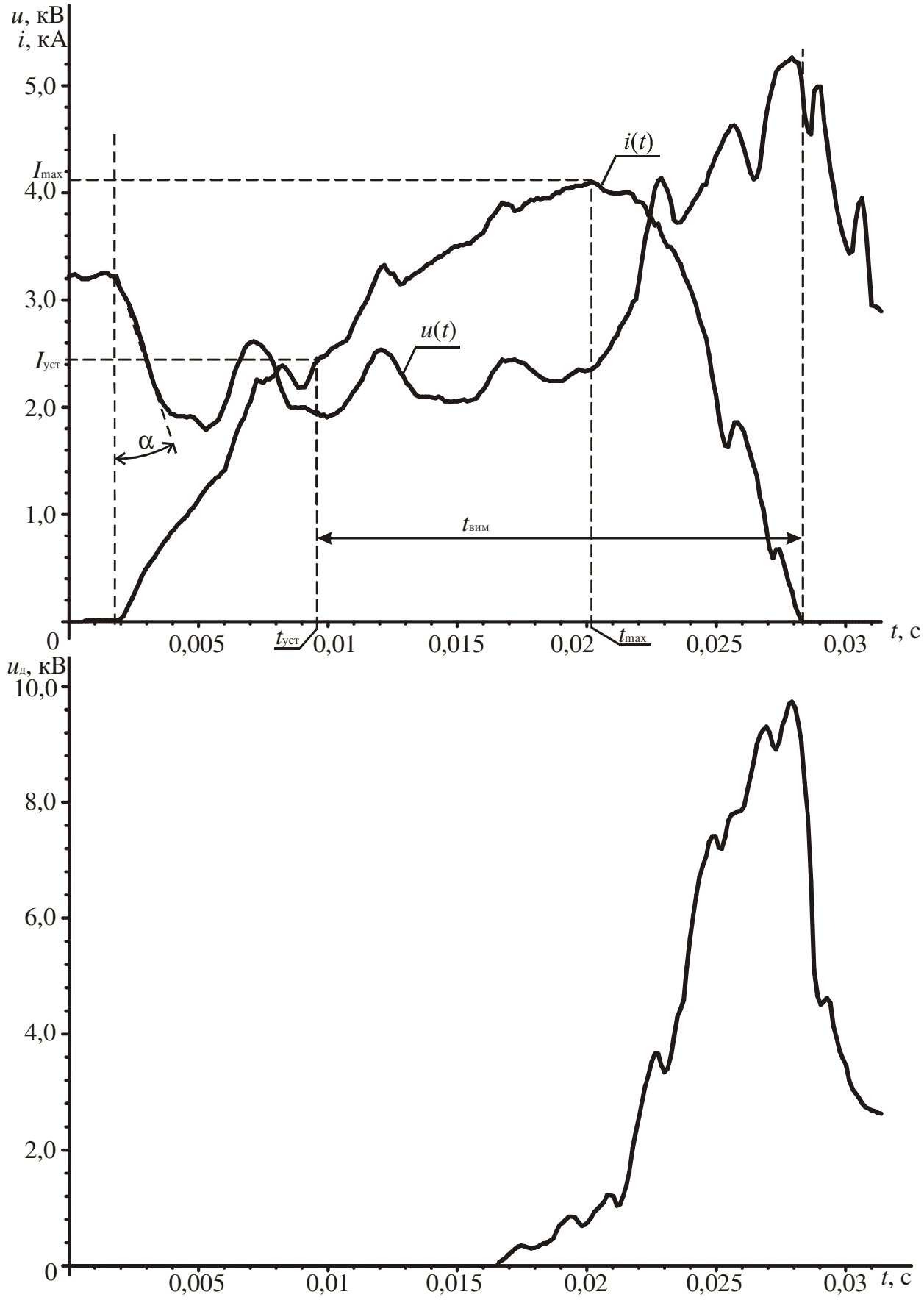


Рисунок 3.1, с.70

а)

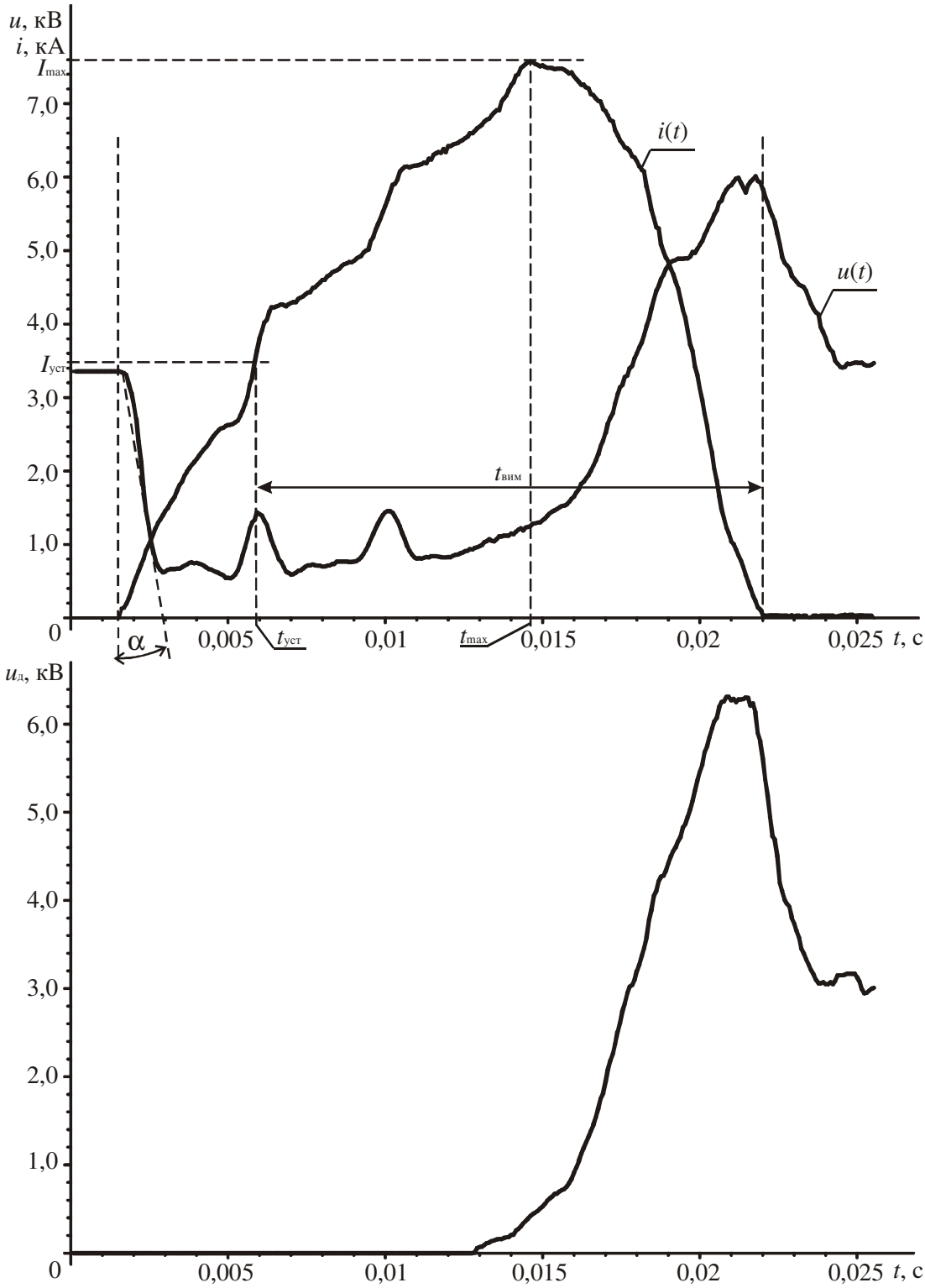


Рисунок 3.2 – Осцилограми перехідних електричних величин під час вимикання ШВ 2×ВАБ-49, на ТП Верхньодніпровськ (ЕЧЕ-11), ділянка Верхньодніпровськ (ЕЧЕ-11) – Верхівцеве (ЕЧЕ-10) при:
а) близькому КЗ, $l = 0{,}5\ км$, $I_{у} = 3500\ А$; б) середньому КЗ, $l = 5{,}4\ км$, $I_{у} = 3500\ А$; в) дальньому КЗ, $l = 17\ км$, $I_{у} = 2700\ А$

б)

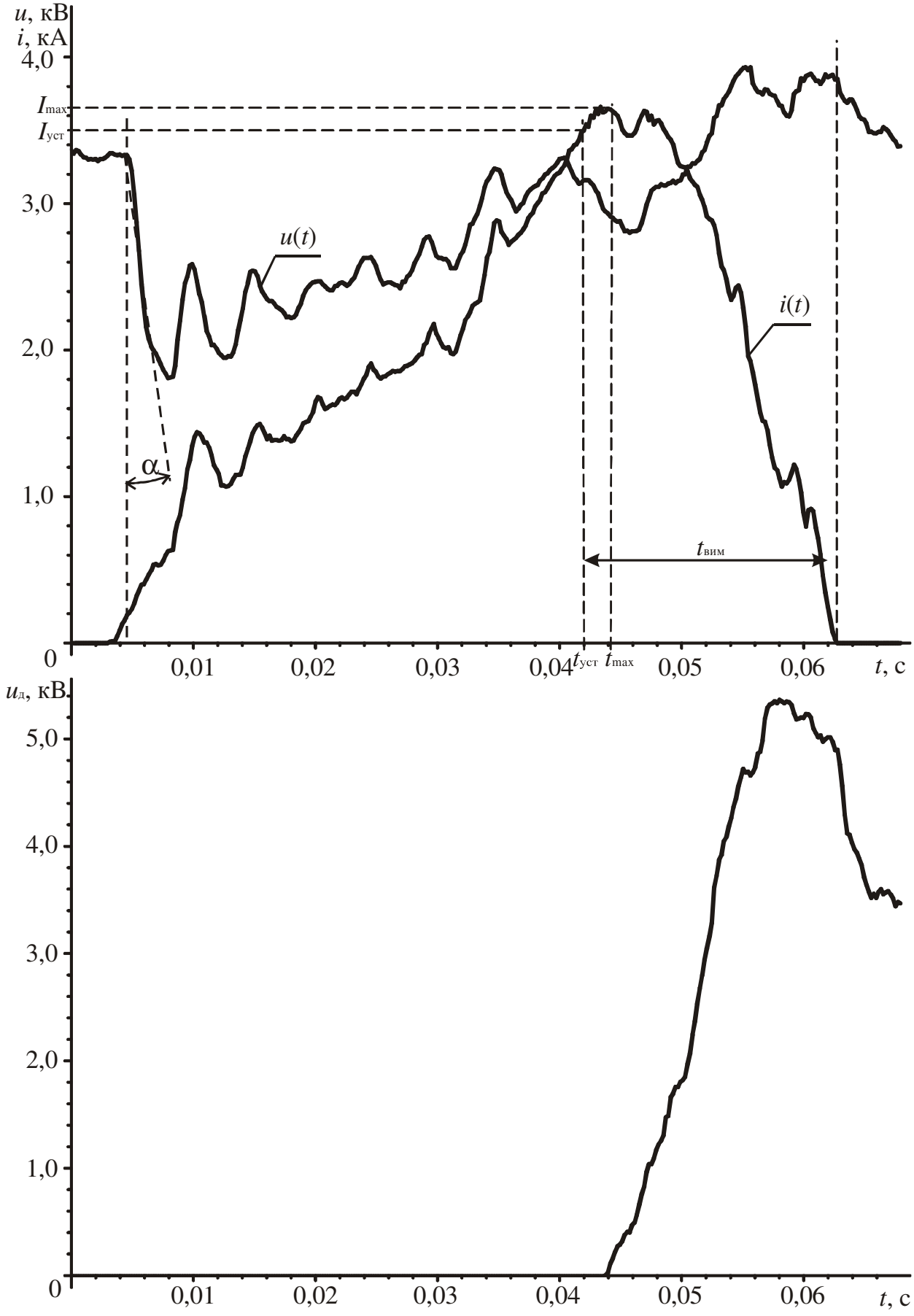


Рисунок 3.2, с.73

в)

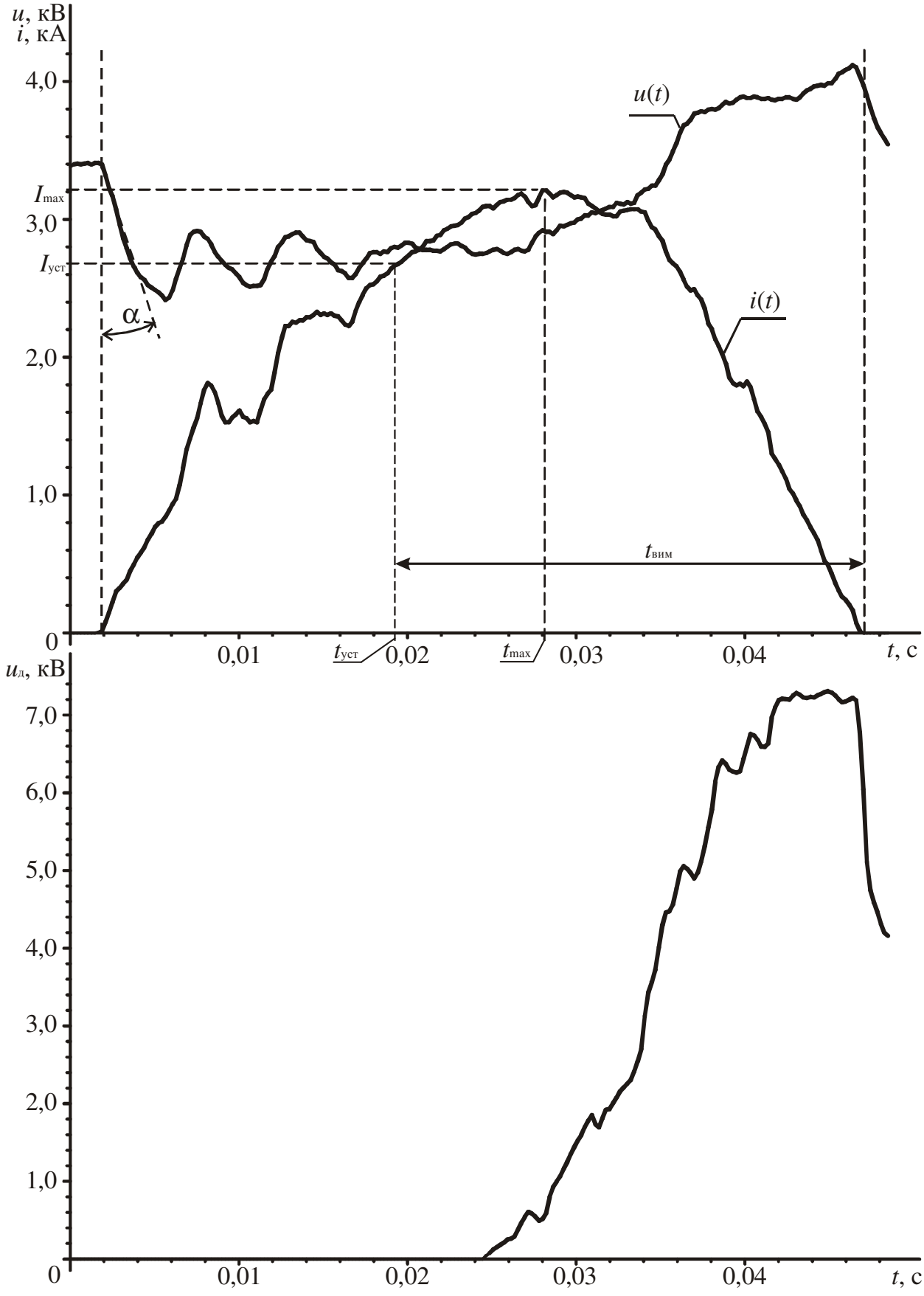


Рисунок 3.2, с.73

а)

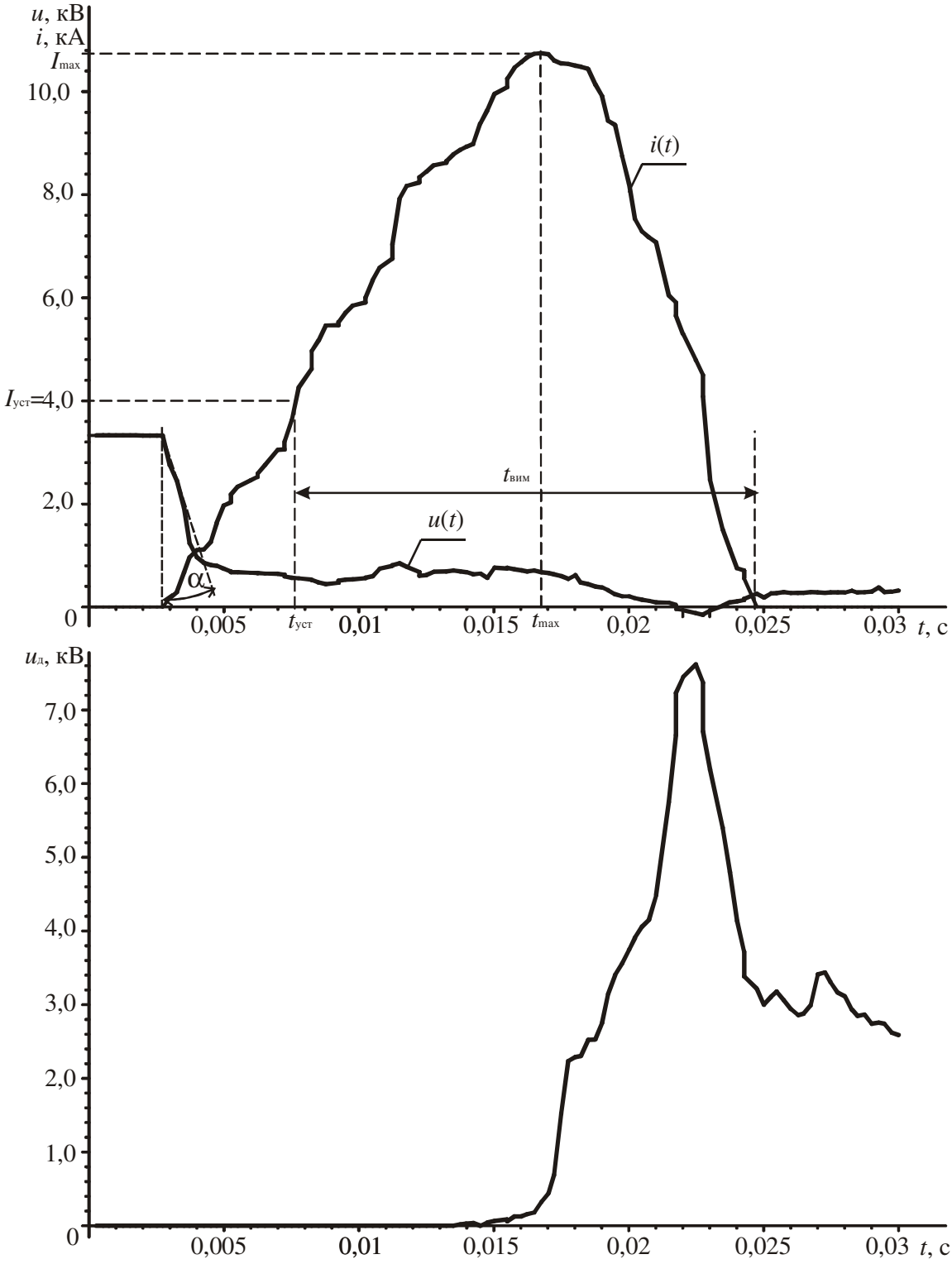


Рисунок 3.3 – Осцилограми перехідних електричних величин під час вимикання ШВ ВАБ 206 на ТП Горяїнове (ЕЧЕ-14), ділянка Горяїнове (ЕЧЕ-14)–Сухачівка (ЕЧЕ-13) при:

а) близькому КЗ, $l = 0{,}5\ км$, $I_{\text{у}} = 4000\ A$; б) дальньому КЗ, $l = 8{,}5\ км$, $I_{\text{у}} = 4000\ A$

б)

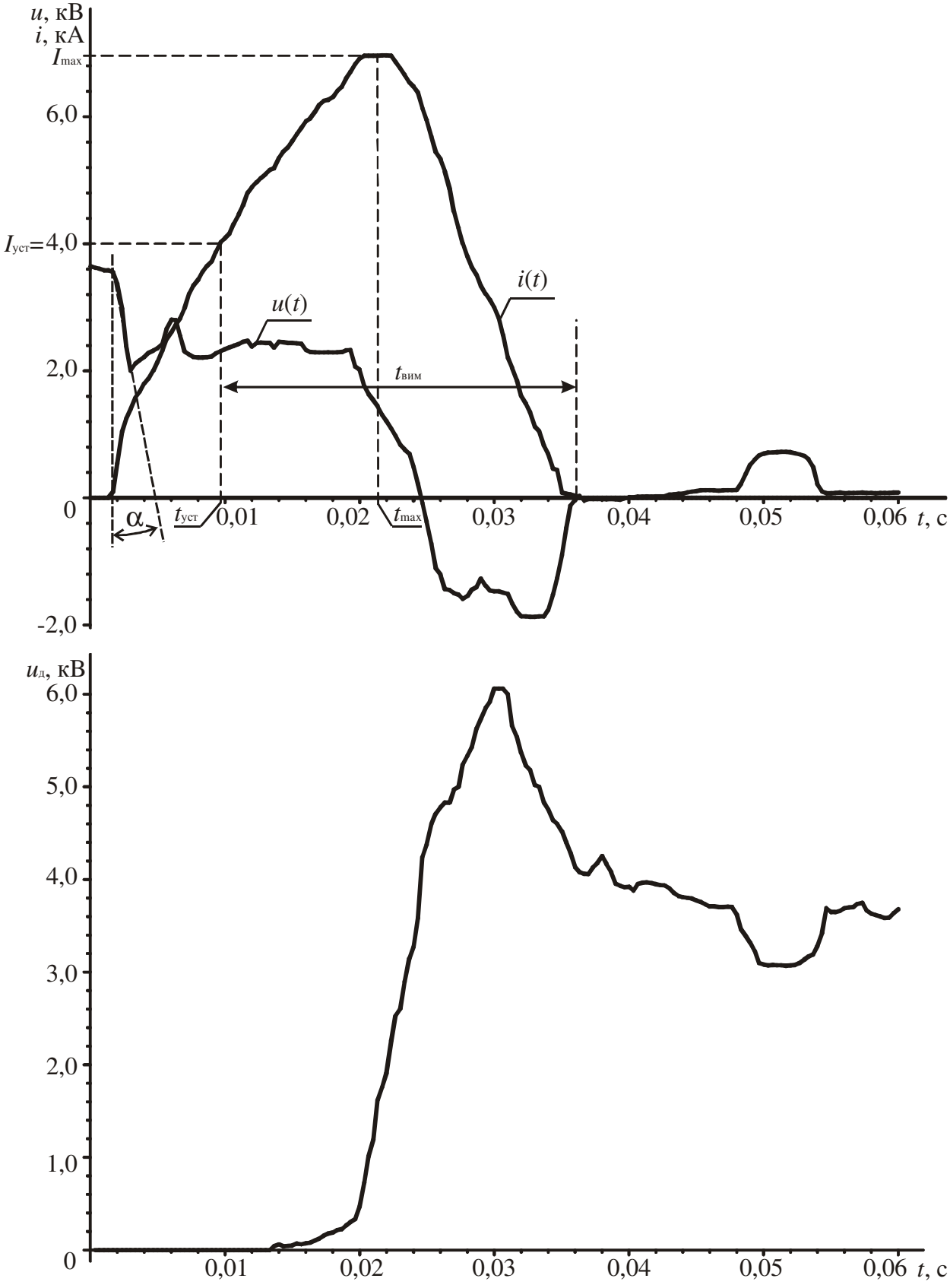


Рисунок 3.3, с.76

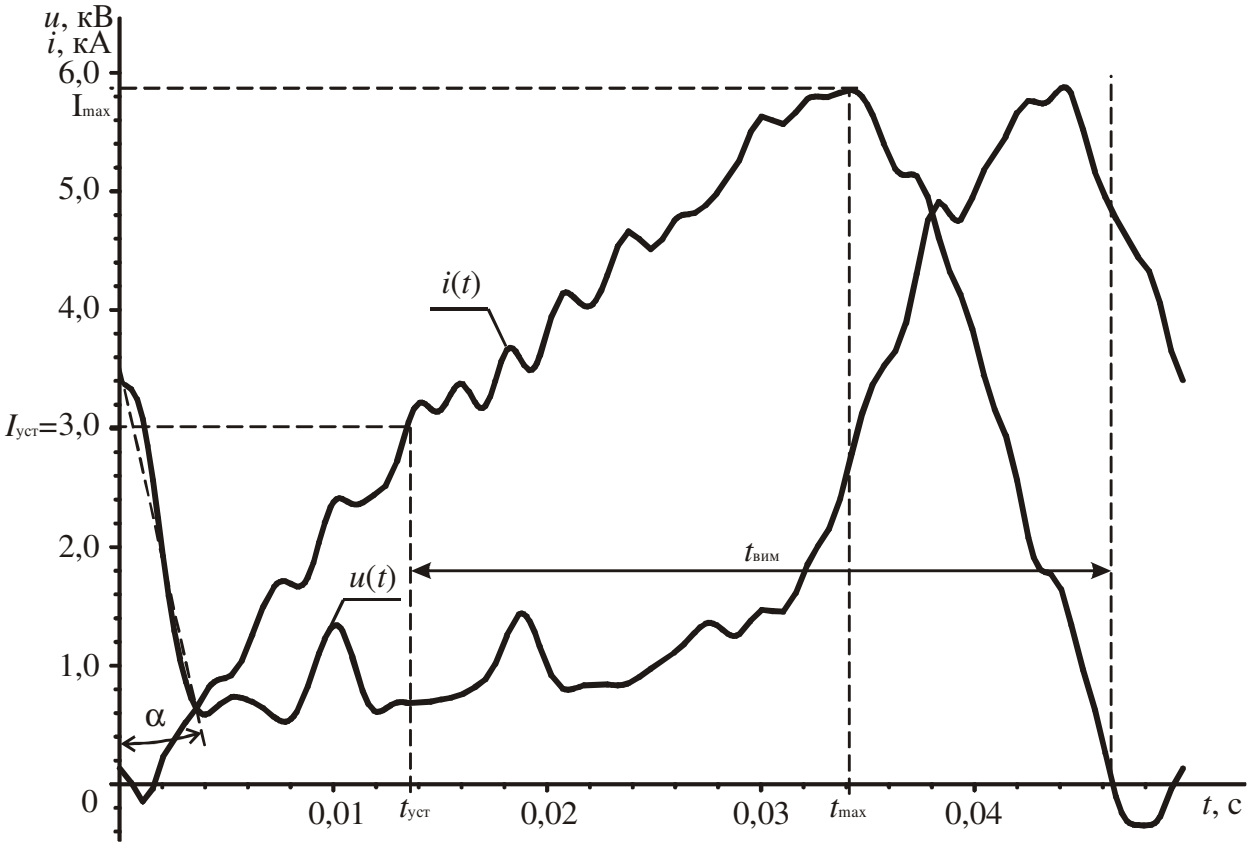


Рисунок 3.4 – Осцилограми перехідних електричних величин під час вимикання ШВ ВАБ-206 на ТП Нижньодніпровськ Вузол (ЕЧЕ-15), ділянка Нижньодніпровськ Вузол – Ілларіонове при близькому КЗ, $l = 2\ км$, $I_{\text{у}} = 3000\ A$.

Із аналізу отриманих осцилограм випливають чіткі певні закономірності зміни максимального струму $I_{\max}$ (рис. 3.5), мінімальної напруги $U_{\min}$ (рис. 3.6), а також похідних цих перехідних електричних величин $\left.\frac{di_{\text{к}}(t)}{dt}\right|_{t=0}$ (рис. 3.7), $\left.\frac{du(t)}{dt}\right|_{t=0}$ (рис. 3.8) в момент КЗ в залежності від довжини короткозамкненої ділянки (індуктивності кола КЗ).

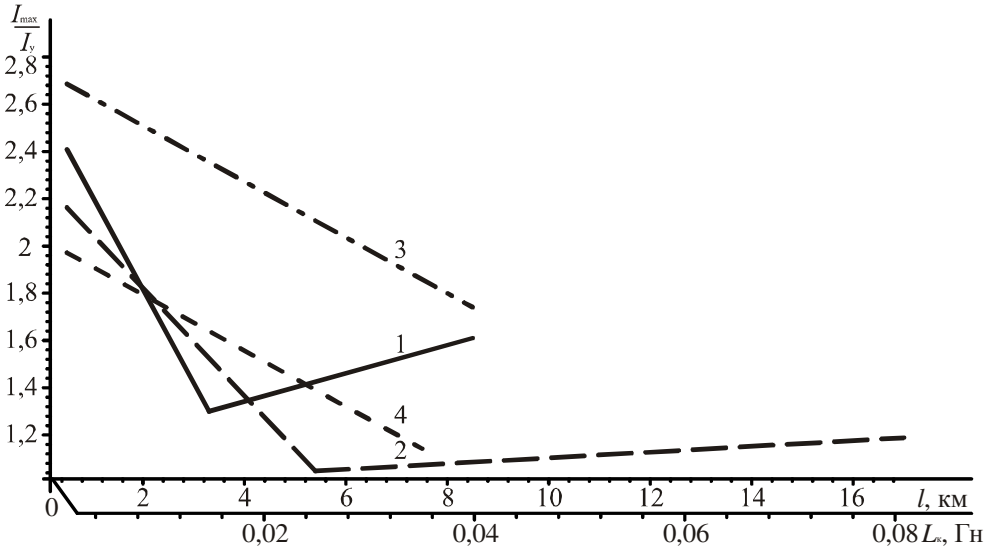


Рисунок 3.5 – Залежності максимального струму КЗ $I_{\max}$, приведеного до струму уставки $I_{\text{у}}$, від відстані l та індуктивності контактної мережі $L_{\text{к}}$ до місця КЗ для: 1 – ВАБ-43; 2 – ВАБ-49; 3 – ВАБ-206 (ТП Горяїнове (ЕЧЕ-14)); 4 – ВАБ-206 (ТП Нижньодніпровськ Вузол (ЕЧЕ-15))

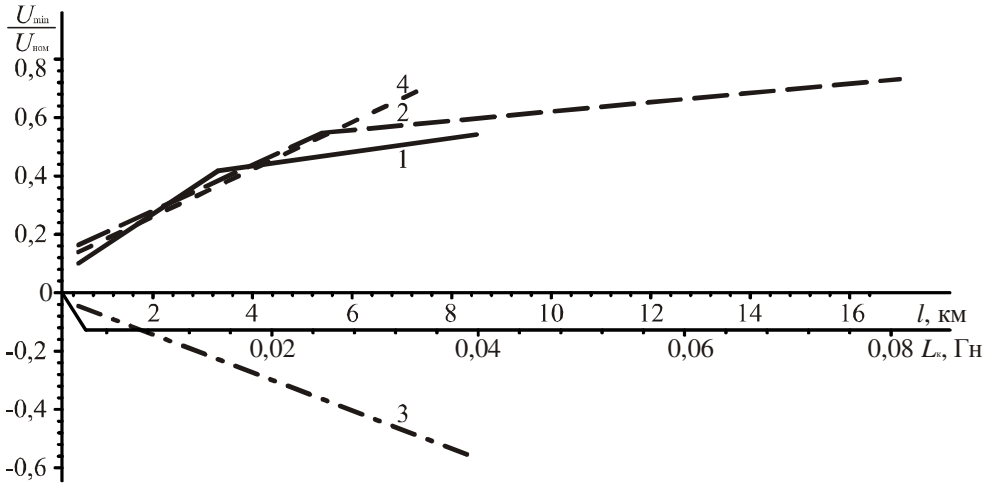


Рисунок 3.6 – Залежності мінімальної напруги $U_{\min}$, приведеної до номінальної $U_{\text{ном}}$, від відстані l та індуктивності контактної мережі $L_{\text{к}}$ до точки КЗ для: 1 – ВАБ-43; 2 – ВАБ-49; 3 – ВАБ-206 (ТП Горяїнове (ЕЧЕ-14)); 4 – ВАБ-206 (ТП Нижньодніпровськ Вузол (ЕЧЕ-15))

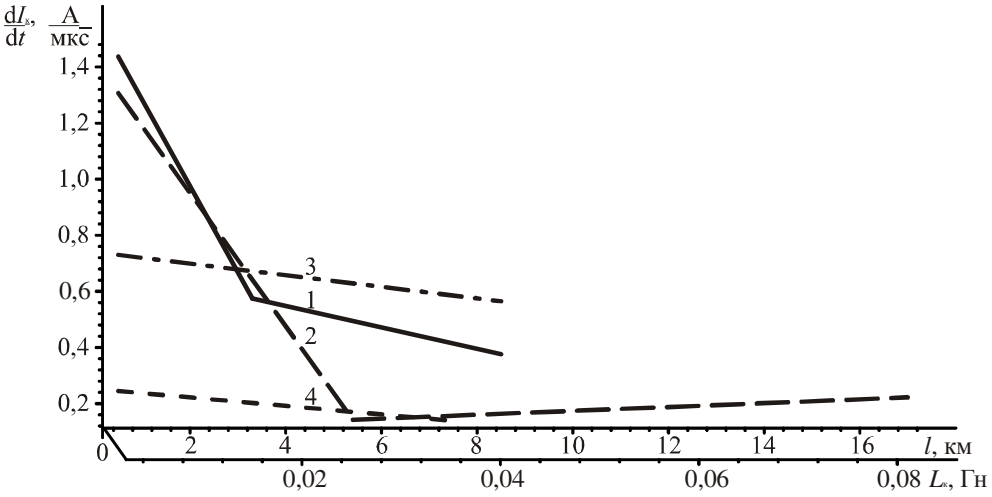


Рисунок 3.7 – Залежність швидкості зростання струму $\left.\frac{di_{\text{к}}(t)}{dt}\right|_{t=0}$ від відстані l та індуктивності контактної мережі $L_{\text{к}}$ до точки КЗ для: 1 – ВАБ-43; 2 – ВАБ-49; 3 – ВАБ-206 (ТП Горяїнове (ЕЧЕ-14)); 4 – ВАБ-206 (ТП Нижньодніпровськ Вузол (ЕЧЕ-15))

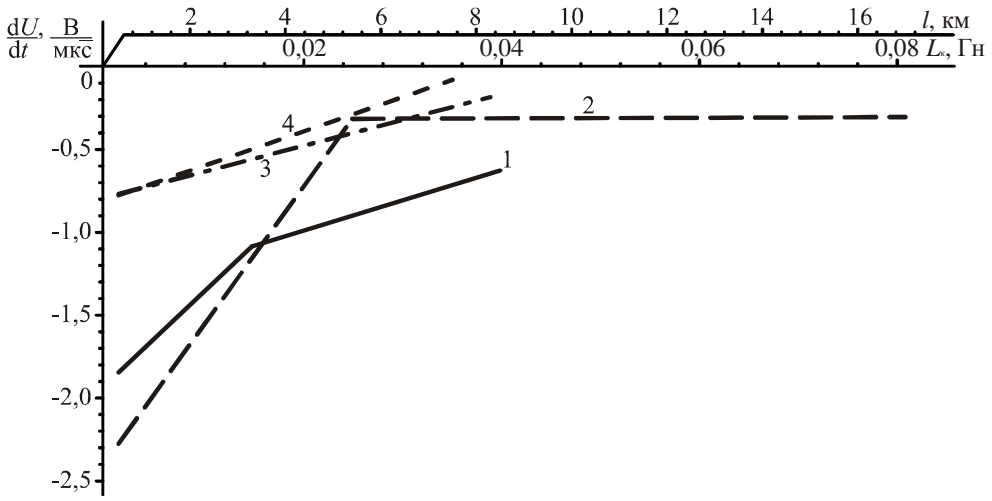


Рисунок 3.8 – Залежність швидкості спадання напруги $\left.\frac{du(t)}{dt}\right|_{t=0}$ від відстані l та індуктивності контактної мережі $L_{\text{к}}$ до точки КЗ для: 1 – ВАБ-43; 2 – ВАБ-49; 3 – ВАБ-206 (ТП Горяїнове (ЕЧЕ-14)); 4 – ВАБ-206 (ТП Нижньодніпровськ Вузол (ЕЧЕ-15))

Аналіз приведених вище осцилограм і графічних залежностей рис. 3.5-3.8 подамо у наступних підрозділах

3.2 Порівняльна характеристика різних типів швидкодіючих вимикачів тягових підстанцій

На сьогодні на ТП електричної тяги постійної струму в якості основних захисних фідерних апаратів використовують ШВ типу АБ-2/4, ВАБ-28 і ВАБ-43, які не задовольняють вимоги за якістю й надійністю роботи [71]. Тому Укрзалізниця за своїми планами [3-8] рекомендує службам електрифікації залізниць здійснювати заміну існуючих ШВ на нові, зокрема на ШВ типу ВАБ-49 і ВАБ-206 (Росія); проходить також випробування вимикач типу VR-40-64S фірми Sesheron (Швейцарія). У зв'язку з необхідністю вдосконалення захисту електротягових мереж постійного струму доцільно мати дані по порівняльній характеристиці зазначених ШВ за результатами їхніх випробувань в умовах роботи залізниць України. З наукових публікацій по даному питанню відома лише робота [72], в якій виконано порівняння фідерних вимикачів постійного струму 2хВАБ-49 й GE Rapid для умов роботи залізниць Росії.

Як відомо [16, 73], захисні властивості ШВ характеризуються сукупністю наступних основних параметрів (величин): вимикаючою здатністю, коефіцієнтом обмеження струму КЗ і ампер-секундами вимикаючого струму. Вважаємо за доцільне додати до цих параметрів також повний термін часу вимикання струмів КЗ вимикачем і енергію, яка виділяється в дугогасних камерах при його вимиканні. За цими параметрами, які були визначені за осцилограмами рис. 3.1-3.4, і було виконано порівняння ШВ типу ВАБ-43, ВАБ-49, ВАБ-206 й VR-40-64S для ділянок ДП «Придніпровська залізниця» з ТП Горяїнове, Верхньодніпровськ, Воскобійня, Нижньодніпровськ Вузол і Запоріжжя-Ліве.

1. Вимикаюча здатність ШВ є найважливішим параметром, залежить від багатьох факторів і визначається різними, у свою чергу, параметрами.

Згідно [16], вимикаюча здатність оцінюється за найбільшою величиною усталеного струму $I_{\text{к max}} = I_{\infty}$ у колі з заданою індуктивністю, при якому вимикач здатний обмежити струм КЗ і далі надійно вимкнути електричне ко-

ло. Тобто, значення $I_{к\,max}$ визначається в усталеному режимі кола, що вимикається, найпростіша схема якого представлена на рис. 3.9, де: U - фідерна напруга; R_Σ, L_Σ - сумарний активний опір й індуктивність, що еквівалентні опору та індуктивності ТП і ТМ.

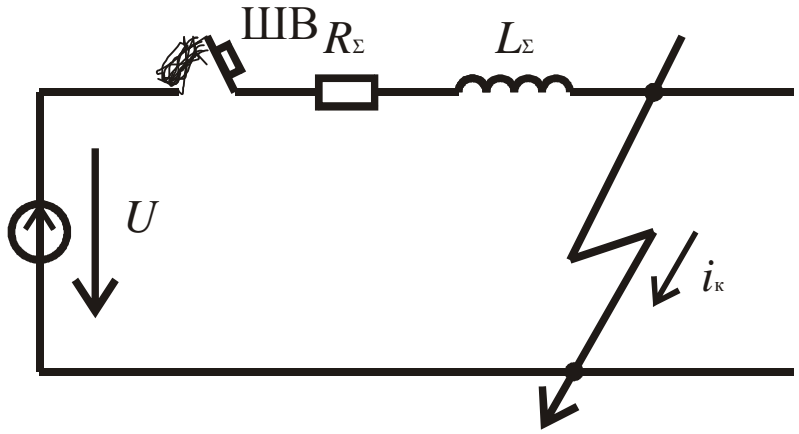


Рисунок 3.9 – Найпростіша схема заміщення ТМ у режимі КЗ

Для реальних вимикаючих пристроїв із запізнюванням, якими і є існуючі ШВ, з лінійним законом наростання напруги дуги ($u_д(t) = b \cdot t$), значення $I_{к\,max}$, згідно схеми рис. 3.9, визначається за виразом [20]:

$$I_{к\,max} = I_\infty = \frac{U}{R_\Sigma} + \frac{b \cdot L_\Sigma}{R_\Sigma^2}, \qquad (3.1)$$

де b – швидкість наростання напруги дуги (визначається за отриманими осцилограмами).

При деякому найбільшому значенні $I_{к\,max}$ (рис. 3.10) вимикач не здатний у межах дугогасної камери розірвати коло. Найбільше значення $I_{к\,max}$, при якому ШВ ще може розірвати дугу і визначає його найбільшу вимикаючу здатність. Практично $I_{к\,max}$ (рис. 3.10) – це найбільша величина струму КЗ, що він досяг би при відсутності вимикача. Для так званого ідеального вимикаючого пристрою постійного струму із запізнюванням [20] ця величина рівна першому доданку виразу (3.1):

$$I_{к\,max} = \frac{U}{R_\Sigma}. \qquad (3.2)$$

Вимикаюча здатність ШВ також тим вище, чим менше величина обмеженого вимикачем струму вимикання КЗ $I_{\text{в max}}$ (рис. 3.10) і чим менше повний термін часу його вимикання $t_{\text{вим}}$ (рис. 3.10). Величини $I_{\text{в max}}$ й $t_{\text{вим}}$ можна визначити тільки за осцилограмами (рис. 3.1-3.4), отриманими експериментально в реальних умовах експлуатації досліджуваних фідерних ділянок і ШВ. Варто зазначити, що збільшення $I_{\text{к max}}$ супроводжується збільшенням $I_{\text{в max}}$.

Згідно [72], вимикаюча здатність вимикача оцінюється також так званою енергетичною напруженістю роботи дугогасної камери ШВ, що визначається кількістю енергії $W_{\text{кам}}$, яка виділяється в камері при вимиканні (рис. 3.10):

$$W_{\text{кам}} = \int_{t_{\text{у}}}^{t_{\text{вим}}} u_{\text{д}}(t) \cdot i_{\text{к}}(t) \cdot dt \,. \qquad (3.3)$$

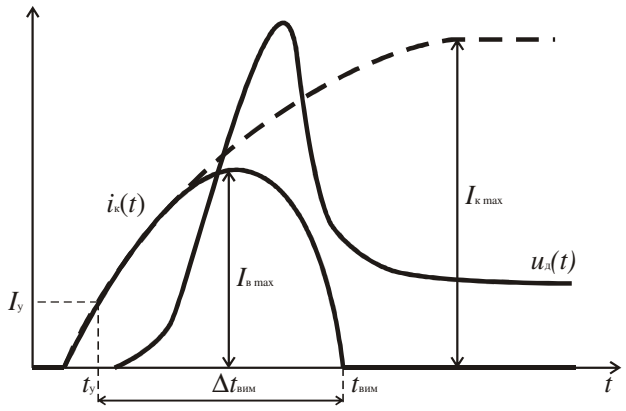


Рисунок 3.10 – Якісні часові залежності зміни струму КЗ та напруги дуги ШВ

2. Коефіцієнт обмеження струму КЗ (обмежуюча здатність ШВ) $K_{\text{обм}}$ різними дослідниками визначається по різному. В [16] величина $K_{\text{обм}}$ - це відношення струмів (рис. 3.10):

$$K_{\text{обм}} = \frac{I_{\text{к max}}}{I_{\text{в max}}}, \qquad (3.4)$$

а в [72, 20] коефіцієнт $K_{\text{обм}}$ визначається як відношення максимального струму $I_{\text{в max}}$ до струму уставки $I_{\text{у}}$:

$$K_{\text{обм}} = \frac{I_{\text{в max}}}{I_{\text{у}}}, \qquad (3.5)$$

і в [20] цей коефіцієнт називається найменшим коефіцієнтом обмеження струму. За інших рівних умов більше ефективним і надійним є той ШВ, у якого коефіцієнт обмеження має менше значення.

3. Ампер-секунди вимикаючого струму, (позначимо як $Q_{\text{к}}$), що пройшли через місце КЗ, визначаються як (рис. 3.10):

$$Q_{\text{к}} = \int_{t_{\text{у}}}^{t_{\text{вим}}} i_{\text{к}}(t)\,dt, \qquad (3.6)$$

тобто, величина $Q_{\text{к}}$ знаходиться також за осцилограмами зміни струму КЗ.

Величина $Q_{\text{к}}$ є визначальною при оцінці імовірності перепалу проводів КМ в місці КЗ дугою, що виникла. Згідно [73], для перепалу проводу МФ100 при струмах понад 400 А необхідно лише близько 250 А·с, а для деформації й розриву проводів достатні струми в 150...200 А.

В ході експериментальних досліджень на діючих ділянках і при розрахунках за формулами (3.1)-(3.6) аналізували процеси в ТМ й значення вищерозглянутих параметрів у режимах близького, середнього і далекого (щодо досліджуваного ШВ) КЗ. Розрахункові дані за формулою (3.1) наведено в таблиці 3.1, а остаточні результати за параметрами - у таблиці 3.2.

З аналізу даних таблиці 3.2 випливає, що однозначної відповіді відносно переваги певного ШВ, у порівнянні з іншими, у всіх режимах КЗ (близьке, середнє, далеке) дати не можна, тобто «універсально» не може працювати жоден вимикач [157].

У режимі далекого КЗ найбільш ефективно й надійно працює вимикач 2хВАБ-43. У порівнянні з іншими ШВ (у цьому режимі) він має: найбільш високу вимикаючу здатність, про що свідчить найбільше значення $I_{\text{к max}} = 50739$ А; невелике значення $I_{\text{в max}} = 4087$ А; менший повний термін часу вимикання струму КЗ $t_{\text{вим}} = 18{,}3$ мс і найменшу енергетичну напруженість роботи камер ($W_{\text{кам}} = 197{,}8$ кДж). Трохи, щоправда, завищений коефіцієнт

обмеження струму КЗ $K_{\text{обм}}$, але зате імовірність перепалу проводів невелика, тому що ампер-секунди незначні: $Q_{\text{к}} = 68,6$ А·с.

Таблиця 3.1

Вихідні данні для розрахунку основних показників ефективності роботи ШВ різних типів

№ режиму КЗ	U, В	R_{Σ}, Ом	b, В/с	L_{Σ}, Гн
1	3245	0,364	$18,57 \cdot 10^5$	$6,53 \cdot 10^{-3}$
2	3364	0,424	$12,85 \cdot 10^5$	$8,97 \cdot 10^{-3}$
3	3250	0,306	$11,76 \cdot 10^5$	$13,55 \cdot 10^{-3}$
4	3313	0,320	$10,9 \cdot 10^5$	$6,53 \cdot 10^{-3}$
5	3349	0,743	$4,55 \cdot 10^5$	$10,78 \cdot 10^{-3}$
6	3433	0,777	$4,37 \cdot 10^5$	$21,1 \cdot 10^{-3}$
7	3250	0,267	$8 \cdot 10^5$	$6,53 \cdot 10^{-3}$
8	3750	0,330	$7,6 \cdot 10^5$	$14,13 \cdot 10^{-3}$
9	3400	0,432	-	$10,6 \cdot 10^{-3}$
10	3400	0,75	-	$23 \cdot 10^{-3}$

В режимі середнього КЗ ефективності роботи вимикачів 2хВАБ-43 й 2хВАБ-49 приблизно однакові. Вимикач 2хВАБ-49 має невеликий $I_{\text{в max}} = 3658$ А і найбільш низький коефіцієнт обмеження $K_{\text{обм}} = 1,05$, що свідчить про високу його вимикаючу здатність, але $t_{\text{вим}}$ в 1,43 рази більше, ніж в 2хВАБ-43. Останній має також більше значення $I_{\text{к max}}$ (16695 А проти 6160 А в 2хВАБ-49), що вказує на більше високу вимикаючу здатність. Енергетична напруженість роботи камер обох типів вимикачів практично однакова ($W_{\text{кам}} = 203,4$ і $201,2$ кДж); це ж відноситься і до імовірності перепалу проводів при вимиканні КЗ: імовірність невелика, тому що $Q_{\text{к}}$ становить 71,0 й 72,8 А·с.

Таблиця 3.2

Основні показники ефективності роботи ШВ різних типів

Тип вимикача	Вид і № режиму КЗ		Струм уставки, $I_{у}$, А	Максимальне значення струму		Коефіцієнт обмеження струму КЗ, $K_{обм}$		Повний термін часу вимикання, $t_{вим}$,мс	Ампер-секунди вимикання КЗ, $Q_{к}$, А·с	Енергія, що виділена у камерах при вимиканні КЗ, $W_{кам}$, кДж
				$I_{в\,max}$, А	$I_{к\,max}$, А	$\frac{I_{в\,max}}{I_{у}}$	$\frac{I_{к\,max}}{I_{в\,max}}$			
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10
2хВАБ-43	1	Близьке	3500	7769	11432	2,22	1,47	16,2	90,6	231,6
	2	Середнє	3500	4550	16695	1,3	3,67	14,6	71,0	203,4
	3	Далеке	2550	4087	50739	1,60	12,41	18,3	68,60	197,8
2хВАБ-49	4	Близьке	3500	7547	12330	2,15	1,63	16,3	93,0	192,6
	5	Середнє	3500	3658	6160	1,05	1,68	20,9	72,8	201,2
	6	Далеке	2700	3188	9069	1,18	2,84	26,2	81,3	272,8
ВАБ-206 (Горяїнове)	7	Близьке	4000	10600	14256	2,63	1,35	17,2	121,0	179,3
	8	Далеке	4000	6930	35391	1,73	5,11	26,3	127,0	232,0
VR-40-64S Sesheron	9	Близьке	4000	10138	-	2,53	-	44,6	280,6	211,30
	10	Далеке	2300	3333	-	1,45	-	42,6	132,6	273,8
ВАБ-206 (НД Вузол)	11	Близьке	3000	5914,7	7866,4	1,48	1,33	36,8	132,2	-

У режимі близького КЗ надійність й ефективність роботи вимикачів типу 2хВАБ-43, 2хВАБ-49 і ВАБ-206 приблизно однакові: вони мають близькі значення струму $I_{\text{к max}}$ (~ від 11 до 14 кА); коефіцієнт обмеження струму $K_{\text{обм}}$ (від 2,15 до 2,63 і від 1,35 до 1,63), а також повний термін часу вимикання $t_{\text{вим}}$ (від 16,2 до 17,2 мс).

Камера ШВ типу ВАБ-206 менш енергетично напружена під час вимикання ($W_{\text{кам}} = 179{,}3$ кДж), ніж в 2хВАБ-43 й 2хВАБ-49, для яких $W_{\text{кам}}$ відповідно дорівнює 231,6 й 192,6 кДж. Невелике значення коефіцієнту обмеження $K_{\text{обм}}$, який характеризує швидкість зростання напруги на дузі, свідчить про високоефективну роботу саме дугогасної камери з деіонізуючою решіткою ШВ типу ВАБ-206. Про це неодноразово зазначалося в наукових публікаціях, присвячених впровадженю цих захисних апаратів в умовах Укрзалізниці [158].

Слід зазначити, що автором під час аналізу осцилограм своїх і виконаних іншими інженерами і науковцями неодноразово спостерігався ефект повторного загорання дуги. При їх аналізу цей ефект у більшості випадків спостерігається у випадку фідерних чарунок з поодинокими ШВ, наприклад UR-40-64S Secheron. В пункті 2 технічних вказівок (ТВ) [159] зазначено, що допускається використання по одному ШВ у фідерній чарунці «при умові, якщо при всіх, у тому числі і найбільш тяжких режимах перехідних процесів під час коротких замикань, вимикачі будуть працювати у межах своїх технічних характеристик». Крім того, в п. 5 [159] також зазначено, що «у разі заміни вимикачів старих типів на один нового типу на підстанціях з дванадцятипульсними схемами випрямлення рекомендується знижувати індуктивність реактора до 4,5-5 мГн». Проте на більшості ТП, де у фідерних чарунках встановлені поодинокі ШВ, поряд працюють послідовно з’єднані старі автомати інших типів (ВАБ-43, АБ-2/4). Тобто, для нормальної роботи фідерних захисних апаратів нового покоління відповідальним особам дистанцій електропостачання слід особливо звертати увагу на технічні вказівки, і

зокрема [159], Головного управління електрифікації та електропостачання Укрзалізниці.

Слід нагадати про існування ТВ Міністерства шляхів сполучень СРСР [160], які встановлюють терміни та умови при яких необхідно виконувати періодичні (5 років) та неперіодичні досліди штучного КЗ. Метою цих дослідів є аналіз роботи та відповідне підвищення ефективності обладнання ТМ та ТП в таких небезпечних аварійних режимах якими є КЗ. Нажаль, останніми роками про ці ТВ забули, або з ряду причин відсутня можливість виконання цих дослідів. Проте, автори наголошують, що з впровадженням нової сучасної апаратури фідерної автоматики, як ніколи доцільне виконання вищезазначеного ТВ.

Вимикач типу VR-40-64S Sesheron помітно уступає за основними параметрами розглянутим вище трьом типам ШВ: він має високий коефіцієнт обмеження струму, а також найбільші значення повного терміну часу вимикання, значні ампер-секунди в місці КЗ і високу енергетичну напруженість роботи дугогасних камер (див. стовпці 6...10 табл. 3.2).

Завершуючи описання експериментів, проведених з метою дослідження ШВ різних типів, слід вказати на особливу небезпеку виникнення КЗ в ТМ. Під час покадрового перегляду відеозапису моменту торкання штанги до фіксатора, на кадрі, що отриманий через 0,04 с після моменту торкання, явно видно основну електричну дугу 1 (рис. 3.11), а також дугу, що виникла як наслідок недостатньо надійної фіксації струнового з'єднувача до фіксатора 2 (рис. 3.11). Це означає, що пошкодження контактної мережі під час КЗ можуть виникати не тільки в точці самого КЗ, але і в будь-якому наближеному до КЗ місці з поганою фіксацією арматури.

На закінчення зазначимо, що цей порівняльний аналіз дає лише наближену оцінку ефективності роботи досліджених ШВ, тому що він виконаний: при різних відстанях місця КЗ від випробуваної підстанції; при різних струмах уставки; на різних фідерних ділянках, а отже, при різних тягових умовах (навантаженнях) тощо. Імовірно, для дотримання всіх умов випробування

ШВ необхідно ці випробування провести методами моделювання, математичного або комп'ютерного (імітаційного).

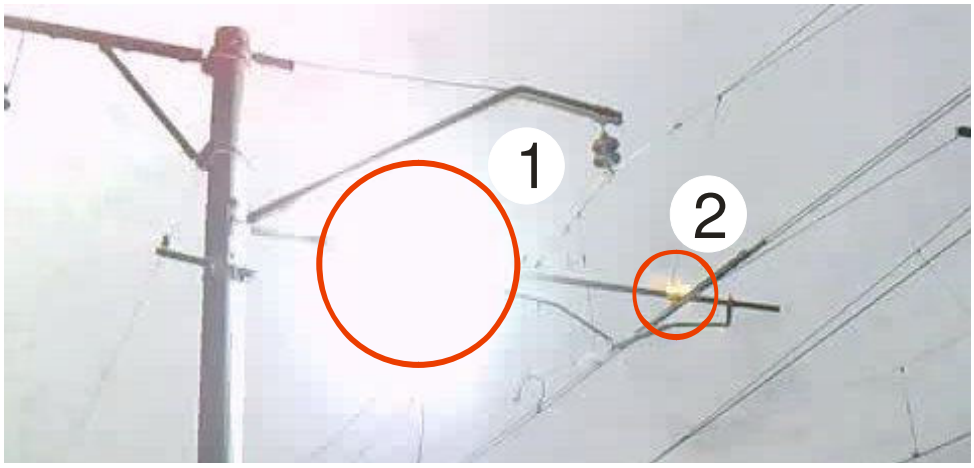


Рисунок 3.11 – Фото дуги в місці короткого замикання через 0,04 с після моменту торкання штанги до фіксатора: 1 – основна електрична дуга в точці короткого замикання; 2 – дуга, що виникла як наслідок недостатньо надійної фіксації струнового з'єднувача до фіксатора

3.3 Гармонійний склад фідерних струмів при аварійних вимиканнях швидкодіючих вимикачів

3.3.1 Теоретичні передпосилки

Роботи в аспекті визначення спектрального складу перехідних фідерних напруг та струмів, а також показників якості електроенергії і її втрати в аварійних режимах автору невідомі. Проте, наслідки досліджень таких режимів у цьому напрямку можуть бути дієвими, виходячи із багатьох задач, зокрема, втрат електроенергії, електромагнітної сумісності, спрацьовування захисту, безпеки обслуговуючого персоналу тощо.

Як відомо, напруги і струми в перехідних, особливо в аварійних режимах являють собою короткочасні, тривалістю τ, поодинокі неперіодичні імпульси (рис. 3.1 - 3.4). Передній фронт зростання струму обумовлений видом аварійного режиму, а також типом та конструктивними особливостями діагностичних систем та комутаційного обладнання, що застосовуються у

фідерних чарунках ТП. Спадаючий фронт струму КЗ визначається лише конструктивною особливістю дугогасної камери вимикача [72]. Таким чином, неперіодичні перехідні електричні величини є випадковими функціями часу, форма і параметри яких залежить від багатьох зовнішніх та внутрішніх факторів, що впливають на систему електричної тяги.

Визначимо спектр, точніше спектральну функцію $F(j\omega)$, імпульсу перехідної величини (напруги чи струму), як неперіодичної функції $f(t)$ за весь термін часу T її існування за умови розглядання цієї функції, що $T \to \infty$; для цього використаємо пряме перетворення Фур'є [161]:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt . \qquad (3.7)$$

Згідно з (3.7) неперіодична $f(t)$ може бути представлена сумою нескінченно великої кількості нескінченно малих синусоїдних коливань нескінченно близьких за частотою [162]. Комплексна амплітуда кожного окремого коливання нескінченно мала і дорівнює:

$$d\underline{C} = \frac{1}{n} \cdot F(j\omega) d\omega . \qquad (3.8)$$

Частотний інтервал між двома сусідніми коливаннями також нескінченно малий і дорівнює $d\omega$; отже має місце неперервна послідовність усіх частот (суцільний спектр). Тобто, у випадку інтеграла Фур'є (3.7) сума не володіє істотною властивістю своїх доданків, що треба пам'ятати при спектральному розкладанні за Фур'є.

Для визначення частотного спектру за виразом (3.7) інтегрування здійснюється в нескінченних межах. Однак для знаходження нових певних ознак, на яких базувався б релейний захист тягового електропостачання (або з іншою метою), часто потрібно розглядати лише частину імпульсу перехідної величини, найчастіше початкову його частину (фронт) поточною тривалістю *t*. Тому для спектрального аналізу лише цієї частини імпульсу введемо поняття поточного спектра $F_t(j\omega)$ [163], для визначення якого інтегрування в

(3.7) може бути виконано в межах від t_0 (початку процесу) до поточного моменту часу t існування імпульсу (рис. 3.12):

$$F_t(j\omega) = \int_{t_0}^{t} f(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{0}^{t} f(t) e^{-j\omega t} dt . \qquad (3.9)$$

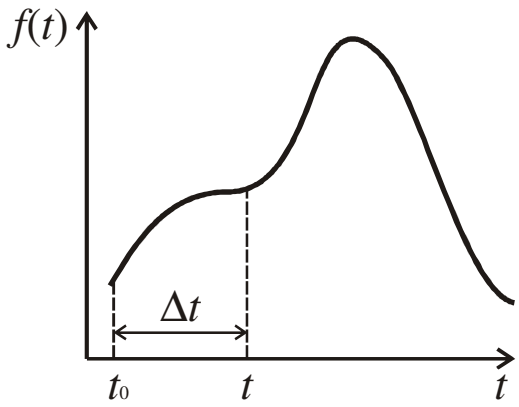


Рисунок 3.12 – Представлення ділянки неперіодичної функції, що підлягає спектральному аналізу

Спектр короткого відрізку імпульсу, за невеликий термін часу від його початку, однорідний, бо це спектр короткого імпульсу.

Уведення поняття поточного спектру значно розширює уявлення спектрального аналізу, бо воно перекидає місток між частотним і часовим описанням перехідного процесу. Для подальшого зближення частотної і часової точок зору розглянемо ще одне поняття: поняття миттєвого спектру, введеного Пейджем [164] для потужності (миттєвий спектр потужності) у вигляді:

$$p(\omega,t) = \frac{d}{dt}\left|F_t(j\omega)\right|^2, \qquad (3.10)$$

де $F_t(j\omega)$ - поточний спектр.

Інтеграл від миттєвого спектру потужності по всій вісі частот дає миттєву потужність

$$\frac{1}{\pi}\int_{0}^{\omega} p(\omega,t) d\omega = p(t), \qquad (3.11)$$

а інтеграл від $p(\omega,t)$ за часом дає квадрат модуля поточного спектру

$$\int_{-\omega}^{t} p(\omega,t)dt = \left|F_t(j\omega)\right|^2. \qquad (3.12)$$

Однак з розрахунковою метою доцільно мати більш простіший вираз миттєвого спектру, який можна записати у вигляді (рис. 3.13) [165]:

$$F_t(j\omega,t) = \int_{t-T}^{t} f(\tau)e^{-j\omega T}d\tau. \qquad (3.13)$$

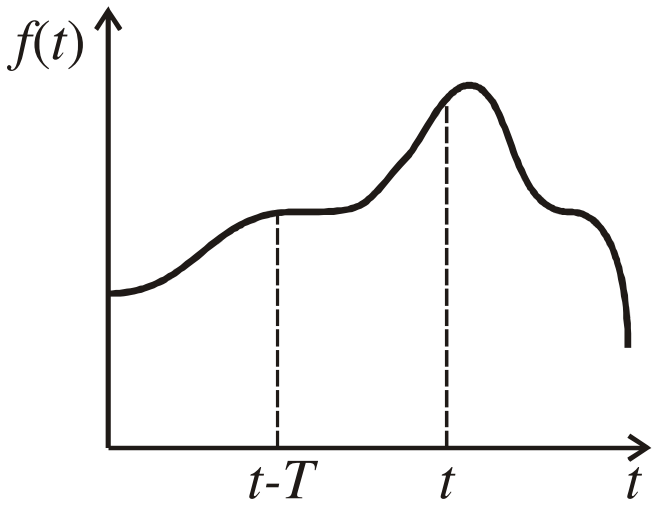


Рисунок 3.13 – Встановлення меж неперіодичної функції для визначення миттєвого спектру

Тобто, миттєвий спектр визначається як спектр відрізка імпульсу тривалістю T, що безпосередньо передує даному моменту часу t. У виразі (3.13) ми маємо справу з «ковзним» інтегруванням: це коли інтервал інтегрування має постійну довжину, але переміщується по вісі часу; розташування ж інтервалу незмінне відносно поточного моменту t.

Як відомо, для розв'язання багатьох задач, зокрема електромагнітної сумісності, потрібен дискретний спектр перехідних величин, а в той час як поточний, так і миттєвий спектри є суцільними і отже мають усі частоти. Тому для використання цих спектрів будемо визначати діапазон частот цього суцільного спектру, в якому зосереджена значно переважна частина електроенергії W розглядуваної перехідної величини. Цей діапазон частот називають «ефективною шириною спектру» або просто – «шириною спектру», $\Delta\omega$, а інколи ще простіше – «спектром».

Як відомо, зв'язок між енергією неперіодичної електричної величини $f(t)$ та її спектром $F(j\omega)$ дається рівнянням теореми Рейлі (рівністю Парсеваля) [162]:

$$W = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} F^2(\omega)\,d\omega \qquad (3.14)$$

або з урахуванням понять і формул (3.9) і (3.13) поточного і миттєвого спектрів можна записати відповідно як:

$$W_t = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} F_t^2(\omega)\,d\omega, \qquad (3.15)$$

$$W_T = \frac{1}{\pi}\int_{t-T}^{t} F_T^2(\omega)\,d\omega. \qquad (3.16)$$

При спектральному аналізі за допомогою поточного і миттєвого спектрів будемо виділяти в імпульсі досліджуваної перехідної величини певний інтервал Δt (мініімпульс) (рис. 3.12) з шириною спектру Δf, який і потрібен для розв'язування практичних задач. Між тривалістю Δt і шириною імпульсу $\Delta\omega$ існують різні співвідношення в залежності від форми мініімпульсу [163]:

для прямокутного:

$$\Delta t \cdot \Delta f = 1, \qquad (3.17)$$

для трикутникового:

$$\Delta t \cdot \Delta f = 2. \qquad (3.18)$$

Із виразів (3.17) і (3.18) при заданій тривалості Δt може бути знайдена ефективна ширина спектру. Особливо це стосується формули (3.17), оскільки тривалість Δt мініімпульсу мала і тому він може бути представлений як прямокутний мініімпульс.

З практичної точки зору також важливо знати, при якій найменшій тривалості Δt буде найменша ширина спектру Δf, тобто щоб добуток $\Delta t \cdot \Delta f$ мав найменше значення. В [163] мінімізація цього добутку дала таке співвідношення:

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\sqrt{3\pi}} = 0{,}046\,. \qquad (3.19)$$

Отже, із виразів (3.17)-(3.19) випливає, що в загальному випадку добуток тривалості мініімпульсу і ширини спектру являє собою деяку сталу величину, яка залежить від форми імпульсу, а також його параметрів Δt і Δf.

Як відомо [166, 167], фідерна напруга, напруга в тяговій мережі і на струмоприймачі ЕРС, параметри ТМ, а також, і особливо, тягове навантаження є випадковими процесами чи величинами. Тому і всі перехідні величини $a(t)$, в аварійному чи експлуатаційному режимах, є також випадковими (рис. 3.14), в яких окремий імпульс є детермінованим. У зв'язку з цим розглянемо поняття поточного та миттєвого спектрів відносно випадкових імпульсів.

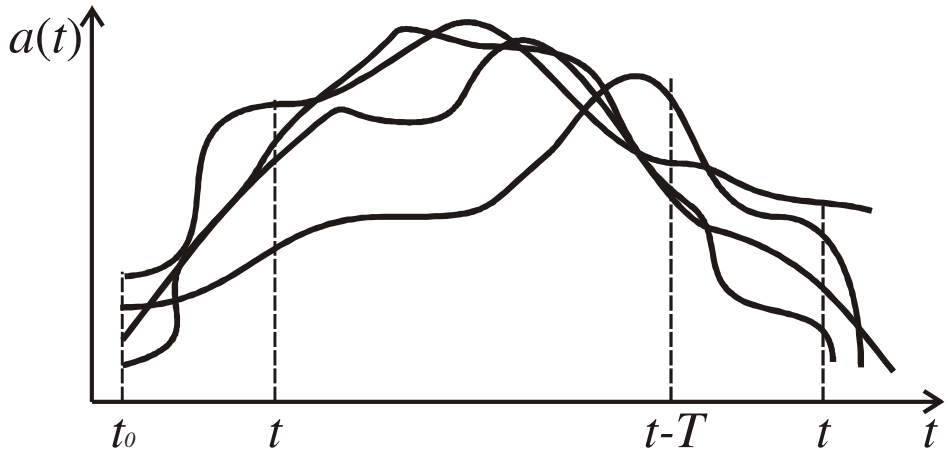


Рисунок 3.14 – Представлення неперіодичної стахостичної перехідної електричної величини

За аналогією з формулами (3.9) і (3.13) запишемо вираз поточного спектру однієї реалізації випадкової функції $a(t)$ (рис. 3.14)

$$F_T^{(1)}(j\omega) = \int_{t-T}^{T} a(t) e^{-j\omega t} dt\,, \qquad (3.20)$$

а миттєвого – у вигляді (рис. 3.14)

$$F_t^{(1)}(j\omega) = \int_{0}^{t} a(t) e^{-j\omega t} dt\,. \qquad (3.21)$$

Оскільки $a(t)$ - випадкова функція часу t, то і спектри $F_T^{(1)}(j\omega)$, $F_t^{(1)}(j\omega)$ будуть випадковими функціями змінної ω.

3.3.2 Результати чисельних розрахунків

Виконаємо гармонійний аналіз перехідних електричних величин, представлених на рис. 3.1-3.4. Враховуючи вимоги міжнародного стандарту IEEE 519-1992, згідно якого для визначення інтегрального показника гармонійного складу струму необхідно враховувати 49 гармонік [168], приймаємо $\kappa = 50$. Врахувавши те, що перехідний процес навіть при ближньому короткому замиканні не може тривати менше $T = 0,02\ c$, отримаємо $\Delta t = 0,2\ мс$.

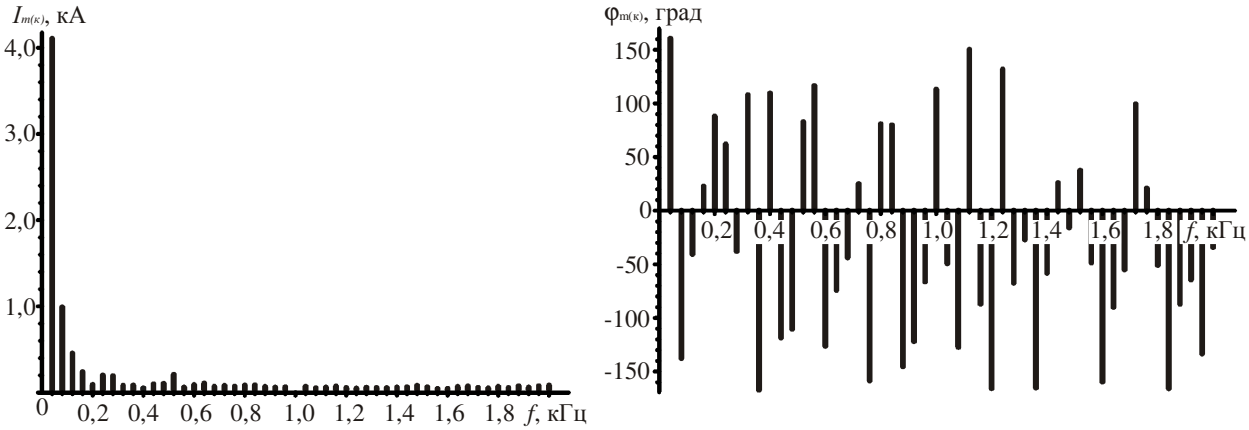
З практичної точки зору, великий інтерес викликає спектральний склад струму, що протікає через фідерну чарунку. На рис. 3.15 представлено дискретні спектри амплітуди і фази такого струму при короткому замиканні, який був вимкнений ШВ типу ВАБ-43 [169]. При цьому слід зазначити, що по вісі абсцис відкладені номери гармонік $\kappa = 1...50$.

У таблицях 3.3, 3.4, 3.5 представлені спектрограми відповідно перехідних струму $i(t)$, напруги $u_{\text{п}}(t)$ фідера, а також напруги дуги $u_{\text{д}}(t)$ в камері ШВ при аварійному режимі короткого замикання її роботи [170-172]. В цих таблицях: K_{Φ} – коефіцієнт форми; $K_{\text{А}}$ – коефіцієнт амплітуди; $K_{\text{СП}}$ – коефіцієнт спотворення; K_{Γ} – коефіцієнт гармонік; $\delta^{[0]}$ – вагова частка нульвої гармоніки; $\delta^{[1]}$ – вагова частка основної гармоніки; $\delta^{[k\geq 2]}$ – вагова частка вищих гармонік.

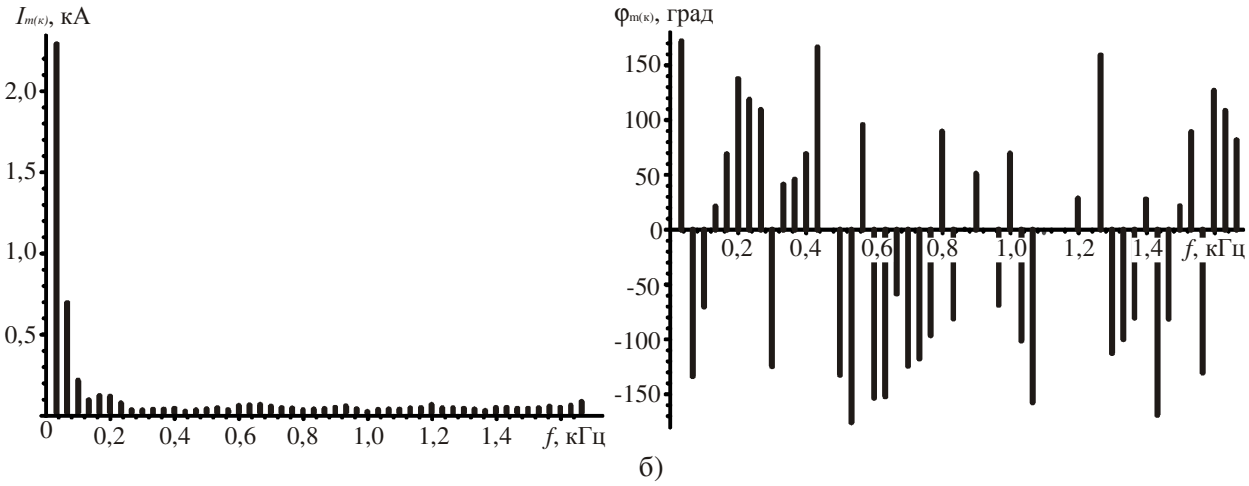
Правильність визначення коефіцієнтів ряду Фур'є (3.7) підтверджуємо його відповідністю до розкладеної реалізації $a(t)$. Побудуємо на одному графіку (рис 3.16) осцилограму (крива 1) напруги на затискачах тягової підстанції та відтворену за рядом функцію (крива 2), що містить $\kappa = 15$ гармонійних складових:

$$u_{\text{тп}}(t) = 2972{,}9 + 1021{,}7\sin(\omega t + 144{,}2°) + 347{,}6\sin(2\omega t + 184{,}2°) +$$
$$+ 436{,}8\sin(3\omega t + 211{,}6°) + ... + 25{,}04\sin(15\omega t + 75{,}5°) \text{ В},$$

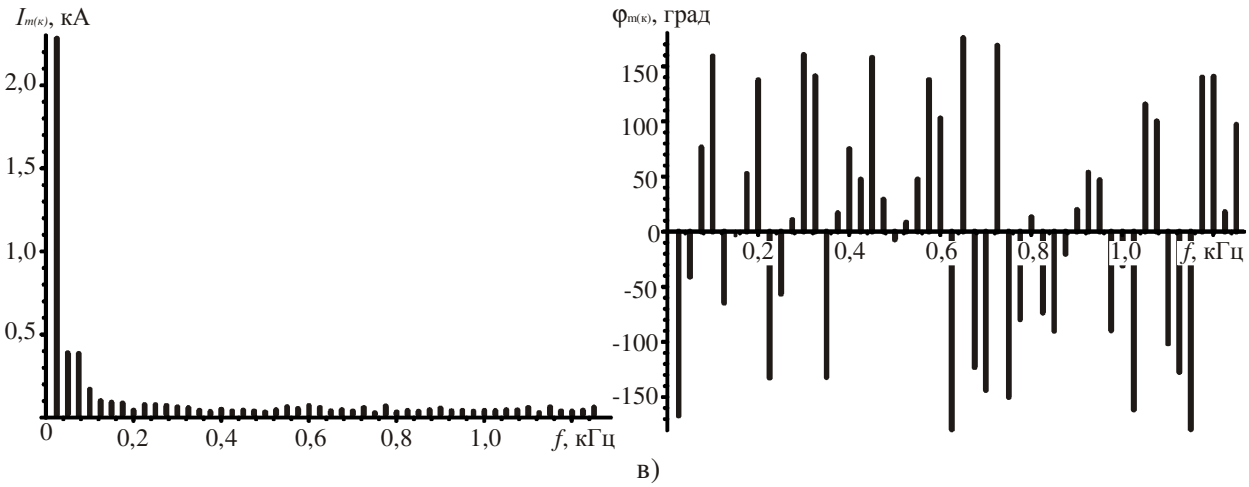
де $\omega_1 = 2\pi f_1$ - кутова частота основної гармоніки.



а)



б)



в)

Рисунок 3.15 – Дискретні спектри амплітуди і фази струму короткого замикання при вимиканні його фідерним автоматом ВАБ-43: а) близьке КЗ; б) середнє КЗ; в) дальнє КЗ

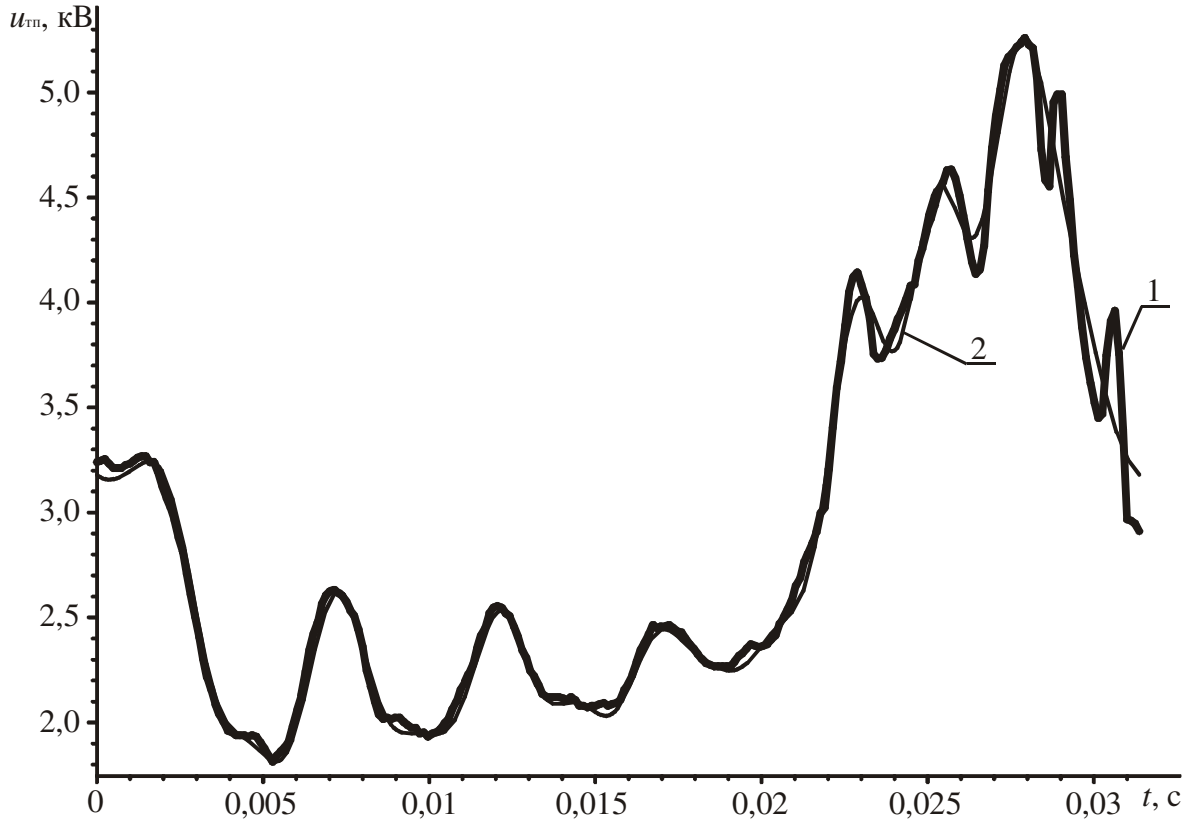


Рисунок 3.16 – Графіки зміни напруги та затискачах тягової підстанції при короткому замиканні: 1 – експериментальна крива; 2 – відтворена за рядом

У роботі [173] зазначено, що відомі в класичній електротехніці коефіцієнти, які характеризують форму кривих несинусоїдних електричних величин, (таблиці 3.3-3.5) можливо застосувати для визначення властивостей сигналів довільної форми. На думку авторів роботи [173], це може бути прийнятним, якщо врахувати припущення щодо періодизації неперіодичної функції перехідної електричної величини. Крім того, на сьогодні, відповідно до міжнародних стандартів якості енергоспоживання, таких як IEC61000-3, IEEE 519-1992, TN 61000-3-2, важливою величиною оцінки є також інтегральний показник гармонічного складу електричної величини K_{THD} (Total Harmonik Distortion) [168]:

$$K_{Г} = K_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{к=2}^{49} A_{(к)}}}{A_{(1)}},$$

де $A_{(1)}$, $A_{(к)}$ - діюче значення відповідно першої та *к*-ої гармонійної складової.

Таблиця 3.3

Спектральний склад струму фідера при різних видах короткого замикання тягової мережі постійного струму

Тип ШВ	Вид КЗ		Частота основної гармоніки, Гц	Амплітудний спектр за номерами гармонік, А									Коефіцієнти				Частка енергії, %		
				0	1	2	3	4	5	6	…	50	$K_Ф$	$K_А$	$K_{СП}$	$K_Г$	$\delta^{[0]}$	$\delta^{[1]}$	$\delta^{[k\geq 2]}$
ВАБ-43	1	Близьке	40,0	4026,8	4071,6	955,7	418,1	203,6	54,5	163,5	…	48	1,13	1,54	0,44	0,37	77,5	19,8	2,7
	2	Середнє	33,3	2441,2	2271	677	198,7	78,1	103,2	100,2	…	67,6	1,1	1,44	0,4	0,4	81,4	16	2,6
	3	Дальнє	25,0	1838,6	2263,2	369,5	366,1	149,1	81,4	72,3	…	42,5	1,11	1,45	0,41	0,38	80,5	17	2,5
ВАБ-49	4	Близьке	48,5	4520,4	3001,4	1057,8	357	149	254,4	91,9	…	1,58	1,12	1,5	0.42	0,39	79,7	17,6	2,7
	5	Середнє	16,6	1928,3	1356,1	644,8	151,6	84,8	38,8	20,2	…	3,9	1,14	1,66	0,43	0,49	76,5	18,9	4,6
	6	Дальнє	22,9	2022,3	1332,6	367,5	124,1	44,8	55,4	41,9	…	0,5	1,11	1,43	0,41	0,3	80,9	17,5	1,6
ВАБ-206 (Горяйнове)	7	Близьке	44,9	5909,8	4754,5	1166,2	318,2	233,6	279,7	186	…	11,9	1,16	1,57	0,49	0,28	74,2	24	1,8
	8	Дальнє	28,6	3938,4	3002,1	631	127	200,7	95,7	40	…	3,04	1,14	1.55	0,47	-,23	76,6	22,2	1,2
SECHER ON	9	Близьке	17,2	4823,8	3515,8	610,6	952,1	982,2	594.3	223	…	11,1	1,15	1,82	0,47	0,5	74,9	19,9	5,2
	10	Дальнє	16,7	2211,9	1075,4	529,3	310	201,8	138,3	96,5	…	11,6	1,08	1,39	0,32	0,63	85,9	10,2	3,9
ВАБ-206 (Н-Д Вузол)	11	Близьке	20,1	3043,7	2517,4	928,8	212	34	83,5	6,11	…	7,75	1,17	1,67	0,5	0,39	73.4	25,1	1,5

Таблиця 3.4

Спектральний склад напруги на затискачах тягової підстанції при різних видах короткого замикання тягової мережі постійного струму

Тип ШВ	Вид КЗ		Частота основної гармоніки, Гц	Амплітудний спектр за номерами гармонік, В									Коефіцієнти			
				0	1	2	3	4	5	6	…	50	$K_Ф$	$K_А$	$K_{СП}$	$K_Г$
ВАБ-43	1	Близьке	40,0	2514,8	2679,7	908,6	257,3	429,9	167,8	390,5	…	27,2	1,41	2,59	0,56	0,78
	2	Середнє	33,3	2946,8	1532,6	826,9	284,4	86,2	118,4	401,3	…	17,2	1,09	2,1	0,28	1,02
	3	Дальнє	25,0	2972,9	1021,7	347,6	436,8	212,6	175,3	274,5	…	20,3	1,06	1,8	0,25	0,91
ВАБ-49	4	Близьке	48,5	2059,5	1943,9	1219,1	601	380,7	359,4	184	…	15,6	1,31	2,25	0,51	0,78
	5	Середнє	16,6	2907,5	607,2	346,7	297,3	48,9	106,6	107,1	…	4,26	1,02	1,39	0,14	0,87
	6	Дальнє	22,9	3121,6	631,2	354,7	150	96,4	85,3	92,1	…	4,63	1.02	1,31	0,14	0,69
ВАБ-206 (Горяйнове)	7	Близьке	44,9	610,6	212,3	361,5	283,7	177,5	219,2	179,7	…	39,2	1,3	4,18	0,19	3,4
	8	Дальнє	28,6	1867,6	2153,1	897,3	293,8	382,7	305,4	230,2	…	33,8	1,07	1,79	0,76	0,55
ВАБ-206 (Н-Д Вузол)	11	Близьке	20,1	2274,4	2213,1	1114,3	275.2	139,3	185,4	155,4	…	12,5	1,27	2,05	0,54	0,54

Таблиця 3.5

Спектральний склад напруги дуги в камері ШВ при різних видах короткого замикання тягової мережі постійного струму

Тип ШВ	Вид КЗ		Частота основної гармоніки, Гц	Амплітудний спектр за номерами гармонік, В									Коефіцієнти			
				0	1	2	3	4	5	6	…	50	$K_Ф$	$K_А$	$K_{СП}$	$K_Г$
ВАБ-43	1	Близьке	40,0	2087,4	3297,9	1946,9	730,7	152	426,6	361,9	…	41,1	1,88	2,47	0,65	0,83
	2	Середнє	33,3	2281,1	3654,6	2110,5	1030,4	531,2	271,3	196	…	104,6	1,94	2,74	0,63	0,93
	3	Дальнє	25,0	2169,6	3255	1508,9	929,2	931,2	633,8	265,7	…	38	1,96	2,71	0,62	0,94
ВАБ-49	4	Близьке	48,5	1350,7	2321,3	1494	800	468,4	412,3	396,6	…	33,7	1,88	2,48	0,64	0,85
	5	Середнє	16,6	1033,4	1876	1388,6	817,1	404,5	277,7	245,1	…	36,9	2.05	2,53	0,62	0,97
	6	Дальнє	22,9	1980,6	3213,7	1743,8	812,3	441,4	530,7	467,7	…	42,6	1,72	2,14	0,67	0,7
ВАБ-206 (Горяїнове)	7	Близьке	44,9	1462,9	2524	1603,3	780,5	505,1	401,1	198,5	…	40,1	1,84	2,83	0,66	0,78
	8	Дальнє	28,6	2023,6	3027,5	1103,2	296,7	345,3	175	240,7	…	36,3	1,53	1,96	0,69	0,44

Результати розрахунків зазначених коефіцієнтів для різних перехідних електричних величин приведені у таблиці 3.3, із якої випливає, що частота основної гармоніки фідерного струму при всіх видах КЗ складає 15...50 *Гц* і вона співпадає з частотами сигнального струму в лінії СЦБ та зв'язку. До того ж, згідно рівняння Парсеваля теореми Рейлі [162],

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} a^2(t)dt,$$

було визначено енергію перехідних напруги та струму при різних режимах роботи КЗ, а також енергію нульових $W_{(0)}$, та перших $W_{(1)}$ гармонійних складових. Крім того за формулою [173]

$$\delta^{[\kappa]} = \frac{W_{(\kappa)}}{W} 100\%$$

встановлено вагові частини нульової $\delta^{[0]}$, першої $\delta^{[1]}$ та вищих $\delta^{[\kappa\geq 2]}$ гармонік по відношенню до енергії перехідних величин. Сумарні потужності нульової та першої гармоніки в різних випадках досягають ~96%. Частка вищих гармонік коливається в інтервалі від $\delta^{[\kappa\geq 2]} = 1,5...6\,\%$, який залежить від форми імпульсу перехідної величини. Якщо ямпульс вертикально видовжений, як наприклад для $u_{\text{д}}(t)$ і має значення відмінні від 0 не на всьому періоді перехідного процесу, то частка вищих гармонік збільшується. Крім того, з таблиці 3.3 випливає, що для імпульсів складної форми, як наприклад для $u_{\text{п}}(t)$, значення амплітуди основної гармоніки зменшується, а нульової та вищих збільшується.

Отже, впливом аварійних режимів в СТЕП не можна нехтувати при оцінці електромагнітної сумісності тягової мережі постійного струму з лініями СЦБ та зв'язку, що проходять поряд, а також при визначені енергетичних показників пристроїв електричної тяги.

3.4 Енергетичні показники систем тягового електропостачання в режимі короткого замикання

Існуюча на сьогоднішній день в електричних колах систем електротяги традиційна класична система показників ефективності електроенергетичних процесів включає показники, що подані в роботах О. Маєвського [174] та Г. Зінов'єва [175]: коефіцієнт зсуву фаз основної гармоніки несинусоїдного струму відносно вхідної синусоїдної напруги ($\cos\varphi_{(1)}$); коефіцієнт спотворення форми струму по відношенню до форми напруги (ν); коефіцієнт несиметрії навантаження по фазах ($K_{\text{НС}}$); коефіцієнт нерівномірності споживання електроенергії ($K_{\text{НР}}$). Ці коефіцієнти базуються на співвідношеннях відповідних потужностей активної P, реактивної $Q_{(1)}$, спотворення D, несиметрії $H_{\text{С}}$, нерівномірності $H_{\text{Р}}$ та повної S. Автори [174, 175] розглядали системи лише з вхідною синусоїдною напругою. Тому $\cos\varphi_{(1)}$, P і $Q_{(1)}$ визначались лише для першої гармоніки. У випадку несинусоїдних напруги та струму коефіцієнт $\cos\varphi$ буде коефіцієнтом зсуву за фазою між кривими напруги та струму, потужність Q буде реактивною потужністю по Будеану $Q_{\text{В}}$, а потужність P буде обумовлена однойменними гармоніками напруги і струму.

Загальним показником в цій системі є коефіцієнт потужності λ, який мультиплікативно об`єднує всі зазначені локальні коефіцієнти [176-180]:

$$\lambda = (\cos\varphi)\cdot\nu\cdot K_{\text{НС}}\cdot K_{\text{НР}}. \qquad (3.22)$$

Викладена вище система енергетичних показників базується на гармонійному підході і тому, по-перше, може призвести до невизначеності та ускладнень при характеристиці потоків енергії, коли вже треба оперувати з інтегралами функцій енергії. По-друге, вона володіє негативними сторонами, що обумовлюють неоднозначність розв'язання проблеми оцінки ефективності процесів передачі, споживання і перетворення електроенергії. Тому розглянута вище система повинна бути доповнена іншими показниками, які б у першу чергу оцінювали ступінь споживання реактивної енергії й тим самим

ступінь якості електроенергії. Таким показником, на нашу думку, можуть бути додаткові втрати електроенергії в елементах системи електротяги, бо лише вони базуються на усіх факторах неякісності енергії і відображають економічну сторону як енергопостачання, так і енергоспоживання [178-181]. Ці втрати характеризують не лише технічну сторону транспортування електроенергії від ТП до ЕРС, але і якість організації та контролю електроенергетичних процесів в СЕТ.

Для отримання оцінки додаткових втрат електроенергії в перехідних режимах скористаємося концепцією С. Фризе [182, 183], що відображає вплив різних факторів неякісності електроенергії при модуляції сигналів струму та напруги. Реактивна потужність Фрізе є найбільш повною характеристикою енергетичних процесів в системі генератор-споживач з точки зору ефективності передачі енергії [184-186]. Згідно цієї концепції додаткові втрати активної електроенергії в споживачі R за термін $[0...T]$ будуть визначатися виразом [178-180]:

$$\Delta W_{\text{д}T} = \frac{1}{T}\int_0^T R \cdot i_{\text{р}}^2(t)\,dt = \frac{Q_{\Phi T}^2 \cdot R}{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)dt} = \frac{P_T^2 \cdot R}{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)dt} \cdot tg^2\varphi, \qquad (3.23)$$

де $Q_{\Phi T}$ та P_T - реактивна та активна потужності, що споживаються навантаженням R.

Таким чином, використання потужності Фрізе $Q_{\Phi T}$ у якості критерія оцінки додаткових втрат при передачі електроенергії дозволяє визначити величину цих втрат в усталених процесах і в перехідних режимах [184-186]. Як випливає із виразу (3.23), для визначення $\Delta W_{\text{д}T}$ і потужностей, як енергетичних характеристик, а, отже, і власне енергетичних показників необхідно знання функцій перехідних напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ рис. 3.1-3.4. Задача визначення складових повної потужності на основі несинусоїдних кривих $u(t)$ і $i(t)$ вже розв'язувалась авторами робіт [166, 187, 188], але то були дослідження для часових залежностей неперервних технологічних коливань

випрямних напруги і струму в усталених режимах для добових і місячних регістрограм. Для визначення енергетичних показників системи електричної тяги в аварійних режимах з їх імпульсами напруги і струму виокристано наступні три методи [178-180]: метод наближення; метод дискретної електротехніки; метод спектрального аналізу

З використанням зазначених методів розраховано і в таблиці 3.6 представлено результати чисельних розрахунків показників енергообмінних процесів електроенергії в ТМ для аварійних режимів КЗ, а в таблиці 3.7 встановлено потужності та енергетичні показники дугогасних камер ШВ постійного струму. Вихідними даними є осцилограми рис. 3.1-3.4, а також параметри ТП і ТМ (таблиця 3.1).

Із аналізу таблиць випливає, що із віддаленням точки КЗ від ТП потужність короткого замикання у всіх випадках зменшується. Не дивлячись на те, що відстань до місця КЗ зростає, а відповідно зростає і величина опору R у всіх випадках, додаткові втрати електроенергії зменшуються. Причиною такого явища є те, що в режимі КЗ відстань не є визначальною, адже саме величини перехідних $u(t)$ і $i(t)$ характеризують миттєве значення потужності [300]. Активна потужність короткого замикання, яке ліквідується застарілими зразками фідерних вимикачів, значно вище у порівнянні з новими ШВ; тобто за період існування КЗ в тяговій мережі контактний провід буде більше нагріватися. Натомість одна дугогасна камера нових типів ШВ розсіює приблизно таку ж кількість енергії, що і дві камери, наприклад, автомату типу ВАБ-43. Реактивною потужністю процесу КЗ – є потужність спотворення.

Таблиця 3.6

Основні енергетичні показники режиму КЗ в тяговій мережі постійного струму

Тип ШВ	Вид КЗ		Енергетичні показники							
			$S_T\,10^7$, ВА	$P_T\,10^7$, Вт	$Q_{(1)}\,10^6$, вар	$Q_Ф\,10^7$, вар	$D\,10^7$, ВА	λ	$tg\varphi$	$\Delta W_{дТ}\,10^7$, Вт
ВАБ-43	1	Близьке	1,95	1,05	-3,1	1,64	1,64	0,48	1,55	0,94
	2	Середнє	1,23	0,94	-0,56	0,8	0,8	0,76	0,85	0,24
	3	Дальнє	1,04	0,84	-0,5	0,62	0,62	0,803	0,74	0,14
ВАБ-49	4	Близьке	1,64	0,96	-2,1	1,33	1,33	0,47	1,39	0,66
	5	Середнє	0,94	0,78	-0,15	0,52	0,52	0,83	0,67	0,17
	6	Дальнє	0,86	0,74	-0,2	0,45	0,45	0,86	0,604	0,13
ВАБ-206 (Горяїнове)	7	Близьке	0,55	0,31	0,43	0,44	0,44	0,9	1,42	0,81
	8	Дальнє	0,9	0,49	3,09	0,76	0,76	0,55	1,53	0,57
ВАБ-206 (Н-Д Вузол)	11	Близьке	1,31	0,79	-2,43	1,04	1,04	0,25	1,31	0,44

Таблиця 3.7

Основні енергетичні показники дугогасної камери ШВ режиму КЗ в тяговій мережі постійного струму

Тип ШВ	Вид КЗ		Енергетичні показники						
			$S_T\ 10^7$, ВА	$P_T\ 10^7$, Вт	$Q_{(1)}\ 10^6$, вар	$Q_Ф\ 10^7$, вар	$D\ 10^7$, ВА	λ	$tg\varphi$
ВАБ-43	1	Близьке	1,95	1,05	-2,9	2,02	2,02	0,36	2,6
	2	Середнє	1,23	0,94	-5,9	1,56	1,56	0,42	2,2
	3	Дальнє	1,04	0,84	-0,51	1,3	1,3	0,38	2,4
ВАБ-49	4	Близьке	1,6	0,59	-2,1	1,49	1,49	0,37	2,52
	5	Середнє	0,97	0,48	-1,8	0,84	0,84	0,49	2,76
	6	Дальнє	1,11	0,52	-0,21	0,98	0,98	0,47	1,9
ВАБ-206 (Горяїнове)	7	Близьке	1,84	0,18	-0,5	1,66	1,66	0,44	2,06
	8	Дальнє	1,39	0,66	-3,11	1,22	1,22	0,48	1,85

3.5 Моделювання режиму короткого замикання в системі тяги без електрорухомого складу

3.5.1 Елементи схеми заміщення системи тягового електропостачання

Розглянемо режим КЗ в ТМ без ЕРС при односторонній (консольній) і двосторонній схемах живлення (рис. 3.17 і 3.18). На цих рисунках: ТП1, ТП2 – тягові підстанції; ШВ1, ШВ2 – швидкодіючі фідерні вимикачі відповідних ТП; l – довжина фідерної зони; $x_{кз}$ – координата місця КЗ.

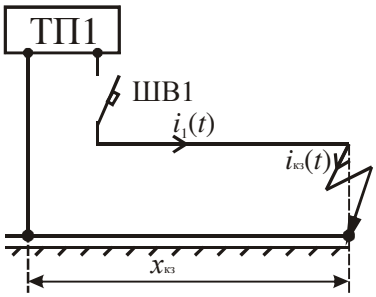


Рисунок 3.17 – Спрощена схема роботи СТЕП в режимі КЗ при односторонньому живлені

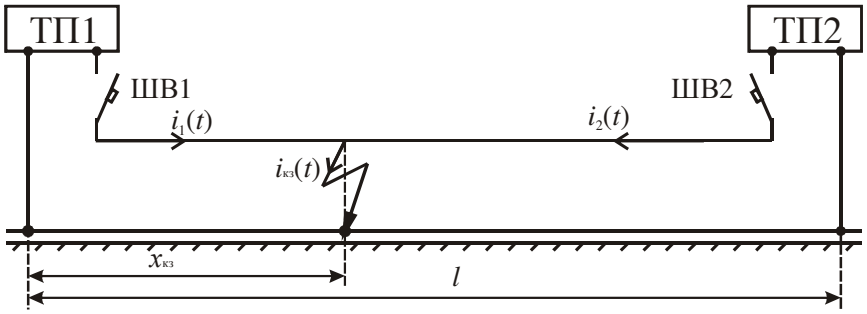


Рисунок 3.18 – Спрощена схема СТЕП в режимі КЗ при двосторонньому живлені

Розглянемо більш докладно елементи схеми заміщення СЕТ для кожного з розглядуваних режимів, а також визначимо їх параметри.

1. В математичній моделі прийнято, що ТП - це реальне джерело напруги із внутрішнім активно-індуктивним опором (рис. 3.18) [189]

Еквівалентна індуктивність перетворювального агрегату дорівнює [16]

$$L_{ТТ} = 0{,}5\left(L_Т + L_М\right), \qquad (3.24)$$

де $L_Т$ – індуктивність тягового трансформатора, Гн; $L_М$ – індуктивність первинної мережі, Гн.

Внутрішній опір підстанції з урахуванням опорів живильної мережі $R_{\text{М}}$, $X_{\text{М}}$, а також опорів трансформатора $R_{\text{Т}}$ і $X_{\text{Т}}$, можна визначити для N паралельно працюючих перетворювачів за формулами [190, 191]:

- для схеми дві зворотні зірки зі зрівняльним реактором

$$R = 0,239\left(X_{M} + \frac{X_{T}}{N} \right) + 0,5\left(R_{M} + \frac{R_{T}}{N} \right);$$

- для трифазної мостової схеми

$$R = 0,955\left(X_{C} + \frac{X_{T}}{N} \right) + 2\left(R_{C} + \frac{R_{T}}{N} \right).$$

Опір живильної системи з напругою мережі $U_{1Л}$ необхідно привести до напруги вторинної обмотки трансформатора U_{v0} за формулою:

$$X_{C}' = X_{C}\frac{3U_{\text{v0}}}{U_{1Л}^{2}}.$$

В роботі [9] внутрішній опір ТП представлено еквівалентним значенням, що дорівнює $R_{\text{ТП}} = 0,14$ Ом, тому в процесі моделювання для спрощення розрахунків приймемо це значення.

В якості основного елемента релейно-струмового захисту фідерів +3,3 кВ до сьогодні широко застосовують поляризовані ШВ ВАБ-43 з індуктивним шунтом, які реагують на значення струму уставки. Елементи схеми заміщення ШВ (рис. 3.19) та їх параметри [9, 15] такі: розмагнічуючий виток – $R_{\text{рв}} = 30 \cdot 10^{-6}$ Ом, $L_{\text{рв}} = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Гн; індуктивний шунт – $R_{\text{іш}} = 5,65 \cdot 10^{-6}$ Ом, $L_{\text{іш}} = 2,54 \cdot 10^{-6}$ Гн.

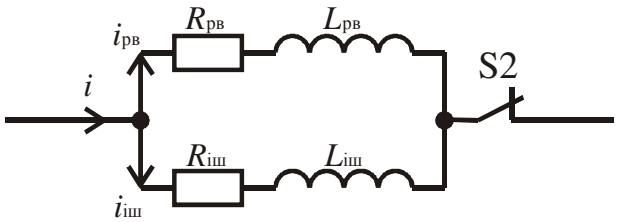


Рисунок 3.19 – Схема заміщення швидкодіючого вимикача

На ТП постійного струму найбільшого розповсюдження набула схема фідерної чарунки з двома послідовно увімкненими швидкодіючими вимика-

чами ШВ1 і ШВ2 [192]. Принцип їх сумісної роботи представлено в таблиці 3.8 [178], з якої випливає, що весь процес вимикання ТП при КЗ в СТЕП можна поділити на чотири періоди, що визначені часовими проміжками: T_I – інтервал часу до розходження контактів, наприклад, ШВ1, струм в ТМ зростає; T_{III} – до розмикання контактів іншого ШВ2 в наслідок не синхронної роботи двох ШВ;T_{IV} – контакти ШВ2 розмикаються, загоряється його дуга, інтенсивно горить дуга ШВ1, інтервал триває до досягнення струму КЗ максимального значення; T_V – інтервал триває до повного загасання електричних дуг ШВ1 і ШВ2. Час асинхронізму в процесі роботи двох ШВ1 і ШВ2 пояснюється наявністю їх конструктивних та експлуатаційних відмінностей.

Згідно робіт [20, 72] значення напруги дуги $u_{\text{д}}(t)$ в дугогасному пристрої можна вважати такою, що не залежить від величини струму і параметрів елементів розглядуваного кола. Таким чином, під час моделювання параметр $u_{\text{д}}(t)$ може бути заданим у вигляді заздалегідь відомої функції часу, яка визначається лише конструктивними особливостями дугогасної камери вимикача, в тому числі і камери з деіонізуючою решіткою. Найбільш раціональної є система дугогасного пристрою, який забезпечує інтенсивне зростання напруги на дузі в початковий період її розвитку до моменту обмеження струму і більш повільне зростання в подальший період гашення без утворення перенапруг в кінцевий момент відключення. Таку закономірність зміни струму і напруги забезпечує дугогасна камера. Максимальна швидкість зростання напруги обмежена повторним пробоєм іонізованого простору між контактами. Зменшення швидкості зростання напруги після обмеження струму КЗ легко досягається збільшенням ширини щілини і відповідним зменшенням напруженості магнітного поля дуття.

В даній роботі процес горіння дуги математично представлений у вигляді функціональної залежності напруги дуги $u_{\text{д}}(t)$ у часі її горіння, яка була запропонована в роботах [16, 18]:

$$u_{\text{д}}(t)=\begin{cases} bt, & 0\le t\le t_2; \\ b\left(t-t_{\text{вим}}\right)-b\left(t-t_2\right), & t_2\le t\le t_{\text{вим}}; \\ e_{\text{тп}}(t), & t\ge t_{\text{вим}}, \end{cases} \qquad (3.25)$$

де b – коефіцієнт, що характеризує крутизну наростання напруги дуги в дугогасній камері ШВ; t_2 – термін часу, на протязі якого струм після початку розходження контактів досягає максимуму; $t_{\text{вим}}\le 0{,}08\,\text{с}$ – повний термін часу вимикання [192, 193], що дорівнює:

$$t_{\text{вим}}=t_{\text{у}}+t_1+t_{\text{к}},$$

де $t_{\text{у}}$ – термін часу до досягнення уставки; t_1 – власний термін час спрацювання автомата; $t_{\text{к}}$ – термін часу, на протязі якого між контактами існує металевий розплавлений місток. Залежність зміни напруга дуги $u_{\text{д}}(t)$ ШВ визначається, головним чином, властивостями дугогасної камери (шириною щілини, напруженістю поля магнітного дуття) [18, 72].

Згідно таблиці 3.8, в період розрахунків T_{III} горить дуга ШВ1, а рівняння інтенсивності її горіння має вигляд $u_{\text{д1}}(t)=bt$. На етапі T_{IV} розрахунків рівняння горіння дуги ШВ1 має вигляд

$$u_{\text{д1}}(t)=bt_{\text{ас}}+bt,$$

а ШВ 2 –

$$u_{\text{д2}}(t)=bt,$$

де $u_{\text{д1}}(t), u_{\text{д2}}(t)$ – закони зміни напруги електричної дуги дугогасної камери відповідно ШВ1 і ШВ2.

На завершальному етапі розрахунків, після досягнення максимального значення струму фідера і до повного загасання дуги, горіння дуги ШВ1 і ШВ2 описується рівнянням, що відповідає складовій $b\left(t-t_{\text{вим}}\right)-b\left(t-t_2\right)$.

Таблиця 3.8

Пояснення процесу вимикання кола при КЗ за допомогою двох послідовно увімкнених ШВ

Режими роботи послідовно з'єднаних ШВ	Струм зростає і досягає уставки ШВ1	Струм продовжує зростати за час власного спрацювання ШВ1	Горить дуга ШВ1, вимикання ШВ2 запізнюється на час асинхронізму	Горить дуга ШВ1, вимикається ШВ2 через проміжок часу спрацювання ШВ1	Горить дуга ШВ1 та ШВ2, струм фідера досягає максимума	Горить дуга ШВ1 та ШВ2, струм фідера досягає 0
Положення контактів	(1;1)	(1;1)	(0;1)	(0;1)	(0;0)	(0;0)
Часові інтервали	t_{I-II}	t_{II-III}	t_{III-IV}		t_{IV-V}	t_V
Проміжні часові інтервали		t_{1-1} (термін час власного спрацювання ШВ1)		t_{1-2} (термін час власного спрацювання ШВ2)		
		t_{ac} (час асинхронізму) $t_{ac} < t_{1-1}$, чи $t_{ac} > t_{1-1}$				
Мить часу і значення струму		t_{y1} I_{y1}		t_{y2} I_{y2}	t_{max} I_{max}	$t_к$ $I_к = 0$
Вісь часу $t_0 = 0$						t, c
Період розрахунку	$T_I = t_0 + t_{y1} + t_{1-1}$		$T_{III} = T_I + t_{ac}$		$T_{IV} = T_{III} + t_{max}$	$T_V = T_{IV} + t_к$
Режим роботи СТЕП	Струм в тяговій мережі зростає доки контакти хоча б одного, наприклад, ШВ1 не вимкнуться. Цей інтервал включає термін часу досягнення уставки ШВ1 і власний час спрацювання ШВ1.		Струм в ТМ зростає. Вимкнений ШВ1, інтенсивно горить його дуга. Контакти ШВ2 розійдуться через проміжок часу асинхронізму (термін часу спрацювання ШВ1 і ШВ2 однакові).		Загоряється дуга ШВ2 інтенсивно горить дуга ШВ1. Струм КЗ зростає до максимального значення	Горять дуги ШВ1 та ШВ2. Струм КЗ в ТМ спадає до нуля

Цікавим, з точки зору розуміння принципу роботи двох послідовно з'єднаних ШВ, є їх модель, що створена в програмному забезпеченні MATLAB/Simulink (рис. 3.20) [152]. Перевагою створеної моделі, яку в розглядуваному питанні можна розглядати з точки зору функціонально-логічної схеми, є її споглядовістю. Модель роботи двох ШВ при моделюванні в MATLAB/Simulink являє собою підсистему, яка містить як S-, так і SPS-блоки. S-блоки підсистеми призначені для виконання логічних операцій та видачі сигналів для керування SPS-блоків, які застосовуються у якості силових елементів.

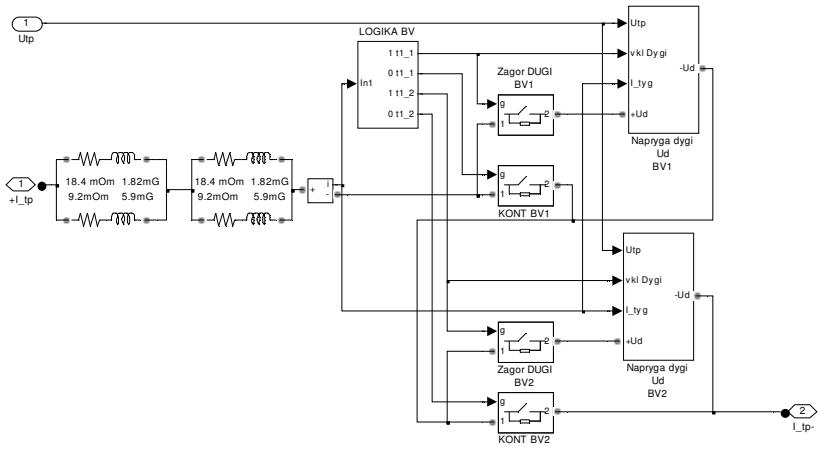


Рисунок 3.20 – Модель роботи двох послідовно з'єднаних ШВ в програмному забезпеченні MATLAB/Simulink

Головними елементами використовуваних на сьогодні фідерних ШВ типів АБ-2/4, ВАБ-43 є індуктивний шунт та розмагнічуючий виток, схема заміщення яких являє собою паралельне з'єднання RL-елементів. Для протікання струму в стаціонарному режимі по ШВ використовуються силові контакти KONT, початкове положення яких є замкнене. Значення сили струму в силовому колі моделі фіксується вимірювачем струму Current Measurement, який призначений для поєднання силового кола з підсистемою LOGIKA BV рис. 3.21, що здійснює логіку увімкнення відповідного ШВ чарунки.

Для встановлення уставки використовується S-блок Hit Crossing, який на своєму виході створює сигнал логіки «1» при перетині виміряним струмом

деякого значення уставки $I_{\text{у}}$. Після цього із затримкою, що відповідає власному терміну часу вимикання ШВ (час розходження контактів [192]), на виході підсистеми LOGIKA BV з'являються сигнали керування, що відповідають за вимикання силових контактів ШВ KONT і увімкнення кола горіння дуги в камері ШВ.

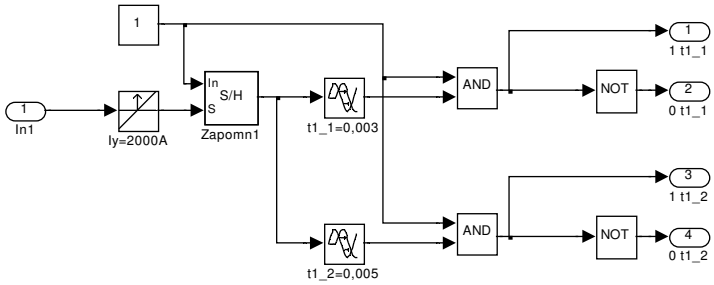


Рисунок 3.21 – Логічна схема вимикання ШВ

Для проходження струму в дузі використовуються силові контакти Zagor DUGI, які нормально розімкнені. Після увімкнення контактів Zagor DUGI починає працювати підсистема Napryga dygi Ud (рис. 3.22). Основним елементом цієї підсистеми є кероване джерело напруги Controlled Voltage Source, яке моделює горіння дуги в камері ШВ під дією закону його зміни $U_d(t)$. В свою чергу, закон зміни напруги дуги на затискачах ШВ, оснований на понятті інтенсивності горіння [13, 18, 194], задається за допомогою підсистеми Enabled Subsystem [195] ($U_d(t)$), який активується лише при наявності позитивного сигналу керування на його вході Enable (vkl Dygi).

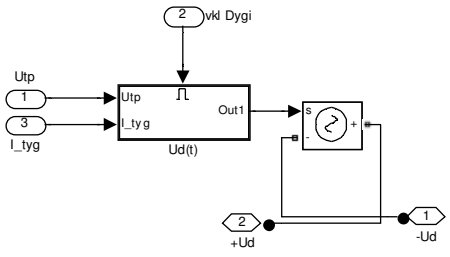


Рисунок 3.22 – Модель процесу горіння дуги

У випадку використання у ФЧ ШВ типу 2×ВАБ-49 скористаємося роботою [72]. Автори зобразили залежність зростання функції напруги дуги на двох послідовно увімкнених камерах вимикачів 2×ВАБ-49 у вигляді рис. 3.23. Крутизну наростання напруги еквівалентної сумісної дуги в дугогасних камерах ШВ на різних ділянках різна:

$$u_{\text{д}}(t) = b \cdot t = \begin{Bmatrix} b_0 = 0, & при\ \ t_1 = 6{,}34 \text{ мс}; \\ b_1 = 357, & при\ \ \Delta t_1 = 2{,}6 \text{ мс}; \\ b_2 = 2341, & при\ \ \Delta t_2 = 2{,}8 \text{ мс}; \\ b_3 = 87{,}5, & при\ \ \Delta t_3 = 3{,}4 \text{ мс}; \\ b_4 = 1353, & при\ \ \Delta t_4 = 1{,}5 \text{ мс}; \\ b_5 = 148, & при\ \ \Delta t_5 = 2{,}5 \text{ мс}; \\ b_6 = 0, & при\ \ \Delta t_6 = (до\ t_{\text{откл}}). \end{Bmatrix}$$

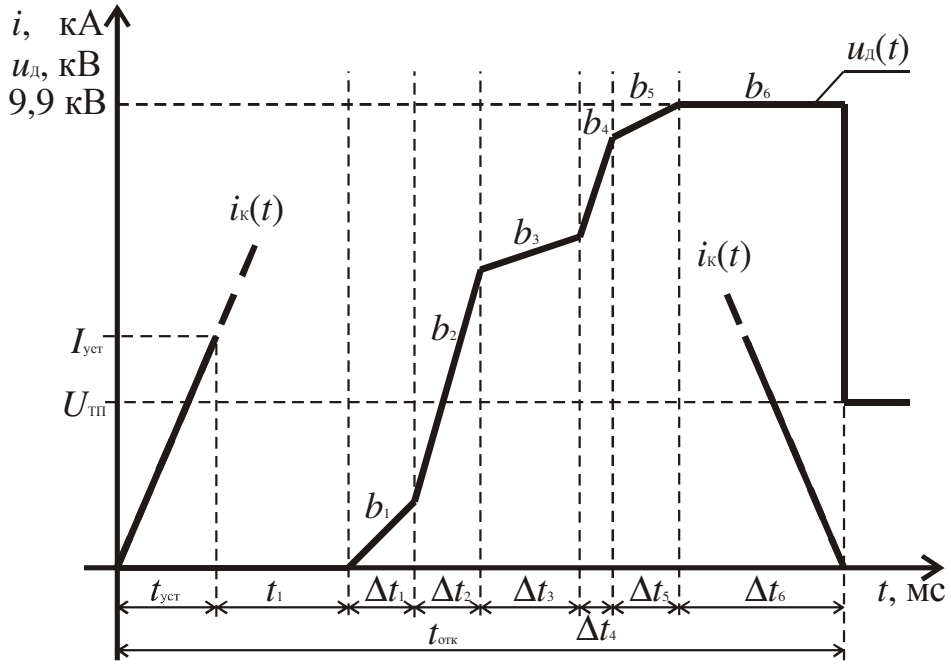


Рисунок 3.23 – Залежність спаду напруги на дузі $u_{\text{д}}(t)$ вимикача 2×ВАБ-49 при вимиканні КЗ

Як відомо, для згладжування пульсацій випрямленої напруги на ТП встановлені пасивні згладжуючі фільтри у вигляді резонансних контурів, налаштованих на затримку найбільш значимих частот. Ефективність їх роботидокладно подано в роботах [196, 197]. При проектуванні і будівництві нових ділянок доріг застосовують двозвенні пристрої, що згладжують. Поряд

із зазначеними схемами на ТП застосовуються більше прості однозвенні пасивні фільтри (рис. 3.24). Вони складаються з головного згладжуючого реактора, чотирьох резонансних контурів, налаштованих на частоти 300 Гц, 600 Гц, 900 Гц, 1200 Гц, для підвищення ефективності згладжування і подавлення частот вище 1200 Гц застосовується п'ятий контур, який містить елемент великої ємності.

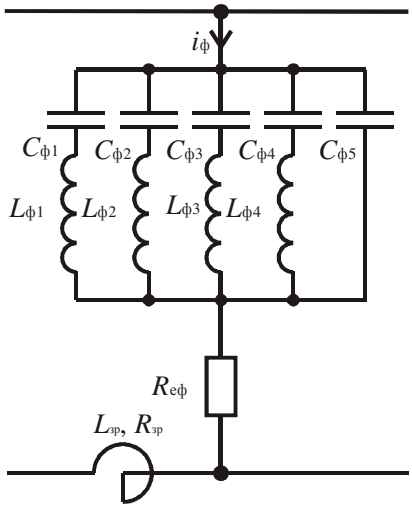


Рисунок 3.24 – Схема одного із варіантів підстанційного пасивного фільтр-пристрою

На сьогодні найбільшого розповсюдження на ТП набули згладжуючі реактори типу РБФА-У-6500/3250, параметри яких позначимо як: $R_{зр}$, $L_{зр}$.

Якщо зневажити величиною індуктивності фільтра $L_ф$, що у більшості випадків значно менше індуктивності реактора $L_{зр}$ і КМ $L_к$, то пасивний згладжуючий фільтр, у першому наближенні можна замінити еквівалентною ємністю $C_{Еф} = \sum_{k=1}^{5} C_{фk} = 35...250$ мкФ [72]. Це дозволить спростити методику розрахунку й поширити її на всі типи підстанцій.

Моделюючи режими в мережів тягового електропостачання необхідно враховувати ряд особливостей, яких не торкаються під час розрахунку трифазної мережі промислової частоти. Мова йде про зміну тягового навантаження у часі і просторі, однак реально відмінностей між цими видами ліній більше [198].

Розглянемо ТМ контактної підвіски типу М120+2МФ100+А185, яка є найбільш розповсюдженою на електрифікованих постійним струмом залізницях України. Площа поперечного перерізу еквівалентного проводу (тягової підвіски) складає $S_{\text{тп}} = 120 + 2 \times 100 + \frac{185}{1,7} = 430$ мм^2, де 1,7 – коефіцієнт приведення, наявного в даній підвісці, алюмінієвого проводу до мідного еквіваленту [13]. Слід зазначити, що в розрахунках було враховано 30 % зносу контактного проводу, тобто площа поперечного перерізу еквівалентного проводу в розрахунках прийнята $S_{\text{тп}} = 394$ мм^2. Тягова мережа може бути замінена ємнісним, індуктивним і резистивним елементами і утворить, таким чином, коливальні контури. При різких змінах струму і напруги під час різних експлуатаційних та аварійних ППр з'являються загасаючі вільні коливання. Як показують дослідження, [199, 200], струм перехідного процесу містить широкий спектр гармонійних складових. В роботі [199] було встановлено, що в спектрі коливань напруги між контактним проводом і землею переважають частоти 150…250 Гц, а експонентному зростанню струму КЗ відповідають частоти 10…30 Гц. Параметри кіл розраховують для середньої частоти $f = 20$ Гц, що не перевищує звичайно прийнятих похибок. При таких припущеннях питома ємність контактної мережі одноколійної ділянки і одного шляху двопутньої ділянки може бути визначена за формулою [201, 202]:

$$C_{\text{к}} = \frac{10^{-6}}{18 \ln\left(\frac{2h_{\text{цр}}}{\sqrt{h_{\text{кт}} r}}\right)} \left(\frac{\Ф}{\text{км}}\right),$$

де $h_{\text{цр}}$ – відстань від рейки до еквівалентного проводу контактної підвіски, м; $h_{\text{кт}}$ – середня відстань між контактним проводом і несучим тросом, м; r – еквівалентний радіус циліндра за площею поперечного перерізу проводів [203].

$$r = \sqrt{\frac{S_{\text{е}}}{\pi}}, \qquad (3.26)$$

де $S_{\text{е}}$ – еквівалентна площа поперечного перерізу системи «тягова підвіска - рейка», яка знаходиться як: $S_{\text{е}} = \sqrt{S_{\text{тп}} \cdot S_{\text{р}}}$, де $S_{\text{р}} = 16580$ мм^2 – площа поперечного перерізу двох рейок.

Для двоколійних ділянок ємність між проводами підвісок паралельних шляхів може бути визначена за формулою [204]:

$$C_{\text{к}} = \frac{10^{-6}}{36 \ln\left(\frac{d}{\sqrt{h_{\text{кт}} r}}\right)} \left(\frac{\Ф}{\text{км}}\right), \tag{3.27}$$

де d – відстань між проводами підвісок, м.

Питому індуктивність $L_{\text{к}}$ контактної мережі визначаємо для проводу радіусом r (за формулою (3.26)) еквівалентного циліндра площею $S_{\text{тп}}$ тягової підвіски за формулою Поляччека [13]:

$$L_{\text{к}} = \left(1 + 2\ln\frac{10^4}{1{,}78 \cdot r \cdot \sqrt{10 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \gamma_{\text{з}}}}\right) \cdot 10^{-4}, \tag{3.28}$$

де $\gamma_{\text{з}} = 10^{-3}$ См/м – питома електропровідність землі, що рівна; $\omega = 2\pi f = \{f = 20 \ \Гц\}$ – кутова частота [18].

Питому індуктивність L_{P} двох рейок визначаємо за формулою (3.28) для проводу радіусом еквівалентного циліндра площею $S_{\text{р}}$.

Для врахування взаємного впливу КМ й рейок застосуємо коефіцієнт взаємної індуктивності $M_{\text{к_р}}$, розрахований за формулою:

$$M_{\text{к_р}} = \left(1 + 2\ln\frac{10^4}{1{,}78 \cdot a \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \gamma_{\text{з}}}}\right) \cdot 10^{-4}, \tag{3.29}$$

де a – відстань між осями проводів КМ або проводом і рейкою, м [199, 200, 205].

Питомий опір проводів КМ розраховуємо за формулою:

$$R_{\text{к}} = k_{C\text{к}} \frac{\rho}{S_{\text{тп}}}, \tag{3.30}$$

де $k_{Ск}$ – коефіцієнт, що враховує зміну опору проводів за рахунок з'єднання ($k_{Ск}=1,02...1,03$); ρ – питомий опір проводу (при $t^0=+20^\circ C$, для міді $\rho_м=18,2\frac{Ом\cdot мм^2}{км}$, для алюмінію $\rho_а=31\frac{Ом\cdot мм^2}{км}$).

В роботі [206] запропоновано точний, але досить складний, метод врахування впливу сталевих рейок у перехідному режимі, що може бути використано при пошуку більш точного розв'язку. Проте для спрощення розрахунків приймемо розраховані і наведені в роботі [13] значення резистивного питомого опору рейкового шляху (тип рейок Р65) при температурі $t^0=+20^\circ C$, яке дорівнює $R_р=0,0155$ Ом.

Як було зазначено вище, на електрифікованих залізницях рейки використовуються у якості зворотного провода для протікання тягового струм. В зв'язку з низьким перехідним опором між рейкою і землею частина тягового струму відгалужується в землю і протікає також по металевим конструкціям, що знаходяться у землі [207]. Перехідний опір між рейкою і землею $R_{р_з}$ залежить від багатьох факторів: вологості шпал, виду ґрунту, його структури тощо. У таблиці 3.9 наведено мінімально припустимі значення перехідних опорів. При сухому баласті значення $R_{р_з}$ може збільшуватися в 2,5…3 рази. При значному забрудненні перехідний опір може знижуватися для двопутньої ділянки до 0,1…0,075 Ом/км.

Таблиця 3.9

Значення перехідного опору $R_{р_з}$, $Ом/км$

Тип баласту	Тип ділянки	
	Однопутня	Двопутня
Щебінь крупний	1	0,5
Гравій з підсипкою	0,75	0,375
Пісок	0,5	0,25
Пісок+глина	0,3	0,15

Для провідних елементів КМ при підвищені температури в літній період до $40°C$ і знижені в зимовий до $-20°C$ активні опори можуть бути перераховані за відомою з фізики формулою:

$$\rho = \rho'_{\text{х}}\left[1+\alpha\left(t-t^{0}\right)\right], \qquad (3.31)$$

де $\rho'_{\text{х}}$ – питомий опір “холодного” проводу, при $t^{0}=+20^{\circ}\text{C}$; α – температурний коефіцієнт опору металу проводів (для міді $\alpha_{\text{м}}=(4...4{,}3)\cdot 10^{-3}\,\text{град}^{-1}$, для алюмінію $\alpha_{\text{а}}=4{,}15\cdot 10^{-3}\,\text{град}^{-1}$); t – поточна температура проводів ТМ.

Виконавши розрахунки за вищенаведеними формулами (3.27), (3.28), (3.29), (3.30), отримаємо параметри ТМ розглядуваної фідерної зони і занесемо їх до зведеної таблиці 3.10 [208].

3.5.2 Електрична схема заміщення системи тягового електропостачання в режимі короткого замикання

Схема заміщення системи тягового електропостачання в режимі КЗ на основі розглянутих вище схем (рис. 3.17 і 3.18), а також з врахуванням розглянутих вище елементів (таблиця 3.10), для фідерної зони з одностороннім живленням має вигляд, приведений на рис. 3.25 [208].

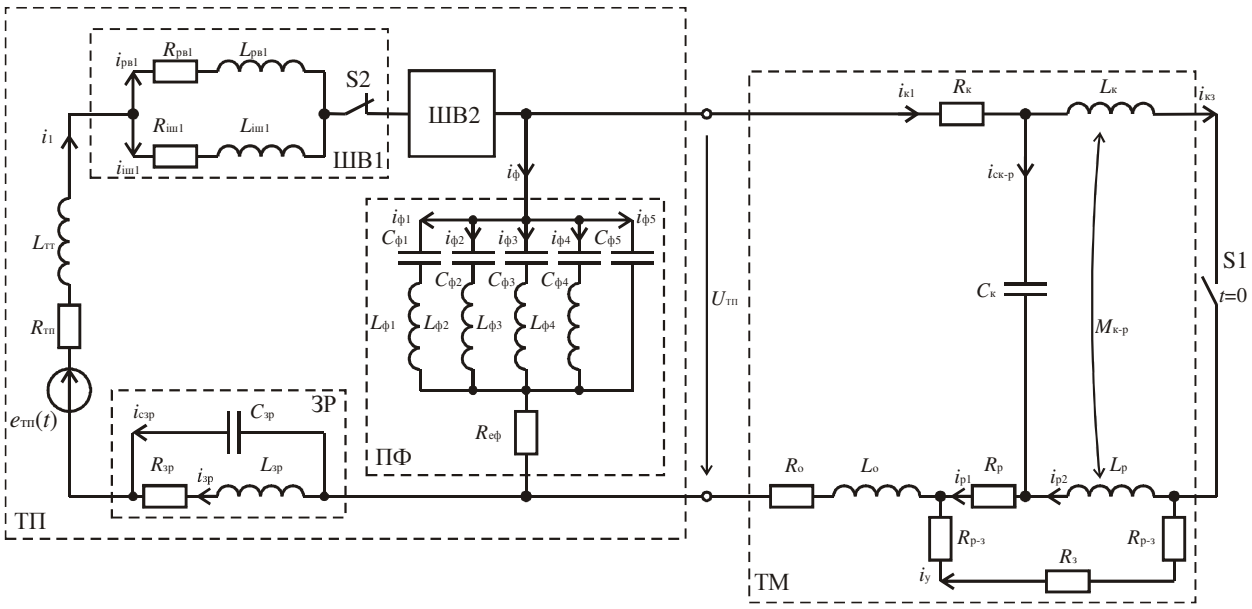
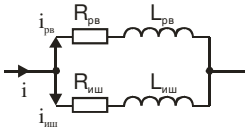
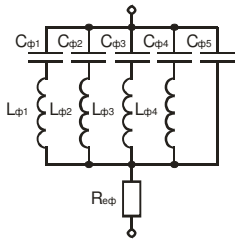
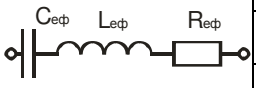
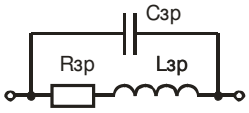
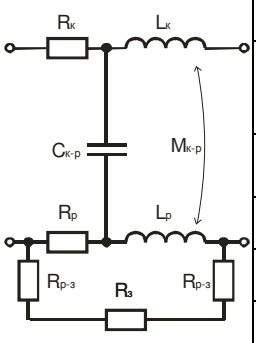


Рисунок 3.25 – Електрична схема заміщення СТЕП з консольним живленням в режимі КЗ в ТМ

Таблиця 3.10

Схеми заміщення елементів СТЕП, їх параметри та значення

Пристрій	Схема заміщення	Параметр	Буквене позначення	Значення	Одиниці виміру
1	2	3	4	5	6
Швидкодіючий вимикач ВАБ-43 [9]		Опір розмагнічуючого витка	$R_{рв}$	$18{,}2\cdot10^{-6}$	Ом
		Індуктивність розмагнічуючого витка	$L_{рв}$	$1{,}82\cdot10^{-6}$	Гн
		Опір індуктивного шунта	$R_{іш}$	$9{,}2\cdot10^{-6}$	Ом
		Індуктивність індуктивного	$L_{іш}$	$5{,}9\cdot10^{-6}$	Гн
Фільтр пасивний (ФП) [13, 16]		Ємності віток фільтру	$C_{ф1}$	$90\cdot10^{-6}$	Ф
			$C_{ф2}$	$40\cdot10^{-6}$	Ф
			$C_{ф3}$	$25\cdot10^{-6}$	Ф
			$C_{ф4}$	$15\cdot10^{-6}$	Ф
			$C_{ф5}$	$90\cdot10^{-6}$	Ф
		Індуктивність віток фільтру	$L_{ф1}$	$3{,}15\cdot10^{-3}$	Гн
			$L_{ф2}$	$1{,}76\cdot10^{-3}$	Гн
			$L_{ф3}$	$1{,}25\cdot10^{-3}$	Гн
			$L_{ф4}$	$1{,}17\cdot10^{-3}$	Гн
		Еквівалентний опір фільтру	$R_{еф}$	$75\cdot10^{-3}$	Ом
		Еквівалентна ємність фільтру	$C_{еф}$	$260\cdot10^{-6}$	Ф
		Еквівалентна індуктивність фільтру	$L_{еф}$	$0{,}4\cdot10^{-3}$	Гн
Реактор (ЗР) РБФА-У-6500/3250 [9, 16]		Опір згладжуючого реактора	$R_{зр}$	$9\cdot10^{-3}$	Ом
		Індуктивність згладжуючого реактора	$L_{зр}$	$6{,}1\cdot10^{-3}$	Гн
		Ємність згладжуючого реактора	$C_{зр}$	$6\cdot10^{-8}$	Ф
Трансформатор ТП		Опір тягового трансформатора	$R_{тт}$	$9{,}2\cdot10^{-6}$	Ом
		Індуктивність тягового трансформатора ТП	$L_{тт}$	$5{,}9\cdot10^{-6}$	Гн
Контактна підвіска М-120+2МФ-100+А-185 [13, 16, 18]		Питомий опір контактної підвіски	$R_к$	$42{,}4\cdot10^{-3}$	Ом/км
		Питома індуктивність контактної підвіски	$L_к$	$2{,}6\cdot10^{-3}$	Гн/км
		Питома взаємна індуктивність контура «контактний провід-рейка»	$M_{к\text{-}р}$	$1{,}3\cdot10^{-3}$	Гн/км
		Питома ємність контура «контактний провід-рейка»	$C_{к\text{-}р}$	$1{,}125\cdot10^{-8}$	Ф/км
Зворотний провід (Р-3) [13, 18]		Питомий опір рейок	$R_р$	$15{,}4\cdot10^{-3}$	Ом/км
		Питома індуктивність рейок	$L_р$	$2{,}2\cdot10^{-3}$	Гн/км
		Перехідний опір рейка-земля	$R_{р\text{-}з}$	1	Ом/км
		Активний опір землі, як одного із зворотних проводів	$R_з$	$\frac{\pi\omega}{2}10^{-4}$	Ом/км

Продовження таблиці 3.10

1	2	3	4	5	6
Відсмоктуючий фідер А-185		Питомий опір фідера	$R_{\text{о}}$	$41{,}9 \cdot 10^{-3}$	Ом/км
		Питома індуктивність фідера	$L_{\text{о}}$	$2{,}5 \cdot 10^{-3}$	Гн/км

З урахуванням позначень та внутрішньої структури кожного з елементів (рис. 3.25), схема заміщення СТЕП з двостороннім живленням в режимі КЗ має вигляд, представлений на рис. 3.26.

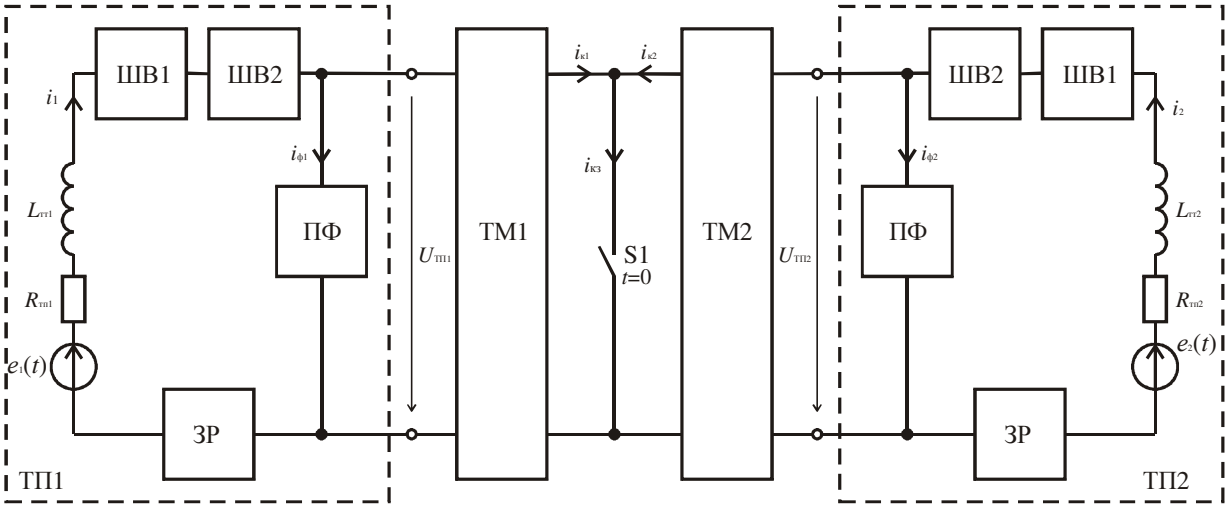


Рисунок 3.26 – Електрична схема заміщення системи тягового електропостачання з двостороннім живленням в режимі КЗ в ТМ

В процесі моделювання КЗ можливі два випадки. Перший полягає у тому, що в розрахунковій схемі заміщення треба враховувати вольт-амперну характеристику дуги $U_{\text{д}}(I)$ [38]. Остання є додатковим нелінійним елементом, який ускладнює розрахунки. Але, згідно з експериментальними даними [205, 209], падіння напруги в дузі для високовольтних кіл складає (2...3) % напруги живлення, тобто, $R_{\text{д}}$ є «малим параметром» [161] і тому дуга може бути врахована як лінійний резистор з опором $R_{\text{д}}$. Падіння напруги в дузі являє собою невелике значення $u_{\text{д}}(t) = U_{\text{д}} = 200\,B$. Другий випадок, більш простіший, вважається, що закорочення здійснюється миттєво, без дуги і тоді у схемі заміщення приймається, що $U_{\text{д}} = 0$, тобто має місце «металеве» КЗ. У

подальших розрахунках для спрощення будемо враховувати саме другий випадок.

3.5.3 Припущення, прийняті при моделюванні, та методи розрахунку

Розглянемо прийняті припущення та особливості чисельного інтегрування системи рівнянь електромагнітного стану для розглядуваної схеми заміщення рис. 3.25.

Фідерну зону ТМ в загальному випадку можна розглядати як електричне коло з зосередженим параметрами (як коротку лінію [210]) чи з розподіленими параметрами (як довгу лінію [210]). Критерієм «короткої» лінії є умова, що $l << \lambda$, а «довгої» $l \geq \lambda$, де l – фізична довжина лінії, а λ – довжина хвилі напруги чи струму в лінії. Довжина λ в мережі визначається за формулою:

$$\lambda = {c}/{f},$$

де $c = 3 \cdot 10^8 \ {м}/{с}$ – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль у повітрі; f – частота зміни хвилі.

Згідно, виконаного в п 3.3, спектрального аналізу частоти значимих гармонійних складових не перевищує 2000 Гц, тому довжина хвилі складає $\lambda = {3 \cdot 10^8}/{2000} = 150 \cdot 10^3 \ м$. Оскільки довжина l міжпідстанційної ділянки не перевищує 20 км, то $l = 20 \ км << \lambda = 150 \ км$, і можна прийняти, що ТМ постійного струму слід аналізувати як електричне коло з зосередженими параметрами.

При створенні математичної моделі електричних кіл постає проблема врахування елементів з малими значеннями індуктивностей, ємностей, провідностей, опорів, тобто, з так званими «малими параметрами» [162]. Внаслідок цього електричним колам відповідають диференціальні рівняння відносно високих порядків. Причому, як правило, при описанні розрахунків подібних рівнянь в інтервалі спостереження потрібне залучення двох видів

функцій: швидких з великими значеннями похідних і повільних з малими похідними. Необхідність використання таких функцій для опису рішень диференціальних систем характеризує явище жорсткості, а самі подібні системи називають жорсткими [211], чисельне розв'язання яких пов'язане із значними труднощами.

В схемі заміщення згладжуючого реактора на ТП для досконалого вивчення процесів, що в ньому відбуваються, слід враховувати міжвиткову ємність. Розглянемо, наприклад, процес розряду ємності згладжуючого реактора на активно-індуктивне коло (рис. 3.27) [212].

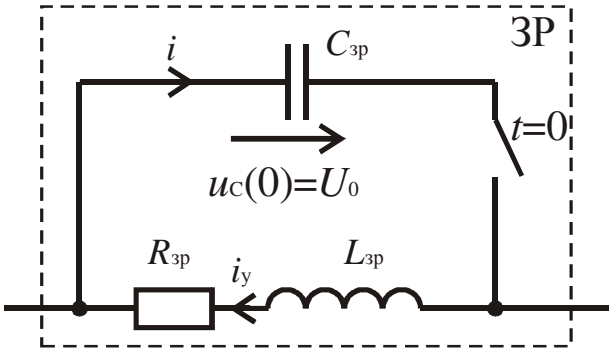


Рисунок 3.27 – Схема процесу розряду ємнісного елементу $C_{зр} = 0{,}06$ *мкФ* [16, 18] на резистор $R_{зр} = 9$ *мОм* та індуктивність $L_{зр} = 6{,}1$ *мГн*

Залежність струму в колі від часу може бути отримана з розв'язання наступного диференціального рівняння: $\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{R_{зр}}{L_{зр}} \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{L_{зр} C_{зр}} i_L = 0$ [162]. Запишемо в загальному виді його розв'язок, що складається тільки з вільної складової $i_L = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t}$ і визначимо корені p_1, p_2 характеристичного рівняння:

$$p^2 + \frac{R_{зр}}{L_{зр}} p + \frac{1}{L_{зр} C_{зр}} = 0 \rightarrow p^2 + \frac{9 \cdot 10^{-3}}{6{,}1 \cdot 10^{-3}} p + \frac{1}{6{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-8}} = 0,$$

$$p_1 = -\frac{R_{зр}}{L_{зр}} \approx -1{,}475; \quad p_2 = -\frac{1}{R_{зр} C_{зр}} \approx -1{,}85 \cdot 10^9;$$

Виходячи з незалежних початкових умов

$$i_L(0) = C_1 + C_2 = 0,$$

$$u_C(0) = \left[L_{\text{зр}} \left. \frac{di_L}{dt} \right|_{t=0} + R_{\text{зр}} i_L(0) \right] = L_{\text{зр}} \left(C_1 p_1 + C_2 p_2 \right) + R_{\text{зр}} \left(C_1 + C_2 \right) = U_0,$$

знайдемо постійні інтегрування: $C_1 = -C_2 = \frac{U_0}{R_{\text{зр}}}$. Тоді розв'язок приймає вигляд:

$$i_L = \frac{U_0}{R_{\text{зр}}} \left(e^{-\frac{R_{\text{зр}}}{L_{\text{зр}}} t} - e^{-\frac{1}{R_{\text{зр}} C_{\text{зр}}} t} \right) = \frac{U_0}{R_{\text{зр}}} \left(e^{-1{,}475 t} - e^{-1{,}85 \cdot 10^9 t} \right).$$

На рис. 3.28, виконаному для наочності із зміною масштабу по осі t виділимо дві ділянки.

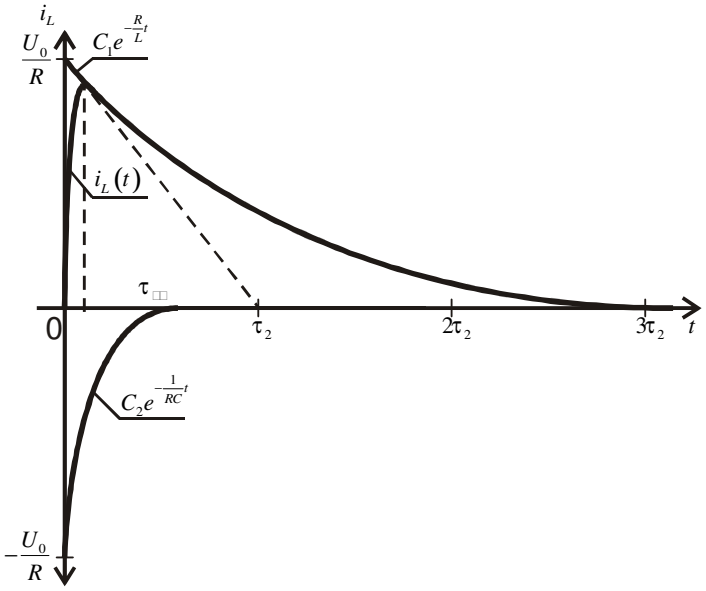


Рисунок 3.28 – Якісний характер зміни перехідного струму про розряді конденсатора

Перша ділянка - ділянка прикордонного шару - $t \in [0, \tau_{nc}]$ - характеризується швидкою зміною (великої похідної) струму. Тривалість цієї ділянки визначається мінімальною сталою часу $\tau_{\min} = \tau_2 = \left| \frac{1}{p_2} \right| = R_{\text{зр}} C_{\text{зр}}$. Можна прийняти, наприклад, $\tau_{nc} = (4...5)\tau_{\min}$. Друга ділянка, що лежить за прикордонними шаром, характеризується повільною зміною струму. Тривалість цієї ділянки,

тобто тривалість спостерігання, визначається максимальною сталою часу $\tau_{\max} = \tau_1 = \left|\frac{1}{p_1}\right| = \frac{L_{зр}}{R_{зр}}$ (звичайно процес доцільно розглядати на інтервалі не більше $(4...5)\tau_{\max}$). Таким чином, при аналізі таких рівнянь, має місце явище жорсткості. Проаналізуємо складності, що виникають при інтегруванні подібних рівнянь.

Як відомо з курсу математики [213], вибір кроку, що забезпечує заданий тип стійкості розв'язку, повинен задовольняти певним умовам, що залежать від власних чисел матриці рівнянь стану, або, що те ж саме, від коренів характеристичного рівняння. Наприклад, при використанні явного методу Ейлера крок інтегрування, що забезпечує асимптотичну стійкість розв'язку, повинен задовольняти умові $|1 + hp| < 1$. Для розглянутого вище прикладу ця умова рівнозначна двом нерівностям:

$$\begin{cases} |1 + h \cdot p_1| = |1 - h \cdot 1{,}475| < 1; \\ |1 + h \cdot p_2| = |1 - h \cdot 1{,}85 \cdot 10^9| < 1, \end{cases}$$

вирішуючи які, одержуємо наступні обмеження на крок: $h < 1{,}356$; $h < 1{,}081 \cdot 10^{-9}$. Отже, при інтегруванні даної системи рівнянь крок повинен бути обмежений значенням $h < 1{,}081 \cdot 10^{-9}$, обумовленим мінімальною постійною часу $\tau_{\min} = \tau_2 = \left|\frac{1}{p_2}\right| = 5{,}4 \cdot 10^{-10}$ с. Тривалість перехідного процесу залежить від максимальної сталої часу кола: $(4...5)\tau_{\max} = (4...5)\tau_1 = (4...5)\left|\frac{1}{p_1}\right| = 2{,}034...3{,}39$ с. Таким чином, застосування явного методу Ейлера для інтегрування розглянутого рівняння на інтервалі $T = 3{,}39$ с вимагало б більше 6 млрд кроків і, відповідно, значних витрат комп'ютерного часу для розв'язання досить простого завдання. При співвідношенні кроку $h < 1{,}081 \cdot 10^{-9}$ і інтервалу інтегрування $T = 3{,}39$ с одержати чисельний розв'язок наведеного рівняння із заданою точністю не є можли-

вим. Аналогічні труднощі виникають і при використанні інших явних класичних методів, наприклад, методу Рунге-Кутта.

Розглядаючи жорсткі рівняння стану такої складної СЕТ, в якій фізика процесів заздалегідь не з'ясована, спрощення математичної моделі можна досягти вилученням (нехтуванням) деяких елементів (див. нижче), проте для розрахунку вищезазначених систем, було прийнято рішення застосовувати чисельне інтегрування жорстких диференціальних рівнянь методом Адамса [208], весь розрахунок проводився в програмному забезпеченні Maple 11 при підключенні відповідних внутрішніх пакетів.

По-друге, оскільки напруга в мережі не перевищує 4000 В (за вимогами), то струмом витоку між контактним проводом і рейкою і через ізоляцію можна знехтувати. Тоді такий первинний параметр лінії як поперечна провідність G_0 [15] дорівнює нулю. Результати розрахунку параметрів для найпоширеніших типів підвісок представлені в роботі [204]. З цієї роботи випливає, що питома ємність КМ $C_{\text{к_р}}$ значно менше ємності $C_{Еф}$ фільтр-пристрою ТП, і тому при розрахунку перехідного процесу в ТМ у першому наближенні не враховуємо ємність контактних проводів у схемах заміщення із зосередженими параметрами, тобто такий первинний параметр лінії як ємність $C_{\text{к_р}}$ також рівний нулю. Знехтувати також у першому наближенні можна міжвитковою ємністю згладжуючого реактора, тягового трансформатора.

Зауважимо також про те, що в нормативній документаці [214, 215] відсутні умови за яких, під час налаштування фідерного захисту, необхідно враховувати зміну пори року. Навіть в існуючих на сьогодні методиках вибору уставки захисту контактної мережі від струмів короткого замикання всі розрахунки виконують при нормальних умовах експлуатації, а саме: відносна вологість навколишнього середовища – 65±15%; температура – +20 ºС.

3.5.4 Математична модель електромагнітних процесів при КЗ

На основі схеми заміщення СТЕП при односторонньому живлені (рис. 3.25) система рівнянь електромагнітного стану (математична модель) для кола після комутації ключа $S1$, який імітує закорочення ТМ, має вигляд:

$$i_1\left(R_{\text{тт}}+R_{\text{тп}}+R_{\text{зр}}\right)+\left(L_{\text{тт}}+L_{\text{зр}}\right)\frac{di_1}{dt}+i_{\text{іш1}}R_{\text{іш1}}+L_{\text{іш1}}\frac{di_{\text{іш1}}}{dt}+i_{\text{іш2}}R_{\text{іш2}}+L_{\text{іш2}}\frac{di_{\text{іш2}}}{dt}+$$

$$+L_{\text{ф1}}\frac{di_{\text{ф1}}}{dt}+\frac{1}{C_{\text{ф1}}}\int i_{\text{ф1}}dt+i_{\text{ф}}R_{\text{еф}}=e_{\text{тп}}(t); \qquad (3.32)$$

$$i_1\left(R_{\text{тт}}+R_{\text{тп}}+R_{\text{зр}}\right)+\left(L_{\text{тт}}+L_{\text{зр}}\right)\frac{di_1}{dt}+i_{\text{іш1}}R_{\text{іш1}}+L_{\text{іш1}}\frac{di_{\text{іш1}}}{dt}+i_{\text{іш2}}R_{\text{іш2}}+L_{\text{іш2}}\frac{di_{\text{іш2}}}{dt}+$$

$$+L_{\text{ф2}}\frac{di_{\text{ф2}}}{dt}+\frac{1}{C_{\text{ф2}}}\int i_{\text{ф2}}dt+i_{\text{ф}}R_{\text{еф}}=e_{\text{тп}}(t); \qquad (3.33)$$

$$i_1\left(R_{\text{тт}}+R_{\text{тп}}+R_{\text{зр}}\right)+\left(L_{\text{тт}}+L_{\text{зр}}\right)\frac{di_1}{dt}+i_{\text{іш1}}R_{\text{іш1}}+L_{\text{іш1}}\frac{di_{\text{іш1}}}{dt}+i_{\text{іш2}}R_{\text{іш2}}+L_{\text{іш2}}\frac{di_{\text{іш2}}}{dt}+$$

$$+L_{\text{ф3}}\frac{di_{\text{ф3}}}{dt}+\frac{1}{C_{\text{ф3}}}\int i_{\text{ф3}}dt+i_{\text{ф}}R_{\text{еф}}=e_{\text{тп}}(t); \qquad (3.34)$$

$$i_1\left(R_{\text{тт}}+R_{\text{тп}}+R_{\text{зр}}\right)+\left(L_{\text{тт}}+L_{\text{зр}}\right)\frac{di_1}{dt}+i_{\text{іш1}}R_{\text{іш1}}+L_{\text{іш1}}\frac{di_{\text{іш1}}}{dt}+i_{\text{іш2}}R_{\text{іш2}}+L_{\text{іш2}}\frac{di_{\text{іш2}}}{dt}+$$

$$+L_{\text{ф4}}\frac{di_{\text{ф4}}}{dt}+\frac{1}{C_{\text{ф4}}}\int i_{\text{ф4}}dt+i_{\text{ф}}R_{\text{еф}}=e_{\text{тп}}(t); \qquad (3.35)$$

$$i_1\left(R_{\text{тт}}+R_{\text{тп}}+R_{\text{зр}}\right)+\left(L_{\text{тт}}+L_{\text{зр}}\right)\frac{di_1}{dt}+i_{\text{іш1}}R_{\text{іш1}}+L_{\text{іш1}}\frac{di_{\text{іш1}}}{dt}+i_{\text{іш2}}R_{\text{іш2}}+L_{\text{іш2}}\frac{di_{\text{іш2}}}{dt}+$$

$$+\frac{1}{C_{\text{ф5}}}\int i_{\text{ф5}}dt+i_{\text{ф}}R_{\text{еф}}=e_{\text{тп}}(t); \qquad (3.36)$$

$$i_{\text{к}}\left(R_{\text{к}}+R_{\text{о}}\right)+\left(L_{\text{к}}+L_{\text{о}}+M_{\text{к_р}}\right)\frac{di_{\text{к}}}{dt}+i_{\text{р}}R_{\text{р}}+\left(L_{\text{р}}+M_{\text{к_р}}\right)\frac{di_{\text{р}}}{dt}-$$

$$-\frac{1}{C_{\text{ф5}}}\int i_{\text{ф5}}dt-i_{\text{ф}}R_{\text{еф}}=0; \qquad (3.37)$$

$$i_{\text{р}}R_{\text{р}}+\left(L_{\text{р}}+M_{\text{к_р}}\right)\frac{di_{\text{р}}}{dt}-i_{\text{у}}\left(R_{\text{р_з}}+R_{\text{з}}\right)=0; \qquad (3.38)$$

$$i_{\text{іш1}}R_{\text{іш1}}+L_{\text{іш1}}\frac{di_{\text{іш1}}}{dt}-i_{\text{рв1}}R_{\text{рв1}}-L_{\text{рв1}}\frac{di_{\text{рв1}}}{dt}=0; \qquad (3.39)$$

$$i_{\text{іш2}}R_{\text{іш2}}+L_{\text{іш2}}\frac{di_{\text{іш2}}}{dt}-i_{\text{рв2}}R_{\text{рв2}}-L_{\text{рв2}}\frac{di_{\text{рв2}}}{dt}=0; \qquad (3.40)$$

$$i_1 - i_{\text{ш1}} - i_{\text{рв1}} = 0; \tag{3.41}$$

$$i_1 - i_{\text{ш2}} - i_{\text{рв2}} = 0; \tag{3.42}$$

$$i_1 - i_{\text{ф}} - i_{\text{к}} = 0; \tag{3.43}$$

$$i_{\text{к}} - i_{\text{р}} - i_{\text{у}} = 0; \tag{3.44}$$

$$i_{\text{ф}} - i_{\text{ф1}} - i_{\text{ф2}} - i_{\text{ф3}} - i_{\text{ф4}} - i_{\text{ф5}} = 0. \tag{3.45}$$

Для чисельного розв'язання розглядуваної системи (3.32)…(3.45) її слід перетворити у форму Коші, яка має наступний вигляд:

$$\frac{d^2 i_{\text{ф1}}}{dt^2} = \left[\frac{de_{\text{тп}}(t)}{dt} - \left(R_{\text{тт}} + R_{\text{тп}} + R_{\text{зр}}\right)\frac{di_1}{dt} - \left(L_{\text{тт}} + L_{\text{зр}}\right)\frac{d^2 i_1}{dt^2} - R_{\text{ш1}}\frac{di_{\text{ш1}}}{dt} - L_{\text{ш1}}\frac{d^2 i_{\text{ш1}}}{dt^2} \right.$$
$$\left. - R_{\text{ш2}}\frac{di_{\text{ш2}}}{dt} - L_{\text{ш2}}\frac{d^2 i_{\text{ш2}}}{dt^2} - \frac{1}{C_{\text{ф1}}} i_{\text{ф1}} - \frac{di_{\text{ф}}}{dt} R_{\text{еф}} \right] \Big/ L_{\text{ф1}}; \tag{3.46}$$

$$\frac{d^2 i_{\text{ф2}}}{dt^2} = \left[\frac{de_{\text{тп}}(t)}{dt} - \left(R_{\text{тт}} + R_{\text{тп}} + R_{\text{зр}}\right)\frac{di_1}{dt} - \left(L_{\text{тт}} + L_{\text{зр}}\right)\frac{d^2 i_1}{dt^2} - R_{\text{ш1}}\frac{di_{\text{ш1}}}{dt} - L_{\text{ш1}}\frac{d^2 i_{\text{ш1}}}{dt^2} \right.$$
$$\left. - R_{\text{ш2}}\frac{di_{\text{ш2}}}{dt} - L_{\text{ш2}}\frac{d^2 i_{\text{ш2}}}{dt^2} - \frac{1}{C_{\text{ф2}}} i_{\text{ф2}} - \frac{di_{\text{ф}}}{dt} R_{\text{еф}} \right] \Big/ L_{\text{ф2}}; \tag{3.47}$$

$$\frac{d^2 i_{\text{ф3}}}{dt^2} = \left[\frac{de_{\text{тп}}(t)}{dt} - \left(R_{\text{тт}} + R_{\text{тп}} + R_{\text{зр}}\right)\frac{di_1}{dt} - \left(L_{\text{тт}} + L_{\text{зр}}\right)\frac{d^2 i_1}{dt^2} - R_{\text{ш1}}\frac{di_{\text{ш1}}}{dt} - L_{\text{ш1}}\frac{d^2 i_{\text{ш1}}}{dt^2} \right.$$
$$\left. - R_{\text{ш2}}\frac{di_{\text{ш2}}}{dt} - L_{\text{ш2}}\frac{d^2 i_{\text{ш2}}}{dt^2} - \frac{1}{C_{\text{ф3}}} i_{\text{ф3}} - \frac{di_{\text{ф}}}{dt} R_{\text{еф}} \right] \Big/ L_{\text{ф3}}; \tag{3.48}$$

$$\frac{d^2 i_{\text{ф4}}}{dt^2} = \left[\frac{de_{\text{тп}}(t)}{dt} - \left(R_{\text{тт}} + R_{\text{тп}} + R_{\text{зр}}\right)\frac{di_1}{dt} - \left(L_{\text{тт}} + L_{\text{зр}}\right)\frac{d^2 i_1}{dt^2} - R_{\text{ш1}}\frac{di_{\text{ш1}}}{dt} - L_{\text{ш1}}\frac{d^2 i_{\text{ш1}}}{dt^2} \right.$$
$$\left. - R_{\text{ш2}}\frac{di_{\text{ш2}}}{dt} - L_{\text{ш2}}\frac{d^2 i_{\text{ш2}}}{dt^2} - \frac{1}{C_{\text{ф4}}} i_{\text{ф4}} - \frac{di_{\text{ф}}}{dt} R_{\text{еф}} \right] \Big/ L_{\text{ф4}}; \tag{3.49}$$

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} = \left[\frac{de_{\text{тп}}(t)}{dt} - \left(R_{\text{тт}} + R_{\text{тп}} + R_{\text{зр}}\right)\frac{di_1}{dt} - R_{\text{ш1}}\frac{di_{\text{ш1}}}{dt} - L_{\text{ш1}}\frac{d^2 i_{\text{ш1}}}{dt^2} \right.$$
$$\left. - R_{\text{ш2}}\frac{di_{\text{ш2}}}{dt} - L_{\text{ш2}}\frac{d^2 i_{\text{ш2}}}{dt^2} - \frac{1}{C_{\text{ф5}}} i_{\text{ф5}} - \frac{di_{\text{ф}}}{dt} R_{\text{еф}} \right] \Big/ \left(L_{\text{тт}} + L_{\text{зр}}\right); \tag{3.50}$$

$$\frac{d^2 i_к}{dt^2} = \left[\frac{1}{C_{ф5}} i_{ф5} + R_{еф} \frac{di_ф}{dt} - \left(R_к + R_о\right) \frac{di_к}{dt} - R_р \frac{di_р}{dt} - \right.$$

$$\left. - \left(L_р + M_{к_р}\right) \frac{d^2 i_р}{dt^2} \right] \Big/ \left(L_к + L_о + M_{к_р}\right); \tag{3.51}$$

$$\frac{d^2 i_р}{dt^2} = \left[\left(R_{р_з} + R_з\right) \frac{di_у}{dt} - R_р \frac{di_р}{dt} \right] \Big/ \left(L_р + M_{к_р}\right); \tag{3.52}$$

$$\frac{d^2 i_{іш1}}{dt^2} = \left[R_{рв1} \frac{di_{рв1}}{dt} + L_{рв1} \frac{d^2 i_{рв1}}{dt^2} - R_{іш1} \frac{di_{іш1}}{dt} \right] \Big/ L_{іш1}; \tag{3.53}$$

$$\frac{d^2 i_{іш2}}{dt^2} = \left[R_{рв2} \frac{di_{рв2}}{dt} + L_{рв2} \frac{d^2 i_{рв2}}{dt^2} - R_{іш2} \frac{di_{іш2}}{dt} \right] \Big/ L_{іш2}; \tag{3.54}$$

$$\frac{d^2 i_{рв1}}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2}\left(i_1 - i_{іш1}\right); \tag{3.55}$$

$$\frac{d^2 i_{рв2}}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2}\left(i_1 - i_{іш2}\right); \tag{3.56}$$

$$\frac{d^2 i_ф}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2}\left(i_1 - i_к\right); \tag{3.57}$$

$$\frac{d^2 i_у}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2}\left(i_к - i_р\right); \tag{3.58}$$

$$\frac{d^2 i_{ф5}}{dt^2} = \frac{d^2}{dt^2}\left(i_ф - i_{ф1} - i_{ф2} - i_{ф3} - i_{ф4}\right). \tag{3.59}$$

Систему диференціальних рівнянь, (3.32)-(3.45) слід розглядати на різних чотирьох етапах:

- до комутації ключа $S1$ (рис 3.25), тобто до виникнення КЗ в СЕП;
- після комутації $S1$, до моменту досягнення струму фідера значення уставки $I_{у1} = 3000A,\ I_{у2} = 2500A$ ШВ відповідної ТП. В цей проміжок слід включити термін часу власного спрацювання t_1 автомата, тобто розглядати його до моменту розходження дугогасних контактів $t \le \tau_в = t_у + t_1 + t_к$;

- наростання напруги на дузі в камері ШВ за лінійним законом bt на інтервалі $\tau_{в} \le t \le t_2$;
- підтримання потенціалу дуги $b\left(t-\tau_{в}\right)-b\left(t-t_2\right)$ від моменту досягнення струмом свого максимального значення до закінчення процесу вимикання $t_2 \le t \le t_{отк}$ аварійного режиму.

Перший етап аналізу розглядуваної системи, пов'язаний з розрахунком чисельних значень незалежних початкових умов (ПУ) [162]. Визначення незалежних та залежних ПУ є найбільшою складністю в процесі розрахунку будь-яких ППр, особливо у колах з великою кількістю накопичувачів енергії. Тому в розглядуваній роботі ПУ були визначені за алгоритмом, представленим в роботі [216]. Оскільки значення е.р.с. джерела напруги попередньо розклали на гармонійні складові, було застосовано принцип суперпозиції. Розглядувану схему розрахували до комутації по нульовій та кожній гармоніці і далі алгебричним додаванням отримали ПУ, що відносяться безпосередньо до самої схеми.

Рівняння (3.39)-(3.42) описують електромагнітні процеси, які відбуваються в ШВ, тому будемо називати їх – рівняння ШВ. Для схеми рис. 3.26 розглянуту систему (3.32)-(3.45) доповнюємо такими ж рівняннями з правої сторони, позначення нижніх індексів необхідно змінити з «1» на «2». Для створення системи диференціальних рівнянь електромагнітного стану 3-го і 4-го етапів досить лише доповнити існуючі розглянуті вище системи величиною спаду напруги на дузі у відповідному інтервалі часу.

3.5.5 Чисельні розрахунки та аналіз їх результатів

Насамперед, заради доведення адекватності створеної математичної моделі (3.32)-(3.45), виконано чисельні розрахунки режиму вимикання дальнього КЗ автоматом 2×ВАБ-43 фідерної чарунки ФА-2 ТП Верхньодніпровськ (ЕЧЕ-11) (рис. 3.1, в). Результати розрахунків, а також дослідно отримана осцилограма (згідно рис. 3.1, в) представлені на рис. 3.29, із якого випливає, що з високою вірогідністю (похибка різниці складає 6,4%)

можна стверджувати, що створена ММ описує процеси, які є подібними до тих, що відбуваються в режимі КЗ в реальній фідерній зоні системи тягового електропостачання.

У подальшому розраховано математичну модель режиму КЗ в ТМ з одностороннім (консольним) живленням фідерної зони довжиною $l = 20$ км. Живлення здійснюється шестипульсним випрямним агрегатом із середнім значенням напруги живлення 3,5 кВ; у якості фідерного автомата прийнятоо ШВ 2×ВАБ-43. Результати представлено на рис. 3.30 і 3.31. З рис. 3.30 випливає, що і максимальне значення $I_{\max}$, якого досягає струм фідера при вимиканні автомата в аварійному режимі, і швидкість зростання струму після виникнення КЗ тим менші чим більша відстань від ТП до точки КЗ. Останнє легко пояснюється збільшенням індуктивності ТМ. Із зменшенням швидкості зростання струму фідера подовжується термін часу самого процесу вимикання $t_{\text{вим}}$. Швидкість зменшення струму в період часу, коли напруга дуги в камері підтримується постійною $u_{\text{д}}(t) = const$, в усіх трьох випадках приблизно однакова: прямі A, B, D практично паралельні. На нашу думку, значення швидкості зменшення струму, головним чином, залежить від максимального значення якого досяг струм на попередньому етапі горіння дуги.

Графік зміни напруги (рис. 3.31) на затискачах ТП зі сторони тягової мережі має явно виражений коливальний характер, що легко пояснюється наявністю паралельно увімкненого до ТП пасивного згладжуючого фільтру.

Розглянемо більш детально інтервал часу Δ зміни перехідної фідерної напруги (рис. 3.32) [217].

На початковому інтервалі часу виникнення КЗ розглядувана напруга $u_{\text{тп}}(t)$ змінюється лінійно; її швидкість зменшення на початку ППр залежить від відстані до місця виникнення аварійного режиму. На рис. 3.32 видно, що кут α, який є геометричною інтерпретацією швидкості зміни перехідної електричної величини, збільшується із збільшенням відстані до місця КЗ.

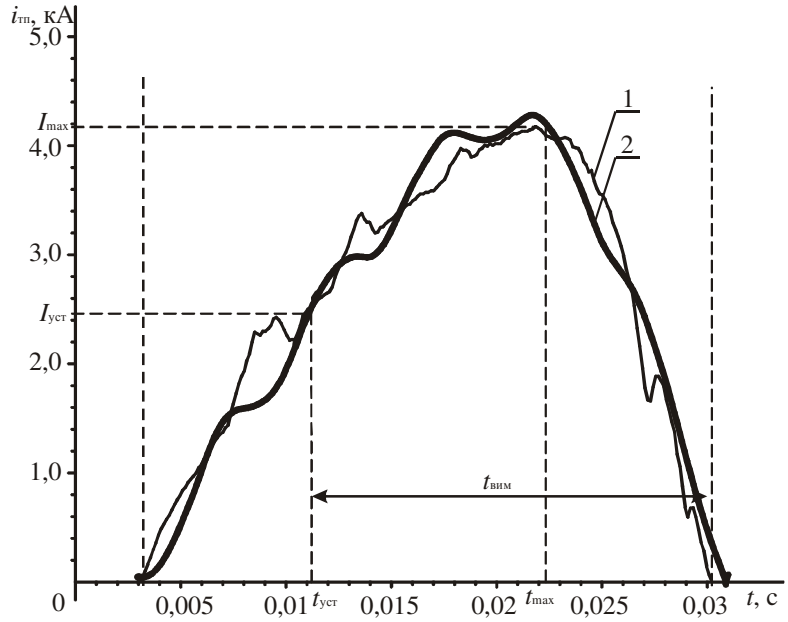


Рисунок 3.29 – Криві зміни перехідного фідерного струму ТП в режимі вимикання КЗ фідерним автоматом: 1 – осцилограма (рис. 3.1, в); 2 – теоретична крива

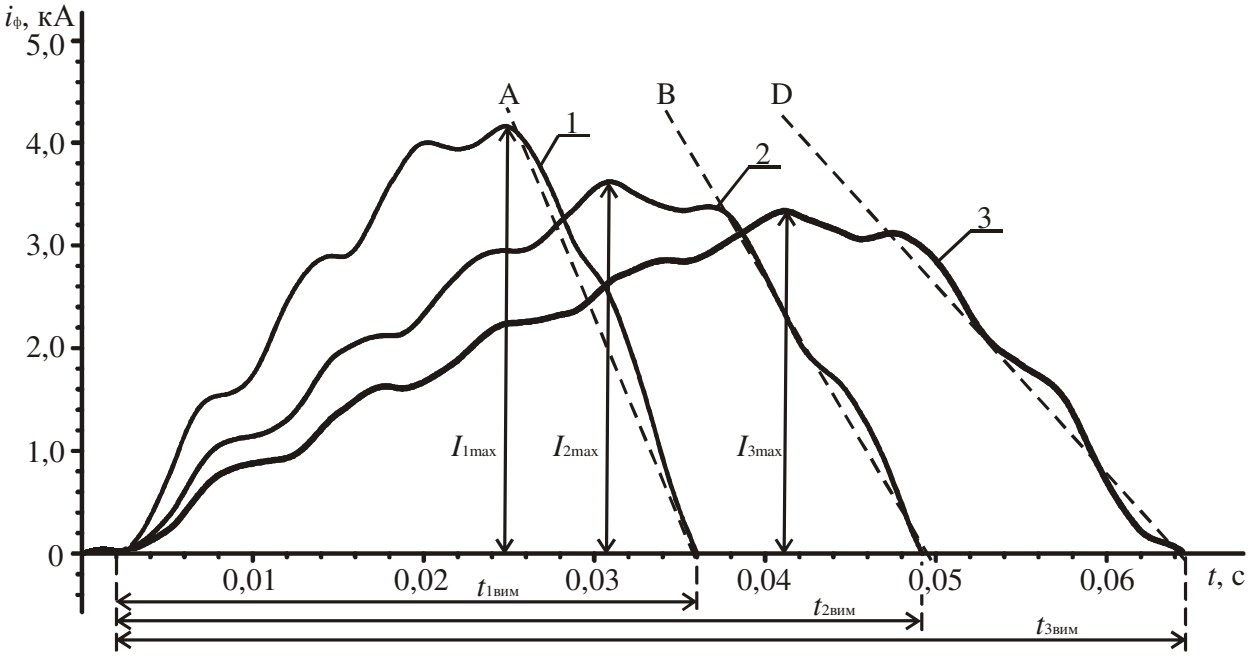


Рисунок 3.30 – Часові залежності зміни перехідного фідерного струму ТП при вимиканні КЗ в системи тягового електропостачання при консольному живленні, яке відбулося на відстані $l\,(км)$: 1 – 2; 2 – 6; 3 – 10

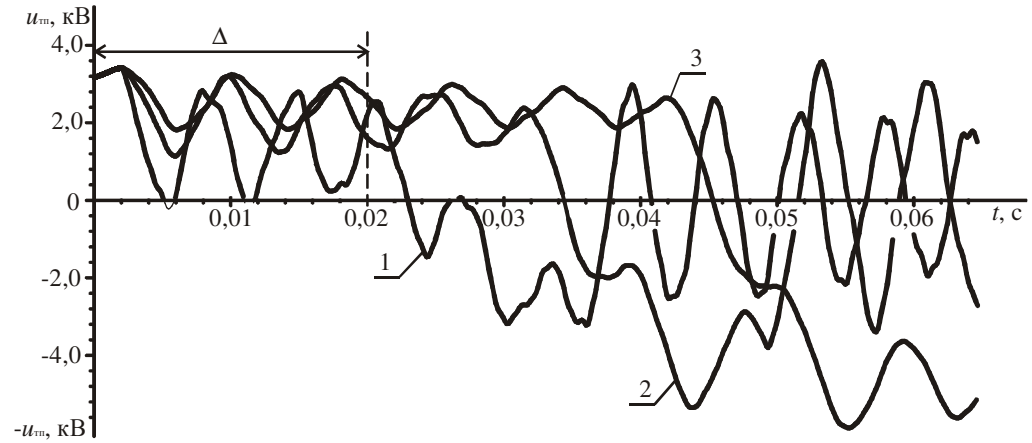


Рисунок 3.31 – Часові залежності зміни перехідної напруги на затискачах ТП при вимиканні КЗ в системи тягового електропостачання (при односторонньому живлені), яке відбулося на відстані $l\ \ (км)$: 1 – 2; 2 – 6; 3 – 10

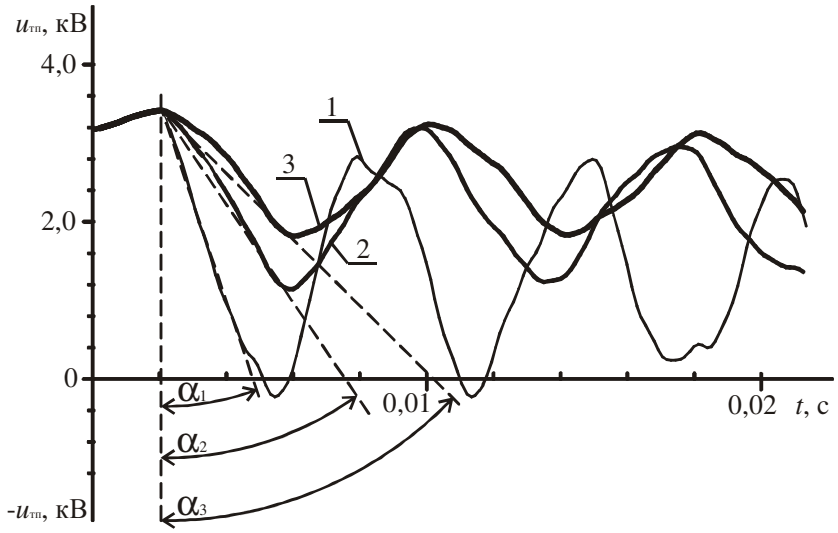


Рисунок 3.32 – Виділений інтервал Δ часової залежності зміни фідерної напруги (рис. 3.31)

Зміна струму КЗ в КМ представлена на рис. 3.33, із якого випливає, що характер перебігу процесу вимикання подібний до функцій зміни струму у фідерній чарунці. Однак відсутні значні коливання, що пояснюється впливом пасивного фільтра, який затримує проходження вищих гармонійних складових по ТМ.

При розрахунках схеми з двостороннім живленням міжпідстанційної зони довжиною $l = 20$ км приймемо, що середнє значення напруги живлення сусідньої ТП2 складає 3,3 кВ, струм уставки $I_{у2} = 2500$ А. Графіки зміни

струму кожної з ТП1 Воскобійня (ЕЧЕ-82) і ТП2 Платина (ЕЧЕ-41)представлено на рис. 3.34 і 3.35 відповідно.

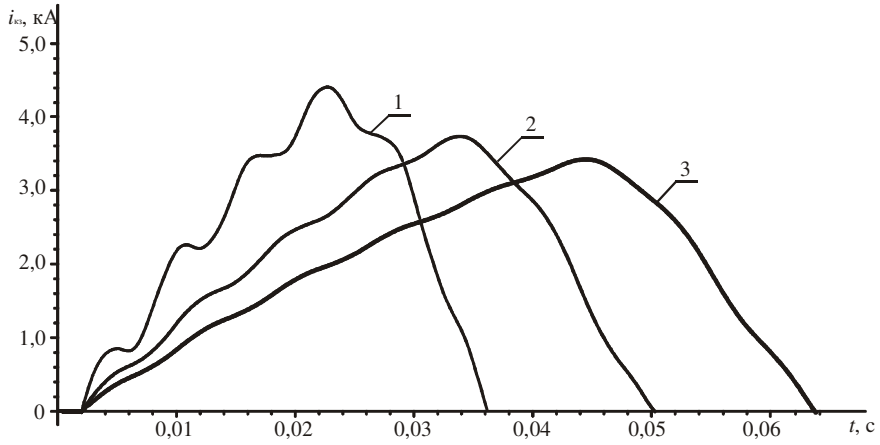


Рисунок 3.33 – Часові залежності зміни перехідного фідерного струму в КМ при вимиканні КЗ в системи тягового електропостачання (при консольному живленні), яке відбулося на відстані $l\ (км)$: 1 – 2; 2 – 6; 3 – 10

При розрахунках схеми з двостороннім живленням міжпідстанційної зони довжиною $l = 20$ км приймемо, що середнє значення напруги живлення сусідньої ТП2 складає 3,3 кВ, струм уставки $I_{у2} = 2500$ А. Графіки зміни струму кожної з ТП1 Воскобійня (ЕЧЕ-82) і ТП2 Платина (ЕЧЕ-41)представлено на рис. 3.34 і 3.35 відповідно.

На рис. 3.36 представлено графіки зміни струму який протікає через точку «металевого» короткого замикання (струм КЗ).

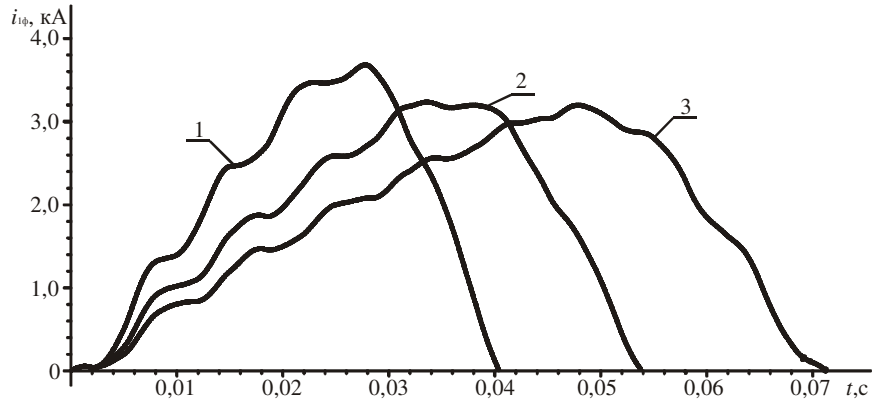


Рисунок 3.34 – Часові залежності зміни перехідного фідерного струму ТП1 при вимиканні КЗ в системи тягового електропостачання (при двостороньому живлені), яке відбулося на відстані $l\,(км)$: 1 – 2; 2 – 6; 3 – 10

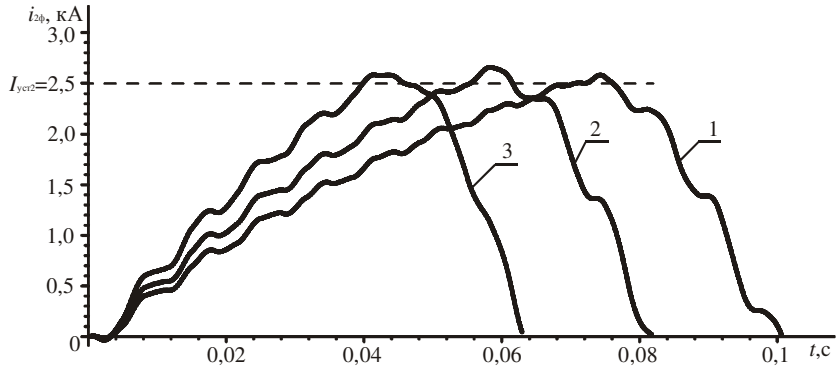


Рисунок 3.35 – Часові залежності зміни перехідного струму ТП2 при вимиканні КЗ в системи тягового електропостачання (при двостороньому живлені), яке відбулося на відстані $l\,(км)$: 1–18; 2–14; 3–10.

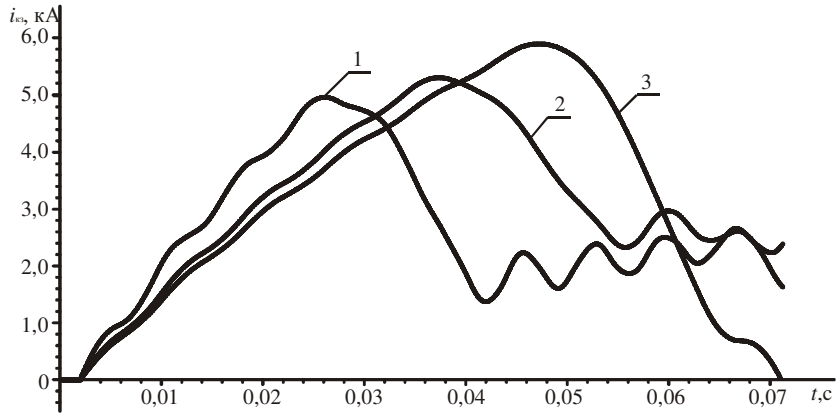


Рисунок 3.36 – Часові залежності зміни перехідного струму КЗ в системи тягового електропостачання, яке відбулося від ТП1 на відстані $l\,(км)$: 1 – 2; 2 – 6; 3 – 10

Особливою є величина терміну протікання струму КЗ, адже цей термін часу, головним чином, визначається терміном часу вимикання «найповільнішого» ШВ. Дійсно, як випливає з рис. 3.36, у випадку «1» та «2» струм КЗ продовжує підтримуватися струмом ТП2, у цих дослідах струм зникне лише при повному вимиканні фідерної зони зі сторін ТП1 і ТП2. Швидкодіючий вимикач, який найдовше вимикається, це є автомат, що знаходиться як найдалі від місця КЗ. Крім того, якщо уставки цього фідерного автомату завищені, він може і не вимкнутися, що видно із рис 3.35. Адже, якби в моделі уставка ТП2 була прийнята не 2,5 кА, а хоча б 2,7 кА, то струм короткого замикання підживлювався б струмом ТП2. По-друге, із рис. 3.35 випливає,

що максимальне значення фідерного струму ТП2 при вимиканні КЗ практично не залежить від зони короткого замикання і визначається ефективністю роботи дугогасної камери ШВ. По-третє, найбільш небезпечним для ТМ у разі виникнення дуги є саме ближнє КЗ, струм якого досягає найбільшого значення з усіх розглянутих випадків.

Виконаємо порівняння середнього КЗ, який виник на фідерній зоні з двостороннім «1» та консольним «2» живленнями [217]. Із рис. 3.37 випливає, що максимальне значення струму КЗ в обох випадках однакове і визначається, на думку автора, потужністю перетворювального агрегату ТП. Струм КЗ (рис. 3.38) у випадку двостороннього живлення, звичайно, найнебезпечніший, оскільки, за першим законом Кірхгофа, є сумою струмів фідерів прилеглих ТП. Кількість електрики, що проходить через точку КЗ для струму зображеного кривою 1 рис. 3.38 складає Q_1=223,8 А·с, а кількість теплоти пропорційна величині W_1=973330 $А^2$·с. Для струму, що описаний кривою 2 рис. 3.38, ці величини відповідно склали Q_2=115,5 А·с, W_2=298452 $А^2$·с. Це означає, що контактний провід при двосторонньому живлені ТМ в точці КЗ нагрівається в $\frac{973330}{298452}=3,26$ рази сильніше у порівнянні з одностороннім. При цьому імовірність перепалу контактного проводу збільшується в $\frac{223,5}{115,5}=1,94$ рази. Крім того, при двосторонньому живленні тягової мережі величина Q_1 наближається до критичного значення, оскільки у контактного проводу МФ-100 при 250 А·с і більше з'являються значні кратери й невеликі шийки.

В подальшому для моделювання режиму КЗ в СТЕП будь-якої з діючих електрифікованих ділянок залізниці достатньо лише внести чисельні значення переметрів відповідних елементів схеми заміщення і провести чисельне інтегрування у часі, як це зроблено в цьому підрозділі 3.5.

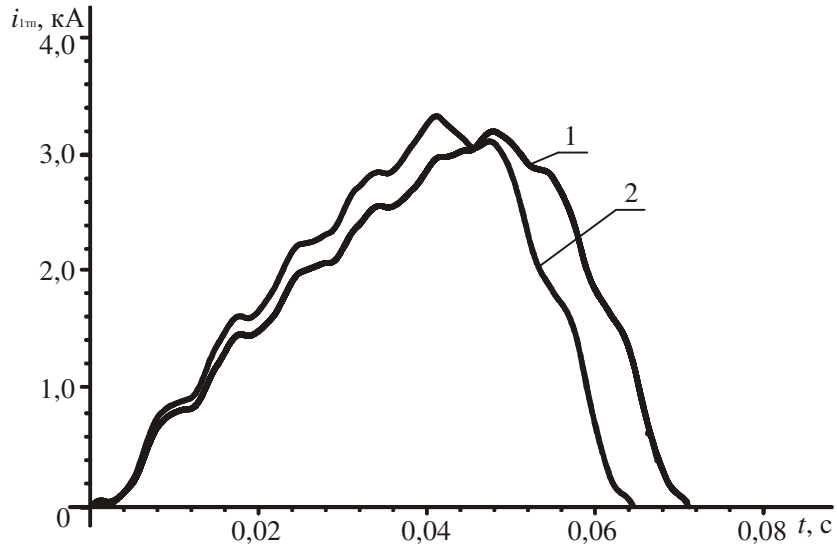


Рисунок 3.37 – Часові залежності зміни перехідного фідерного струму ТП1 при живленні фідерної зони: 1 – двостороннє; 2 – консольне

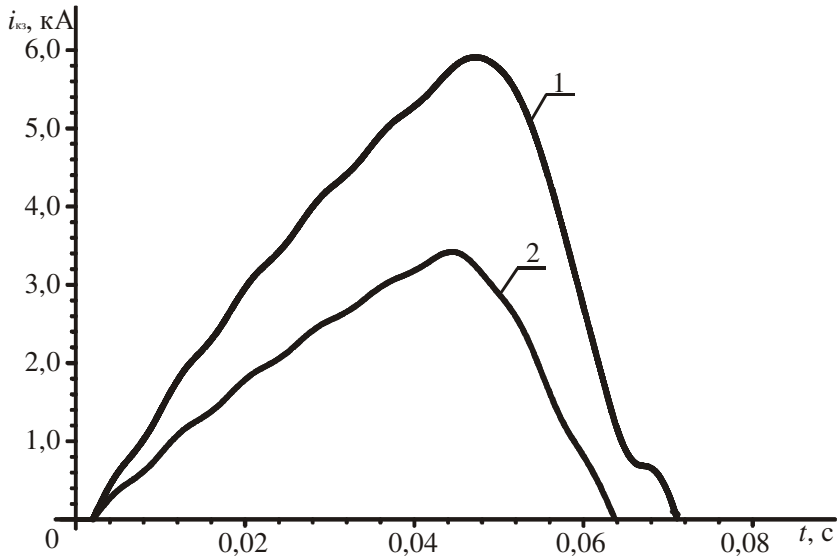


Рисунок 3.38 – Залежності зміни струму КЗ при живленні фідерної зони: 1 – двостороннє; 2 – консольне

3.6 Теорія роботи системи захисту тягового електропостачання, основаній на новому принципі

Із результатів експериментальних досліджень і математичного моделювання режимів КЗ, що приведені вище, випливає нова ознака, новий принцип, на якому може базуватися нова система релейного фідерного 3,3 кВ захисту. Ця ознака полягає в наступному.

Як випливає із експериментальних досліджень, а також результатів розрахунків, при КЗ в ТМ фідерна напруга ТП знижується. Найбільш різке, практично лінійне [218], її зменшення спостерігається в початковий інтервал часу аварійного перехідного процесу (рис. 3.1-3.3, а також рис. 3.32, 3.39-3.41). Таке зменшення фідерної напруги спостерігається в усіх випадках, незалежно від виду електрифікованої ділянки, фідерної зони, ТП, в Україні це чи в Росії, а також незалежно від виду КЗ («близьке», «середнє» чи «дальнє») і наявності чи відсутності ЕРС на фідерній зоні. Значення до якого зменшується ця напруга $U_{\text{ф min}}$ і швидкість $\frac{du_{\text{ф}}}{dt}$ її зниження залежать від виду КЗ. Тому ознакою, на якій може бути побудовано захист, на нашу думку, є крутизна фронту такого зменшення фідерної напруги $\left.\frac{du_{\text{ф}}}{dt}\right|_{t=0}$ [219, 220]. Швидкість $\frac{du_{\text{ф}}}{dt}$ різна в залежності від відстані місця КЗ до фідера з розглядуваним $u_{\text{ф}}$.

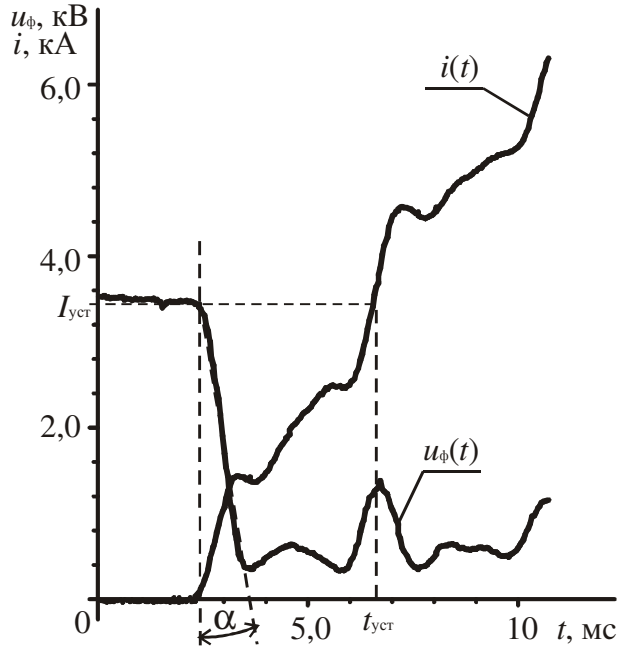


Рисунок 3.39 – Осцилограма вимикання подвійним вимикачем 2×ВАБ-43 близького КЗ, ТП Воскобійня (ЕЧЕ-82), ділянка Воскобійня (ЕЧЕ-82) – Плотина (ЕЧЕ-41), при $l = 0{,}5\ км$, $I_{\text{у}} = 3500\ A$

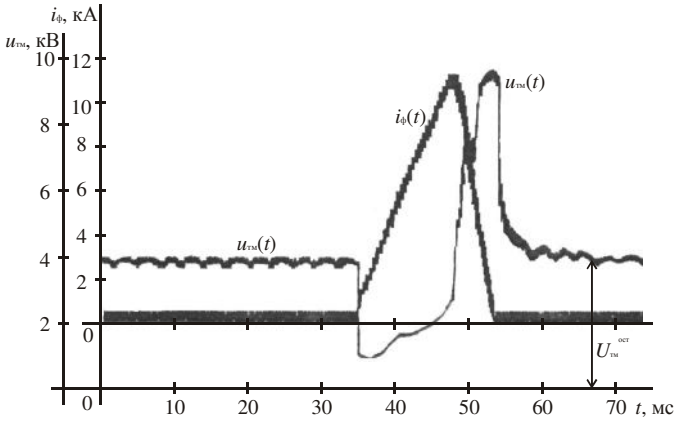
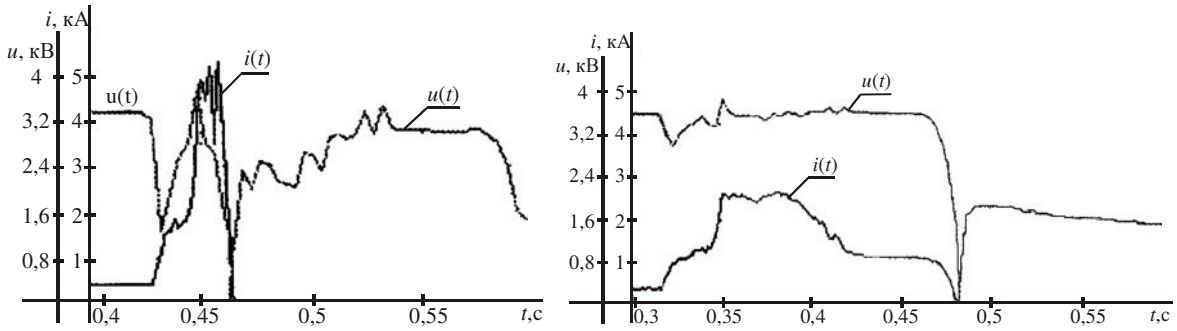


Рисунок 3.40 – Осцилограма вимикання подвійним вимикачем 2×ВАБ-49 глухого КЗ з усталеним струмом 27 кА на виході тягової підстанції Істок (за даними ОАО «УЕТМ») [72]



а) б)

Рисунок 3.41 – Осцилограми перехідних процесів вимикання ШВ ТП з двох сторін фідерної зони, КЗ в ТМ: а) – вимикання ШВ фідера №2 ТП «Ховріно»; б) – вимикання ШВ фідера №4 ТП «Останкіно» [33]

З метою теоретичного обґрунтування можливості використання крутизни фронту $\left.\frac{du_ф}{dt}\right|_{t=0}$ для створення захисту увімкнемо між фідером та рейкою вітку $R_д C$ рис. 3.42, яку назвемо «віткою захисту».

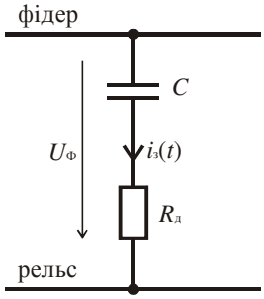


Рисунок 3.42 – Схема увімкнення «вітки захисту» у фідерну чарунку

До моменту КЗ струм $i_з(t)$ в цій вітці не протікав, внаслідок того, що фідерна напруга $u_ф$ є постійною (вважатимемо ідеально випрямленою) рівною деякому початковому значенню $U_{Фп}$ (рис. 3.43). В момент КЗ напруга $u_ф$ починає з точки «п» лінійно зменшуватися, нехай до деякого значення $U_{Фк}$, до точки «к». Сумістимо точку «п» з початком відліку часу «0», тобто, з моменту виникнення і подальшого протікання перехідного процесу зменшення фідерної напруги $u_ф(t)$.

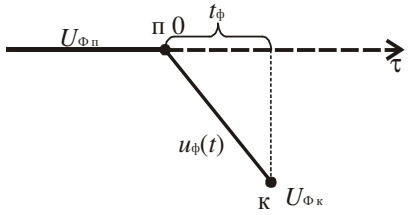


Рисунок 3.43 – Зміна фідерної напруги в початковий інтервал часу (виникнення) режиму КЗ

Під дією змінної (зменшення) напруги $u_ф(t)$, прикладеної до «вітки захисту», в останній починає протікати струм $i_з(t)$. Визначимо його за допомогою інтеграла Дюамеля [162], згідно якого можна записати:

$$i_з(t) = \int_0^t \frac{du_ф}{dt} G(t-\tau)\, d\tau, \qquad (3.60)$$

де $G(t)$ – перехідна провідність простого $R_д C$-кола, утвореного «віткою захисту» (рис. 3.42). Ця провідність дорівнює шуканому перехідному струму $i_з^1(t)$ кола рис. 3.42 при його вмиканні на одиничну напругу. Згідно [210], для $R_д C$-кола вона визначається виразом

$$G(t) = i_з^1(t) = \frac{1}{R_д} e^{-\frac{t}{T_з}}, \qquad (3.61)$$

де $T_з = R_д C$ – постійна часу кола з «віткою захисту».

Тоді, підставивши (3.61) в (3.60), для моментів часу перехідного процесу $0 \le t < t_Ф$ (рис. 3.43) величину струму $i_з(t)$ можна записати

$$i_з(t)=\frac{1}{R_д}\int_0^t\frac{du_ф}{dt}e^{-\frac{(t-\tau)}{T_з}}d\tau\,. \qquad (3.62)$$

Згідно з експериментальними даними (рис. 3.1-3.3, а також рис. 3.39-3.41), функція $u_ф(t)$ є лінійною

$$u_ф(\tau)=\frac{U_{Фк}-U_{Фп}}{t_ф}\tau \qquad (3.63)$$

і тоді її похідна представляє собою деяку постійну величину

$$\frac{du_ф}{dt}=\frac{U_{Фк}-U_{Фп}}{t_ф}, \qquad (3.64)$$

а, відповідно, цю похідну можна винести за знак інтеграла виразу (3.62). Після інтегрування, з врахуванням формули для $T_з$, отримаємо

$$i_з(t)=\frac{du_ф}{dt}\frac{1}{R_д}\int_0^t e^{-\frac{t}{T_з}}e^{\frac{\tau}{T_з}}d\tau=\frac{du_ф}{dt}\frac{1}{R_д}e^{-\frac{t}{T_з}}\left(T_з e^{\frac{\tau}{T_з}}\right)\Bigg|_0^t=$$

$$=\frac{du_ф}{dt}\frac{R_д C}{R_д}e^{-\frac{t}{T_з}}\left(e^{\frac{t}{T_з}}-1\right)=C\frac{du_ф}{dt}\left(1-e^{-\frac{t}{T_з}}\right)\,. \qquad (3.65)$$

Якщо стала часу $T_з$ в (3.65) достатньо велика, а $t_ф$ дуже маленька, тоді $e^{-\frac{t}{T_з}}\approx 1$, і маємо:

$$i_з(t)=C\frac{du_ф}{dt}\Bigg|_{t=0}\,. \qquad (3.66)$$

Тобто, згідно з (3.65) та (3.66), струм $i_з(t)$ у «вітці захисту», що знаходиться під дією спаду фідерної напруги при КЗ, прямо пропорційний швидкості зменшення цієї напруги на початку її зміни, тобто крутизні, або фронту спаду фідерної напруги.

Дамо теоретичне обґрунтування роботи ряду (у тому числі і деяких відомих [9, 12-13]) принципових можливих схем релейних пристроїв захисту, які базуються на отриманих, згідно з новою ознакою, виразах (3.65) та (3.66).

1. Найбільш простою є схема на основі шунта з $r_{ш}$, вона представлена на рис. 3.44, де $r_{р}$, $L_{р}$ - активний опір та індуктивність реле.

Для неї, згідно з законом Кірхгофа, маємо:

$$i_{з} - i_{ш} - i_{р} = 0, \tag{3.67}$$

$$r_{ш} i_{ш}(t) = r_{р} i_{р}(t) + L_{р} \frac{di_{р}}{dt}. \tag{3.68}$$

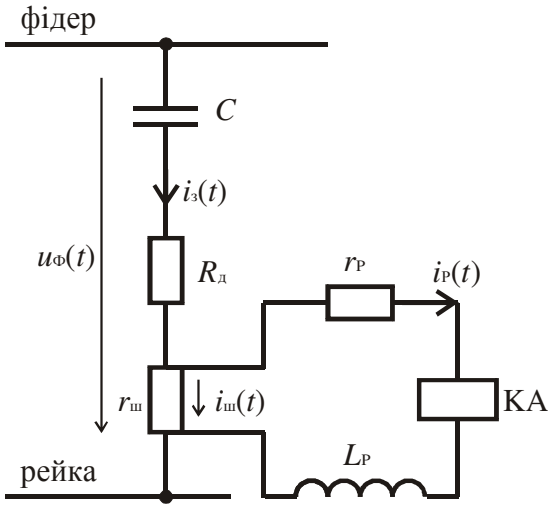


Рисунок 3.44 – Схема увімкнення шунта у «вітку захисту» в якості датчика перехідної електричної величини

Розв’язавши систему рівнянь (3.65), (3.67), (3.68), отримаємо:

$$i_{р}(t) = \frac{r_{ш} C}{r_{ш} + r_{р}} \frac{du_{ф}}{dt}\left(1 - e^{-t/T_{з}}\right) - \frac{L_{р}/r_{р}}{\frac{r_{ш}}{r_{р}} + 1} \frac{di_{р}}{dt}. \tag{3.69}$$

Якщо підібрати реле так, щоб його стала часу $T_{р} = L_{р}/r_{р}$ була настільки мала, що можна було знехтувати другою складовою у виразі (3.69), тоді для моментів часу $0 \le t < t_{Ф}$ (рис. 3.44) остаточно отримаємо:

$$i_{р}(t) = \frac{r_{ш} C}{r_{ш} + r_{р}} \frac{du_{ф}}{dt}_{t<t_{Ф}} \left(1 - e^{-t/T_{з}}\right), \tag{3.70}$$

тобто, практично $i_{р}(t) \sim \frac{du_{ф}}{dt}_{t<t_{Ф}}$.

2. Розглянемо схему, в якій джерелом сигналу для розглянутого захисту є спеціальний трансформатор струму з повітряним проміжком (рис. 3.45) [12-13].

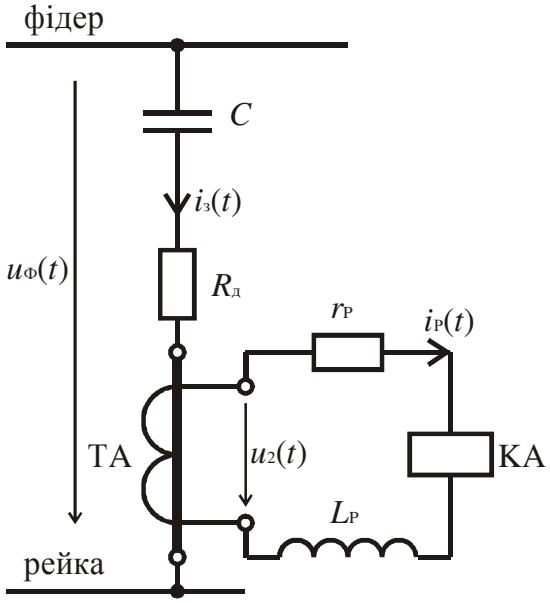


Рисунок 3.45 – Схему увімкнення трансформатора струму у «вітку захисту» в якості датчика перехідної електричної величини

В режимі КЗ, й тим самим при зміні фідерної напруги $u_ф(t)$, у «вітці захисту» з'являється змінний струм $i_з(t)$. В результаті, внаслідок явища взаємоіндукції, на вторинній обмотці трансформатора струму ТА індукується е.р.с. взаємоіндукції, яка створює на затискачах вторинної обмотки спад напруги від взаємоіндукції:

$$u_2(t) = M\frac{di_з}{dt}, \tag{3.71}$$

де М – коефіцієнт взаємоіндукції між обмотками трансформатора струму.

З іншого боку, для контура з реле струму за другим законом Кірхгофа:

$$u_2(t) = r_р i_р(t) + L_р\frac{di_р}{dt}. \tag{3.72}$$

Прирівняємо (3.71) до (3.72) і підставимо замість $i_з(t)$ вираз (3.65), отримаємо:

$$MC\frac{d}{dt}\left[\frac{du_ф}{dt}\left(1-e^{-t/T_з}\right)\right] = r_р i_р(t) + L_р\frac{di_р}{dt}. \tag{3.73}$$

Оскільки функція $u_{\text{ф}}(t)$ на початковій стадії короткого замикання є лінійною, то крутизна її фронту, тобто $\frac{du_{\text{ф}}}{dt}$, величина стала і тоді після диференціювання лівої частини рівність (3.73) прийме вигляд:

$$\frac{M}{R_{\text{д}}}\frac{du_{\text{ф}}}{dt}e^{-t/T_{\text{з}}} = r_{\text{р}}i_{\text{р}}(t) + L_{\text{р}}\frac{di_{\text{р}}}{dt}. \qquad (3.74)$$

Розділивши обидві частини рівності (3.74) на $r_{\text{р}}$ та прийнявши, що стала часу $T_{\text{р}}$ настільки мала, що другою складовою правої частини виразу (3.74) можна знехтувати, остаточно отримаємо

$$i_{\text{р}}(t) = \frac{M}{R_{\text{д}}r_{\text{р}}}\frac{du_{\text{ф}}}{dt}\bigg|_{t<t_{\Phi}} e^{-t/T_{\text{з}}}. \qquad (3.75)$$

Таким чином, струм реле струму (тобто його реакція) прямо пропорційна крутизні фронту імпульсу спадання фідерної напруги.

3. Розглянемо роботу захисту за схемою моста [12], в діагональ якого увімкнено реле КА (рис. 3.46). Завдяки рівним активним опорам R в плечах моста, він при нормальних режимах роботи (навіть якщо U_{Φ} буде не ідеально згладженим чи буде коливатися) буде знаходитися в рівновазі, тоді $u_{24}(t) = 0$ і струм реле $i_{\text{р}}(t)$ також дорівнюватиме 0 ($i_{\text{р}}(t) = 0$).

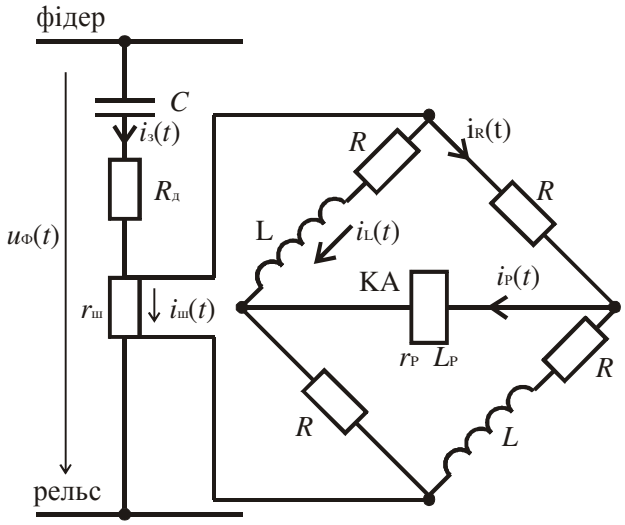


Рисунок 3.46 – Мостова схема в якості датчика перехідної електричної величини

При різкій зміні $u_{\text{ф}}$ струм $i_{\text{з}}(t) \neq 0$, і якщо стала часу моста T_M буде дуже маленького значення у порівнянні із сталою часу «вітки захисту» $T_{\text{з}}$, то при малому струму через реле $i_{\text{р}}(t)$ струм через плече моста буде дорівнювати [12]:

$$i_R = i_L \approx \frac{r_{\text{ш}}}{2R} i_{\text{ш}}. \tag{3.76}$$

Для контуру 1-2-4-1 (рис. 3.46) маємо

$$-Ri_L(t) - L\frac{di_L}{dt} + r_{\text{р}} i_{\text{р}}(t) + L_{\text{р}}\frac{di_{\text{р}}}{dt} + Ri_R(t) = 0 \tag{3.77}$$

чи з врахуванням рівності $i_R = i_L$:

$$L\frac{di_L}{dt} = r_{\text{р}} i_{\text{р}}(t) + L_{\text{р}}\frac{di_{\text{р}}}{dt}. \tag{3.78}$$

Для вузла біля шунта (рис. 3.46):

$$i_{\text{з}}(t) = i_M(t) + i_{\text{ш}}(t) \ .$$

Відповідно для вузла 1:

$$i_M(t) = i_R(t) + i_L(t) = 2i_L(t).$$

Тоді $i_{\text{з}}(t) = i_{\text{ш}}(t) + 2i_L(t)$, звідки

$$i_{\text{ш}}(t) = i_{\text{з}}(t) - 2i_L(t). \tag{3.79}$$

Підставимо в (3.79) вираз (3.65) для $i_{\text{з}}(t)$ і струм $i_{\text{ш}}(t)$ з виразу (3.76), отримаємо:

$$\frac{2R}{r_{\text{ш}}} i_L = C\frac{du_{\text{ф}}}{dt}\left(1 - e^{-t/T_{\text{з}}}\right) - 2i_L. \tag{3.80}$$

З цього виразу струм i_L дорівнює:

$$i_L = \frac{Cr_{\text{ш}}}{2(R + r_{\text{ш}})}\frac{du_{\text{ф}}}{dt}\left(1 - e^{-t/T_{\text{з}}}\right). \tag{3.81}$$

Підставимо (3.81) в (3.78) і продиференціювавши, отримаємо:

$$\frac{Lr_{\text{ш}}}{2(R + r_{\text{ш}})R_{\text{д}}}\frac{du_{\text{ф}}}{dt} e^{-t/T_{\text{з}}} = r_{\text{р}} i_{\text{р}}(t) + L_{\text{р}}\frac{di_{\text{р}}}{dt}. \tag{3.82}$$

Поділивши обидві частини рівності (3.82) на $r_{\text{р}}$ та враховуючи, що стала часу $T_{\text{р}} = L_{\text{р}} / r_{\text{р}}$ настільки маленька, що можна знехтувати складовою $L_{\text{р}} \frac{di_{\text{р}}}{dt}$, остаточно отримаємо:

$$i_{\text{р}}(t) = \frac{Lr_{\text{ш}}}{2\left(R + r_{\text{ш}}\right) R_{\text{д}} r_{\text{р}}} \left.\frac{du_{\text{ф}}}{dt}\right|_{t<t_{\Phi}} e^{-t/T_{\text{з}}}, \qquad (3.83)$$

тобто реакція реле часу пропорційна швидкості зменшення фідерної напруги.

Слід зазначити, що формули (3.70), (3.75) і (3.83) для струму реле справедливі за умови, що стала часу $T_{\text{р}} = L_{\text{р}} / r_{\text{р}}$ дуже маленька, чого легко досягти, застосовуючи електронні реле (але дуже важко – у електромагнітних).

Як було вище зазначено, всі види релейного захисту основані на порівнянні значень певних ознак при нормальних та аварійних режимах роботи системи. В запропонованому виді захисту такою ознакою є $\frac{du_{\text{ф}}}{dt}$, значення якої приведені в таблиці 3.11 для розглянутих вище результатів експериментів КЗ (рис. 3.1, 3.2, 3.3), виконаних на ділянках тягового електропостачання Придніпровської залізниці.

Таблиця 3.11

Значення напруги $u_{\text{ф}}(t)$ на затискачах ТП та швидкість зменшення її фронту в залежності від типу ШВ фідерної чарунки

Тип ШВ	Значення показників зміни фідерної напруги					
	Близьке КЗ		Середнє КЗ		Дальнє КЗ	
	$U_{\Phi\min}$, кВ	$\frac{du_{\text{ф}}}{dt}$, $кВ/с$	$U_{\Phi\min}$, кВ	$\frac{du_{\text{ф}}}{dt}$, $кВ/с$	$U_{\Phi\min}$, кВ	$\frac{du_{\text{ф}}}{dt}$, $кВ/с$
2×ВАБ-43 (рис. 3.1)	0,286	3214,0	1,364	1254,4	1,83	586,4
2×ВАБ-49 (рис. 3.2)	0,6	2722,5	1,73	712,5	2,4	476,5
ВАБ-206 (рис. 3.3)	0,5	2182,8	-	-	2,0	621,5

В деяких дослідах $u_{\text{ф}}(t)$ зменшується до від'ємного значення. Як випливає з таблиці 3.11, повільніше (менше $\frac{du_{\text{ф}}}{dt}$) зменшення $u_{\text{ф}}(t)$ і до меншого значення $U_{\Phi\min}$ зменшується $u_{\text{ф}}(t)$ при дальньому КЗ, що пояснюється більшими значеннями активного опору та індуктивності ТМ ($R_{\text{км}}$ і $L_{\text{км}}$). При вимиканні ШВ під час струмового перенавантаження $\frac{du_{\text{ф}}}{dt} = 330\ {кВ}/{с}$. Під час пуску ЕРС фідерна напруга не змінюється.

Для визначення $\frac{du_{\text{ф}}}{dt}$ в нормальному режимі роботи, що потрібно для порівняння з КЗ звернемося згідно з [221] (в п. 1 зазначено про можливість його використання у випадку відсутності галузевих нормативних документів), до такого показника якості електроенергії для електричних мереж постійного струму як коливання напруги, під яким розуміють швидку зміну, що відбувається зі швидкістю 1…2% за секунду. Тут 1…2% – відносне відхилення (амплітуда) коливання напруги δU_t, яке визначають відносною різницею між слідуючими один за одним екстремумами напруги

$$\delta U_t = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{ном}} 100\% .$$

Отже, максимальна зміна фідерної напруги (згідно цього виразу) складає: $0{,}02 \times 3{,}3 = 0{,}066\ кВ$ за 1 секунду, що значно нижче значень $\frac{du_{\text{ф}}}{dt}$, приведених в таблиці 3.11.

Тепер розглянемо екстремальне (теж у нормальному режимі) значення зміни фідерної напруги згідно з правилами технічної експлуатації (ПТЕ). Як відомо, згідно з ПТЕ, $U_{\max} = 4кВ$, $U_{\min} = 2{,}7кВ$. Тоді найбільш несприятливе відхилення напруги буде: $4 - 2{,}7 = 1{,}3\ кВ$ за 1 секунду, що значно нижче табличних значень. Останні значення зміни швидкості зміни фідерної напруги підтверджують також експериментальні дослідження, результати яких пред-

ставлені в роботі [222], середньоквадратичне відхилення напруги на струмоприймачі електровозів постійного струму $\sigma_U \le 215\ B$.

З цього короткого аналізу можна зробити висновок, що захист на запропонованому принципі:

1) «відрізняє» нормальні режими від аварійних;

2) «відрізняє» вид короткого замикання («близьке», «середнє», «дальнє»).

Згідно закону Ома $i(t) \sim u(t)$, тому виникає слушне запитання, для перехідних електричних величин в СЕТ постійного струму чи не буде величина $\left.\frac{di_{\text{ф}}}{dt}\right|_{t=0}$ пропорційною значенню $\left.\frac{du_{\text{ф}}}{dt}\right|_{t=0}$, адже відомо, що захист за швидкістю зростання струму не може в усіх випадках відрізнити експлуатаційний режим від аварійного [14]. Найбільша частка хибних вимикань ШВ ТП приходиться саме на реакцію захисного обладнання по швидкості зростання струму, тому на більшості електрифікованих ділянках цей вид захисту вимкнений [223]. Для відповіді на нього побудуємо залежність $\left.\frac{du_{\text{ф}}}{dt}\right|_{t=0} = f\left(\left.\frac{di_{\text{ф}}}{dt}\right|_{t=0}\right)$ (рис. 3.47), для розглядуваних вище осцилограм (рис.3.1, 3.2), отриманих при вимиканні ШВ типу ВАБ-43 та ВАБ-49.

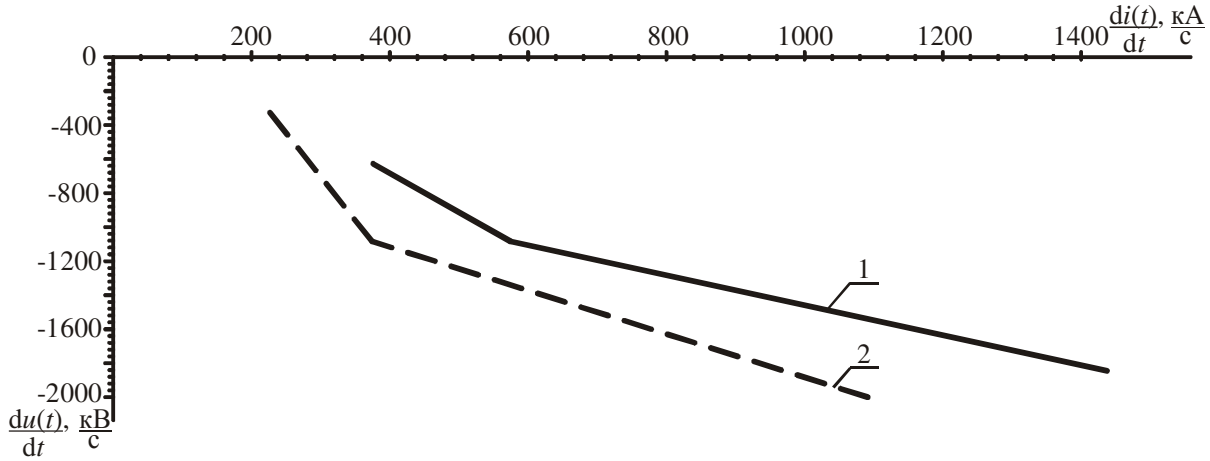


Рисунок 3.47 – Залежність величини швидкості зменшення фронту фідерної напруги від швидкості струму в початковий момент часу виникнення КЗ: 1 – при вимиканні КЗ за допомогою ШВ типу ВАБ-43 (рис. 3.1); 2 – при вимиканні КЗ за допомогою ШВ типу ВАБ-49 (рис. 3.2).

З представленого на рис. 3.47 графіку видно, що ця залежність, навіть при трьох дослідах КЗ, є явно нелінійною залежністю, тобто величина $\left.\frac{du_{\text{ф}}}{dt}\right|_{t=0}$ не пропорційна $\left.\frac{di_{\text{ф}}}{dt}\right|_{t=0}$, тим більше, що системи захисту на ознаці $\frac{di_{\text{ф}}}{dt}$ на ТП вимкнені, тобто не працюють.

Для реалізації захисту, основаного на принципі $\left.\frac{du_{\text{ф}}}{dt}\right|_{t=0}$, необхідно на ТП встановити три комплекти захисту, в кожен з яких реле струму налаштувати на відповідне значення $\frac{du_{\text{ф}}}{dt}$. В цьому випадку відповідне реле буде спрацьовувати при відповідному КЗ («близькому», «середньому», «дальньому») або застосовувати цей принцип в багатопараметричних системах захисту, побудованих на мікропроцесорній елементній базі. Така система захисту розроблена автором дисертації і описана в розділі 6 [224].

3.7 Висновки до розділу 3

1. Однозначної відповіді про переваги певного ШВ, у порівнянні з іншими, при вимиканні короткого замикання в тяговій мережі у всіх режимах (близьке, середнє, далеке) дати не можна, тобто універсально спрацьовувати існуючі швидкодіючі вимикачі не можуть, а саме:

– в режимі далекого короткого замикання найбільш ефективно працює вимикач 2хВАБ-43;

– в режимі середнього короткого замикання ефективність роботи вимикачів 2хВАБ-43 й 2хВАБ-49 приблизно однакові;

– в режимі близького короткого замикання надійність й ефективність роботи вимикачів типу 2хВАБ-43, 2хВАБ-49 і ВАБ-206 приблизно однакові;

– вимикач UR40-64S (SECHERON) помітно уступає іншим вимикачам по основним показникам.

Невелике значення коефіцієнту обмеження $K_{обм}$ ВАБ-206, який характеризує швидкість зростання напруги на дузі, свідчить про високоефективну роботу дугогасної камери з деіонізуючою решіткою.

2. З віддаленням точки короткого замикання від тягової підстанції потужності (S, P, Q) короткого замикання для всіх швидкодіючих вимикачів і додаткові втрати електроенергії зменшуються. Активна потужність короткого замикання у 1,5…2 рази вище у випадку, коли коротке замикання ліквідується швидкодіючими вимикачами старого зразку у порівнянні з новими.

3. На періоді існування аварійного режиму в тяговій мережі мають місце гармонійні складові перехідних електричних величин, частоти яких коливаються у межах 15…2000 Гц. Амплітудні значення основної (15…50 Гц) і вищих гармонійних складових перехідних струмів змінюються у широких межах і можуть негативно впливати як на кодові, так і на тональні рейкові кола, значення амплітуди навіть 50 гармонійної складової досягає 67,6 А. Проте стала часу реле апаратури СЦБ та зв'язку значно більше тривалості короткого замикання і тому мала імовірність того, що під час проходження імпульсу струму короткого замикання виникне помилковий сигнал в рейковому колі.

4. Результати розрахунків адекватної математичної моделі свідчать, що з точки зору імовірності перепалу контактного проводу при наявності електричної дуги найбільш небезпечним є ближнє коротке замикання, яке виникає на електрифікованій ділянці (без електрорухомого складу) з двостороннім живленням.

5. Найдовше вимикається швидкодіючий вимикач, що знаходиться як найдалі від місця короткого замикання. Крім того, у разі виникнення далекого короткого замикання і необґрунтовано завищеними уставками ШВ аварійний режим може тривати нескінченно довго, що було також виявлено автором при проведенні одного з натурних дослідів на діючій ділянці Придніпровської залізниці.

6. Теоретично обґрунтовано можливість використання різного лінійного (в початковий інтервал часу 1,2…3,0 мс перехідного процесу аварійного режиму короткого замикання в тяговій мережі) зменшення фронту фідерної напруги в якості нової ознаки, нового принципу, для розробки нової системи релейного захисту, яка, на відміну, від існуючих систем:

– розрізняє нормальні та аварійні режими роботи системи електропостачання;
– розпізнає вид короткого замикання («близьке», «середнє», «дальнє»);
– дозволяє ліквідувати мертві зони існуючих захисних пристроїв.

Таке зменшення фідерної напруги спостерігається в усіх випадках, незалежно від виду електрифікованої ділянки, фідерної зони, тягової підстанції, а також незалежно від виду короткого замикання («близьке», «середнє» чи «дальнє») і наявності чи відсутності ЕРС на фідерній зоні.

РОЗДІЛ 4

КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ З ЕЛЕКТРОРУХОМИМ СКЛАДОМ

На ЕРС постійного струму ТЕД увімкнені безпосередньо до контактної мережі. Це підсилює взаємозв'язок процесів в ТМ і на ЕРС, тому можливі більш різноманітні перехідні процеси як в СТЕП, так і на ЕРС [126]. Зокрема, КЗ в КМ є одночасно КЗ в силовому колі ЕРС, які супроводжуються складними і найбільш небезпечними з енергетичної точки зору перехідними процесами. Значний вплив на нормальну роботу СЕТ чинять поштовхи напруги, а також відриви-торкання струмоприймача.

Проте, автору дисертації не вдалось виконати експериментальні дослідження режимів КЗ в системі при наявності ЕРС (навантаження) внаслідок категоричної заборони на цей дослід зі сторони відповідних служб залізниць України. Тому нижче, в даному розділі, викладено результати математичного моделювання електромагнітних процесів при наявності електротягового навантаження. В деяких випадках, для доведення адекватності розроблених математичних моделей чи обґрунтування нових методів (а саме, метода «залишкової напруги»), в роботі використані осцилограми експериментальних досліджень [33, 72], виконаних на ділянках залізниць Росії.

4.1 Схеми заміщення електрорухомого складу та значення параметрів їх елементів

В розглядуваному вище аналізі літературних джерел (розділ 1) було зазначено, що більшість науковців в своїх математичних моделях представляли ЕРС, що рухається по фідерній зоні, у вигляді ідеального джерела струму. На початку своєї роботи автор даної роботи також створив схему заміщення і для неї відповідну систему рівнянь електромагнітного стану, де представив

електричний локомотив у вищезгаданому вигляді [225]. Моделювання було виконано в аналітичній формі, проте отримані часові залежності перехідних електричних величин не відображали в повній мірі процеси в СЕТ з ЕРС. Тому для описання процесів, які відбуваються в ЕРС автором за основу було обрано схему заміщення групи ТЕД (рис. 4.1), розглядувану в роботі [46].

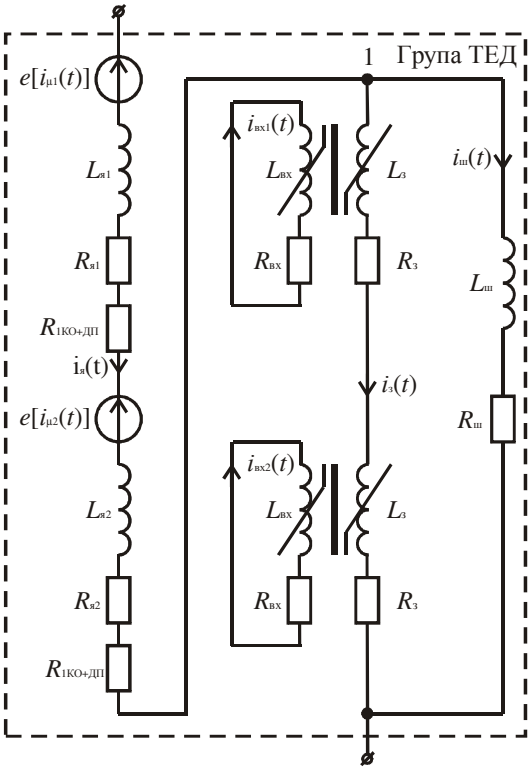


Рисунок 4.1 – Схема заміщення групи тягових електричних двигунів

Схема заміщення на рис. 4.1 включає наступні елементи: $R_я$ – активний опір обмотки якоря; $L_я$ – індуктивність обмотки якоря (прийнята лінійною); $R_{ко+дп}$ – активний опір компенсаційної обмотки та додаткових полюсів; $R_з$ – активний опір обмотки збудження (ОЗ); $L_з$ – індуктивність ОЗ (при I=$I_{ном}$); $R_ш$ – активний опір індуктивного шунта (визначається степенню послаблення збудження (ПЗ)); $L_ш$ – індуктивність індуктивного шунта;

Для дослідження електромагнітних процесів в даній роботі автором було обрано електровози серій ДЕ1, 2ЕЛ4, ВЛ10, ВЛ8. Розглядувані електровози є подібними за конструктивним виконанням: восьмивісні з двигунами постійного струму послідовного збудження. Вибір саме цього рухомого

складу було обумовлено найбільш широким його використанням на залізницях постійного струму України для вантажних перевезень. Слід зазначити, що в останні роки Укрзалізницею почалося впровадження нових сучасних електровозів серій 2ЕС10, а також 2ЕС6, які на даний період проходять випробування в умовах гірської місцевості Львівської залізниці. Проте, електровоз серії 2ЕС10 має асинхронний тяговий привод, а на 2ЕС6 встановлено ТЕД незалежного збудження від напівпровідникового перетворювача. Тобто, ці електровози за своїм конструктивним виконання значно відрізняються від тих, що на сьогодні найбільш поширені в експлуатації і розглядаються автором даної роботи.

Значення основних характеристик ЕРС різного типу, а також вищезазначених параметрів ТЕД представлено в додатку Д, заповнення таблиць в якому здійснювалося за наступними літературними джерелами: для електровозів серії ДЕ1 [226-229]; для 2ЕЛ4 – [229-234]; для ВЛ10 – [235-238]; для ВЛ8 [235-237, 239, 240].

Суттєвий демпфіруючий вплив на електромагнітні процеси в ТЕД чинять вихрові струми, викликані зміною магнітного потоку, яка відбувається в нестаціонарних режимах. Згідно роботи [241], величина цих струмів пропорційна абсолютному значенню, а також швидкості зміни основного потоку $i_{\text{вхр}} \sim \Phi \cdot \dfrac{d\Phi}{dt}$. У режимі ПЗ на характер зміни $\Phi(t)$ впливає і струм $i_{\text{ш}}(t)$ у вітці шунтування ТЕД. Існують різні підходи по врахуванню вихрових струмів, їх докладний аналіз приведено в роботі [46]. Найбільш точним і одночасно простим шляхом врахування вихрових струмів при розрахунках електромагнітних ППр є метод еквівалентної заміни дії всіх гармонік вихрових струмів одним короткозамкненим контуром [242], що магнітнозв’язаний з ОЗ ТЕД через магнітопровід. Еквівалентний опір короткозамкненого контуру вихрових струмів має різний характер при зміні магнітного поля $\Phi(t)$ двигуна у напрямку зростання і зменшення. У відповідності з дослідженнями [125], активний опір контуру вихрових струмів у період загасання і зростання

магнітного потоку $R_{\text{вхр}}^{\text{зг}}$ $R_{\text{вхр}}^{\text{зр}}$, наприклад, для ЕРС типу ДЕ1, визначається за виразами [46]:

$$R_{\text{вхр}}^{\text{зг}} = \frac{14,68 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{1 - \text{e}^{\left(-\frac{1,5 \cdot t}{0,1254}\right)}}},$$

$$R_{\text{вхр}}^{\text{зр}} = \frac{8,29 \cdot 10^{-3}}{1 - \text{e}^{\left(-\frac{t}{0,0118}\right)}}.$$

Таким чином, еквівалентну схему заміщення ТЕД можна зобразити у вигляді рис. 4.2 [125, 46], де Φ і $\Phi_{\text{вхр}}$ – основний МП і магнітний потік, створений вихровими струмами; $w_{\text{з}}$, – кількість витків ОЗ; $w_{\text{вхр}}$ – кількість витків короткозамкненого контуру, еквівалентного вихровим струмам; $\Phi_{\text{s з}}$ і $\Phi_{\text{s вхр}}$ – магнітні потоки розсіяння відповідно ОЗ і короткозамкненого контуру.

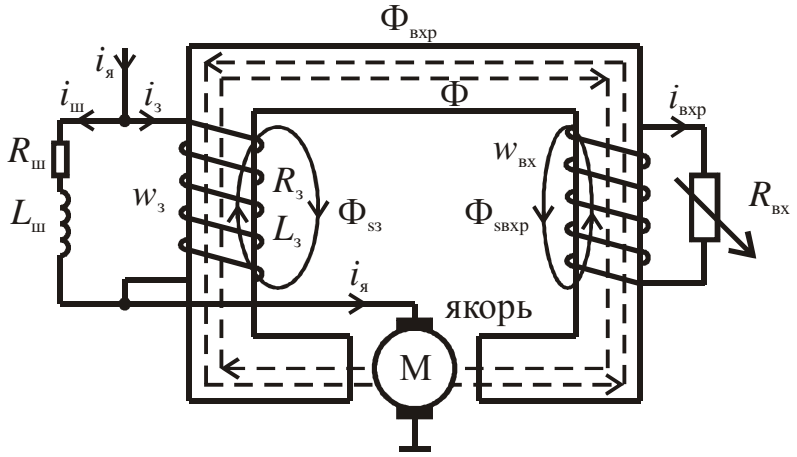


Рисунок 4.2 – Схема заміщення тягового електродвигуна [125, 46]

Для дослідження перехідних електромагнітних процесів в СЕТ активні опори обмоток ТЕД були перераховані з врахуванням нагріву за відомою із фізики формулою (3.13). Температура нагрітої (“гарячої”) обмотки, згідно з ГОСТ 2528-81, приймається рівною $+115^{\circ}\text{C}$. Значення опорів нагрітих котушок представлено в таблиці Д.2 додатку Д.

Залежність проти-е.р.с. $e(i_з)$ якоря ТЕД, як відомо, є величиною пропорційною основному магнітному потоку:

$$e(t) = e(i_з(t)) = C_w \cdot \omega \cdot \Phi(i_з(t)), \qquad (4.1)$$

де $\Phi(i_з(t))$ – основна крива намагнічення магнітопровода ТЕД електровоза, що апроксимована поліномом шостого порядку:

$$\Phi(i_з) = a + b \cdot i_з + c \cdot i_з^2 + d \cdot i_з^3 + e \cdot i_з^4 + f \cdot i_з^5 + k \cdot i_з^6.$$

Коефіцієнти a, b, c, d, e, f, k полінома представлено в таблиці Д.2 додатку Д.

Величину швидкості руху ЕРС, а відповідно і кутова частота ω обертання валу ТЕД, в залежності від струму якоря визначали за швидкісними характеристиками кожного типу рухомого складу і приведені в таблицях Д.3, Д.4 додатку Д. Силова схема електровозу визначається режимом його ведення, тобто, саме позицією головного контроллера, яку встановлює машиніст. Як відомо, може бути послідовне з'єднання ТЕД – «С»-з'єднання, послідовно-паралельне – «СП»-з'єднання; паралельне – «П»-з'єднання (рис. 4.3).

У подальшому виконання поставленої задачі, тобто, розрахунки і аналіз перехідних електромагнітних процесів в розглядуваних режимах методом математичного моделювання, передбачає розробку і складання математичних моделей процесів, що протікають в СЕТ; при цьому прийняті такі припущення: температура повітря навколишнього середовища складає +20ºС; розглянуті вище параметри усіх ТЕД, зубчастих передач і діаметри бандажів одного ЕРС мають однакові значення і відповідають паспортним даним; швидкість руху ЕРС в період ППр залишається незмінною, що пояснюється тим, що швидкість руху електровоза з потягом в $\approx 10^3$ разів менше швидкості протікання електромагнітних ППр; рух потягу здійснюється на прямолінійній ($R_{кр} = \infty$) горизонтальній ділянці з $i = 0\,‰$; ділянка колії безстикова; ППр в паралельно увімкнених ТЕД протікають синхронно; ємність елементів силового кола не враховується.

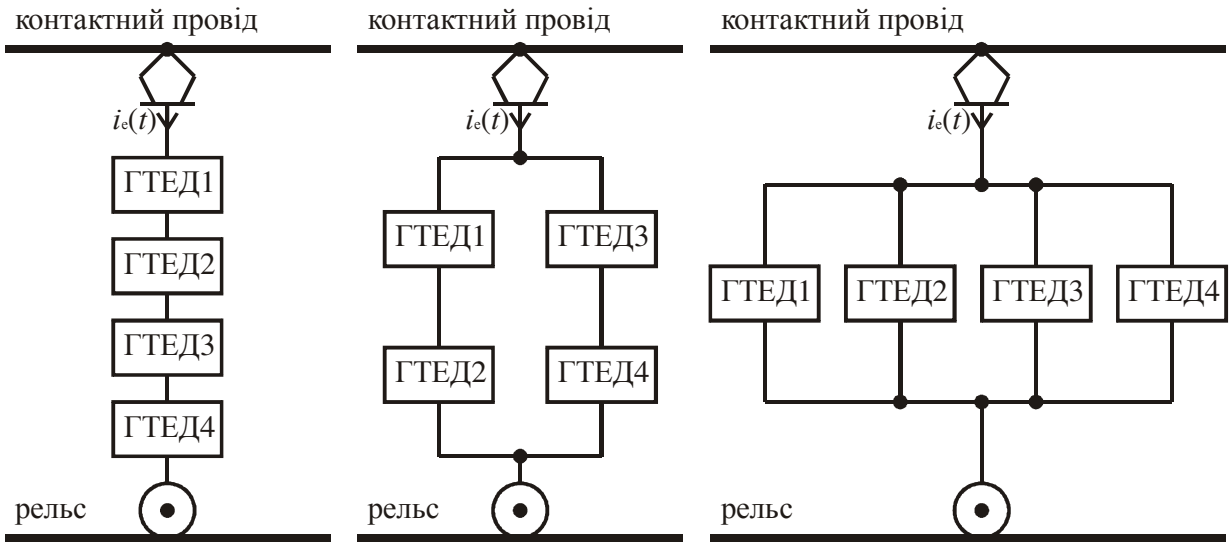


Рисунок 4.3 – Схеми з'єднання силового кола ЕРС: а) «С»-з'єднання; б) «СП»-з'єднання; в) «П»-з'єднання; ГТЕД – група тягових двигунів

4.2 Теоретичні передпосилки і причини виникнення генераторних струмів

Генераторні струми в ЕРС, а отже і в усій системі електротяги, можуть створюватись не лише спеціальним нормальним режимом рекуперативного гальмування, але й в аварійних режимах, які виникають в ТМ, а саме [243]: при КЗ і різких експлуатаційних технологічних коливаннях напруги U_e на струмоприймачі ЕРС [244], точніше при стрибкоподібних поштовхах-спадах ΔU_e цієї напруги. Обидва зазначені режими (і КЗ, і поштовхи-спади) найбільш часті в існуючій СЕТ постійного струму складні за протіканням і тому малодосліджені навіть для російських електрифікованих ділянок і зовсім не досліджені для таких же ділянок залізниць України.

На відміну від користі генераторних струмів рекуперативного гальмування генераторні струми аварійних режимів є не лише некорисними, а навіть небезпечними. ЕРС в генераторному режимі являє собою джерело електроенергії (джерело струму), що підживлює місце КЗ й тим самим робить його більш енергонебезпечним.

У порівнянні з тяговими струмами генераторні струми, що виникають в елементах СЕТ, є більш рідкісним явищем. Насамперед, вони створюються спеціальним режимом рекуперативного гальмування, чке ми тут їх не розглядаємо, далі мова буде йти про аварійні генераторні режими.

Вплив аварійних генераторних струмів на ТМ найбільш повно приведена в роботах [15, 17, 245]. Однак в цих дослідженнях не отримано і тому не проаналізовано (при поясненні) механізму виникнення струмів. По-друге, виникнення генераторних струмів вивчено лише при КЗ в ТМ. По-третє, дослідження виконано для російських залізниць і для перших електровозів (ВЛ19). Крім цього, в [15, 245] дещо неточні висновки відносно термінів часу, а також імовірності переходу ТЕД в генераторний режим, що обумовлено, певно, умовами виконання в цій роботі дослідів при загальмованих двигунах і односторонньому живлені КМ. Нарешті, в роботі [245] не запропоновано способи і засоби переривання виникнення чи зменшення генераторних струмів.

Для аналізу механізму виникнення генераторних струмів розглянемо, наприклад, електричну схему заміщення однієї групи ТЕД електровоза постійного струму ДЕ1 (рис. 4.1). Для неї у режимі повного збудження справедливим є рівняння [246]:

$$2\left(R_{\text{я}}+R_{\text{з}}\right)\cdot i_{\text{я}}\left(t\right)+2L_{\text{я}}\frac{di_{\text{я}}}{dt}+2\cdot 2p\cdot\sigma_{\text{з}}\cdot w_{\text{з}}\frac{d\Phi}{dt}+2\cdot e\left(t\right)=u_{\text{е}}\left(t\right),\quad (4.2)$$

де $u_{\text{е}}\left(t\right)$ – напруга на струмоприймачі ЕРС (при «П»-з'єднанні силового кола); $2p\cdot\sigma_{\text{з}}\cdot w_{\text{з}}\frac{d\Phi}{dt}$ – е.р.с. самоіндукції обмотки збудження.

Позначимо другий, третій та четвертий доданки в лівій частині рівняння (4.2) як $e_{\text{г}}\left(t\right)$ і назвемо результуючою генераторною е.р.с., тоді струм електровоза $i_{\text{е}}\left(t\right)$ можна записати як:

$$i_{\text{е}}\left(t\right)=\frac{u_{\text{е}}\left(t\right)-e_{\text{г}}\left(t\right)}{2\left(R_{\text{я}}+R_{\text{з}}\right)}.$$

Під час певних перехідних режимів напруга на струмоприймачі електровоза $u_{\text{е}}(t)$ та його струм $i_{\text{е}}(t)$ змінюються в часі, що призводить до порушення рівноваги роботи й тим самим переходу ТЕД у режимі генерації:

$$e_{\text{г}}(t) = 0{,}5u_{\text{е}}(t) + (R_{\text{я}} + R_{\text{з}}) \cdot i_{\text{г}}(t) + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{е}}}{dt} + 2p \cdot \sigma_{\text{з}} \cdot w_{\text{з}} \frac{d\Phi}{dt} + 2 \cdot e(t). \quad (4.3)$$

Із (4.3) випливає, що струм в електровозі, а, отже, і в ТМ, змінить знак на від'ємний, тобто стане генераторним, у випадку, коли генераторна е.р.с. $e_{\text{г}}(t)$ перевищить напругу на струмоприймачі $u_{\text{е}}(t)$ електровоза, тобто при умові [247]:

$$u_{\text{е}}(t) < e_{\text{г}}(t). \quad (4.4)$$

Отже, якщо в нормальному тяговому режимі $u_{\text{е}}(t) > e_{\text{г}}(t)$, то щоб виконалась умова (4.4), й тим самим здійснився генераторний режим потрібно різке зменшення за якихось причин напруги $u_{\text{е}}(t)$ або збільшення $e_{\text{г}}(t)$ [248]. Тобто напруга $u_{\text{е}}(t)$ повинна знижуватися швидше, ніж $\Phi(t)$ і, отже, $e_{\text{г}}(t)$. Проаналізуємо ці можливі причини.

Напруга на струмоприймачі $u_{\text{е}}(t)$ може зменшитись за таких причин. Перша (без втрати контакту струмоприймача з КП) – в результаті звичайних експлуатаційних технологічних коливань. Як показують статистичні дослідження [222, 249], такі коливання спостерігаються в межах 2230…3990 В для електровозів ВЛ8 і ДЕ1. Загалом ці коливання відбуваються з невеликою частотою, десь до 1 Гц. Однак під час цих коливань можливі і стрибкоподібні (поштовхом) зміни напруги $u_{\text{е}}(t)$. Наприклад, на ділянках Придніпровської залізниці для електровозів ДЕ1 з імовірністю 0,8 спостерігаються поштовхи-спади напруги ΔU_e від 209 до 861 В в [250]. Певно, при таких різких спадах напруги в ТМ електровоз переходить в генераторний режим.

Напруга на струмоприймачі $u_{\text{е}}(t)$ може зменшитись, причому різко, у режимі КЗ в ТМ, що випливає із такого простого рівняння:

$$U_{\text{е}} = E_{\text{тп}} - i_{\text{к}} \cdot R_{\text{тм}} = E_{\text{тп}} - i_{\text{к}} \cdot R_{\text{отм}} \cdot l_{\text{ек}}, \quad (4.5)$$

де $E_{тп}$ -е.р.с. ТП; $i_{кз}$ - струм КЗ в ТМ; $R_{отм}$ - питомий опір ТМ (Ом/км); $l_{ек}$ - відстань, на якій знаходиться ЕРС від місця КЗ.

Із (4.5) випливає, що зі збільшенням $l_{ек}$ збільшується спад напруги в проводах ТМ, зокрема на ділянках «ек» (рис. 4.4), й тим самим зменшується $U_{е}$. Тобто, $U_{е}$ в режимі КЗ залежить від місця розташування ЕРС і схеми живлення ТМ. І зрозуміло, що «необхідне» для генераторного режиму $U_{е}$ буде не при кожному КЗ, а лише у випадку достатньої величини спаду напруги в ТМ, тобто, достатньому значенні спаду напруги $i_{к} \cdot R_{отм} \cdot l_{ек}$.

Другим фактором цієї умови є значення і характер зміни (збільшення) $e_{г}(t)$, яка, як відомо, визначається за виразом (4.1).

Як зазначалось, найбільш розповсюдженим і небезпечним аварійним режимом у системі електротяги є режим КЗ в ТМ, тому далі у подальших підрозділах, методом математичного чисельного моделювання дослідимо закономірності виникнення і проаналізуємо результати численних розрахунків генераторних струмів у режимах КЗ. Як зазначалось в [9], процеси, що виникають при переході ТЕД в момент КЗ в КМ в генераторний режим, достатньо складні і практично мало досліджені.

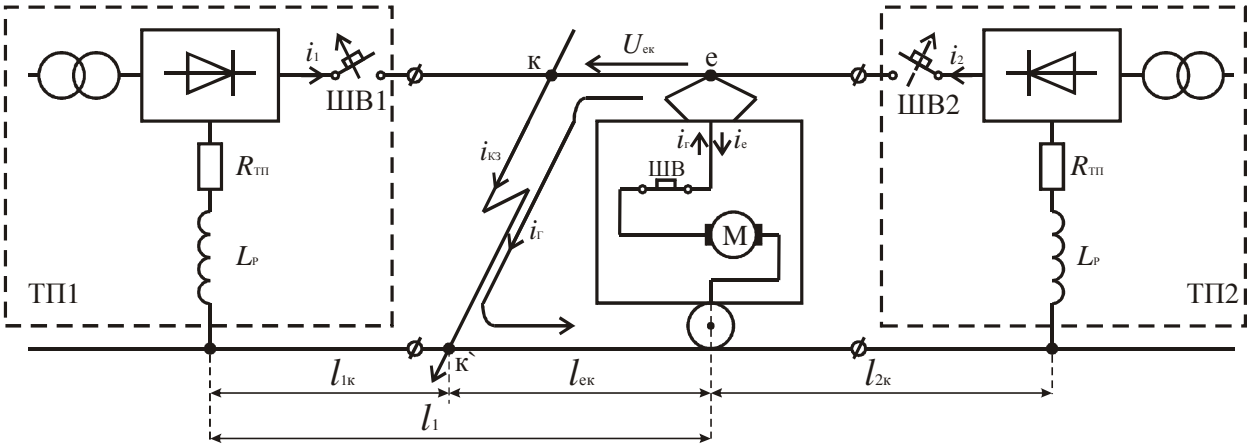


Рисунок 4.4 – Схема системи електричної тяги в режимі КЗ на фідерній зоні

Для кращого розуміння механізму виникнення генераторних струмів в наступних підрозділах 4.2.2 і 4.2.3 розглянемо поки що якісно електромагнітні процеси, що супроводжують появу цих струмів.

4.2.1 Коротке замикання в тяговій мережі при консольній схемі живлення

1. КЗ за ЕРС. До КЗ в точках 3-3’ (рис. 4.5) струм електровоза $i_д$ у тяговому режимі дорівнює фідерному струму $i_ф$ і нехай поїзд рухається з певною швидкістю, тоді швидкість обертання якорів ω ТЕД буде незмінною (у виразі проти е.р.с. (4.1)).

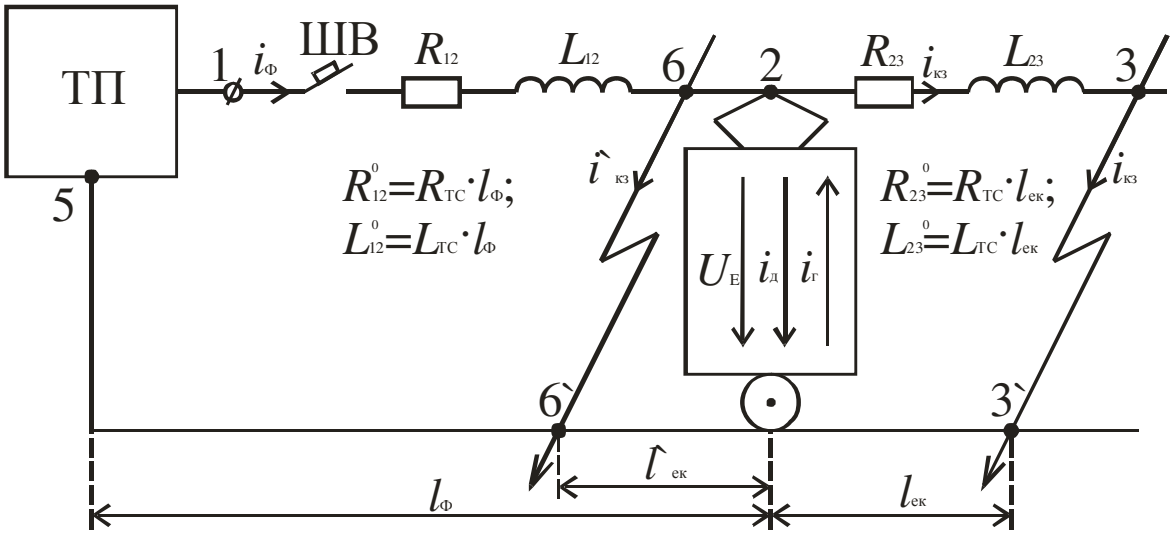


Рисунок 4.5 – Схема системи електричної тяги з консольним живленням фідерної зони в режимі КЗ

Нехай КЗ відбулося на відстані $l_{ек}$ за ЕРС (в т. 3-3’, рис. 4.5). Тоді, внаслідок шунтування ЕРС віткою КЗ й тим самим зростання струму $i_{кз}$ і згідно закону Кірхгофа, що $i_ф = i_д + i_к$, струм $i_д$ ЕРС повільно зменшується, а фідерний струм $i_ф$ зростає (рис. 4.6). Але в цьому випадку поки що будемо вважати, що $i_ф$ не досягає своєї уставки і тому ШВ ТП не спрацьовує. В результаті напруга $u_е(t)$ зменшується і з часом ППр стає рівним U_{23} (рис. 4.5):

$$U_{23} = R_{23} \cdot i_{кз} + L_{23} \frac{di_{кз}}{dt} \qquad (4.6)$$

Одночасно, зі зменшенням $i_д$ зменшується потік $\Phi(t)$, але повільніше, ніж $u_е(t)$ (внаслідок демферуючої дії вихрових струмів, а в режимі ПЗ ще й

демферуючої дії струму у вітці шунта). І тоді, також повільно, зменшується проти-е.р.с., а отже і $e_{г}(t)$.

Далі можливі такі випадки:

а) відстань $l_{ф}$ (рис. 4.5) достатньо велика, щоб $U_{е}$, яка дорівнює $U_{23} = R_{23} \cdot i_{кз} + L_{23} \dfrac{di_{кз}}{dt}$ або $U_{12} = E_{тп} - R_{12} \cdot i_{ф} - L_{12} \dfrac{di_{ф}}{dt}$, була більша, ніж $e_{г}(t)$ і тому генераторний режим не спостерігається (рис. 4.6).

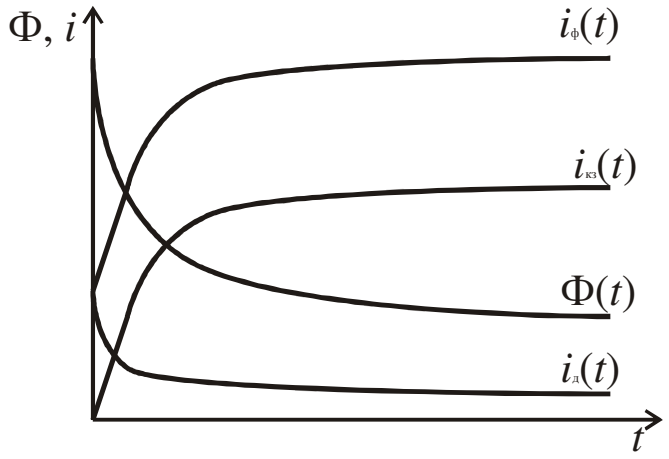


Рисунок 4.6 – Перехідні струми і магнітний потік в режимі КЗ (якісний спрощений загальний вигляд)

б) при достатньо малій $l_{ф}$ величина U_{23} теж мала, а отже невелика напруга $U_{е}$ на струмоприймачі, яку $e_{г}(t)$ може перевищувати, створюючи генераторний струм.

2. КЗ перед ЕРС. У режимі КЗ в точках 6-6’ (рис. 4.5), тобто перед ЕРС у випадку, коли $l'_{ек} = 0$, напруга $u_{е}(t)$ і струм $i_{д}$ спадають різко, а $\Phi(t)$ і $e_{г}(t)$ (за попередніх причин) – повільно і тому в ЕРС виникає генераторний струм $i_{г}(t)$ (рис. 4.5), але в ТМ він не приходить, замикаючись через закоротку 6-6’.

При достатньому віддаленні точки КЗ 6-6’ від ЕРС фідерний струм $i_{ф}(t)$ і вони будуть збільшуватись (рис. 4.7). Одночасно повільно знижуються напруга $u_{е}(t)$ на ЕРС і його струм $i_{е}(t)$. Своєї уставки досягає $i_{ф}(t)$ і ШВ ТП вимикається в результаті відбувається повне зняття живлячої напруги від ТП

і різко знижується $u_{\text{е}}(t)$. Також різко зменшується фідерний струм $i_{\text{ф}}$ і струм ЕРС (рис. 4.7). Істотно зменшується струм збудження ТЕД і їх основний магнітний потік. Але він, як і $i_{\text{г}}(t)$, зменшується повільніше, ніж $u_{\text{е}}(t)$, тому виконується умова (4.4) для появи генераторного струму $i_{\text{г}}(t)$, який протікає і по ТМ, і по ЕРС. Далі $i_{\text{г}}(t)$ досягши свого максимального значення, як і $i_{\text{кз}}(t)$, повільно зменшується до нуля, підтримуючи спадання $\Phi(t)$ і $i_{\text{г}}(t)$ [251].

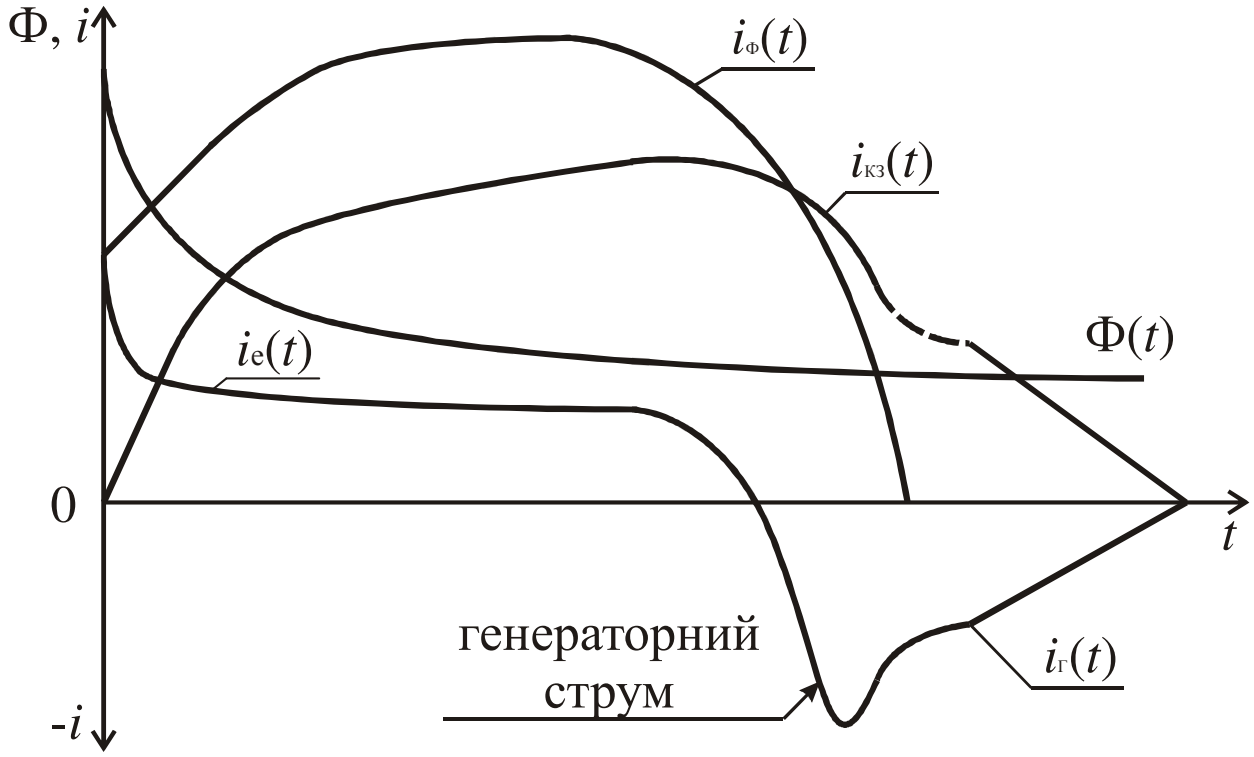


Рисунок 4.7 – Перехідні струми і магнітний потік в режимі КЗ (якісний вигляд)

4.2.2 Коротке замикання в тяговій мережі при двосторонній схемі живлення

Двостороннє живлення є більш цікавим з точки зору переходу ЕРС у режим короткочасної генерації, бо перехідні процеси в контактній мережі при КЗ, як правило, починаються і протікають більш складніше, ніж при односторонньому живленні. При цьому, як показують дослідження [15, 33], найбільш важким є режим КЗ біля однієї із ТП. Тому у подальшому аналізуватимемо режим КЗ біля ТП2 (рис. 4.8).

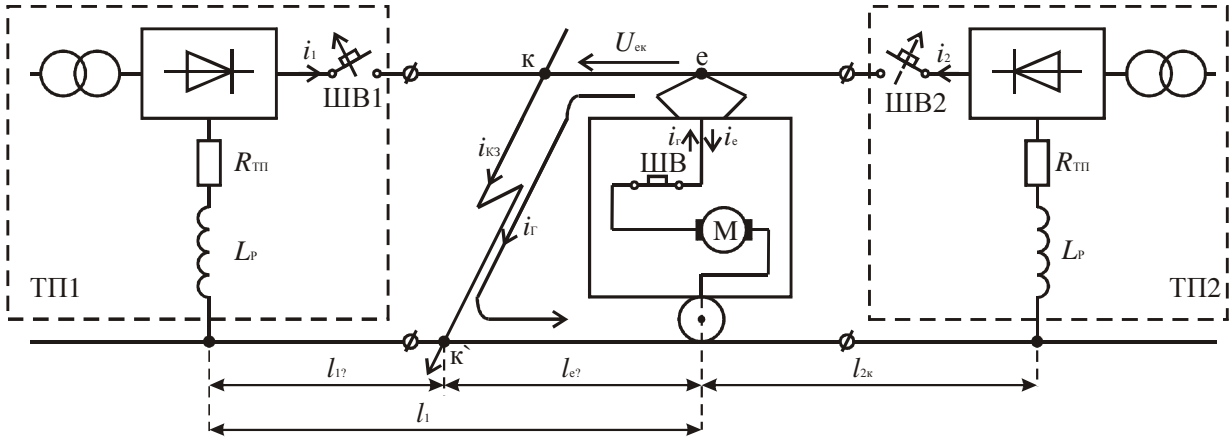


Рисунок 4.8 – Схема системи електричної тяги в режимі КЗ на фідерній зоні

Факт переходу ЕРС в генераторний режим і характер протікання $i_г(t)$ залежить від відношення спаду напруги $U_{ек}$ в ТМ (рис. 4.8) і генераторних е.р.с. $e_г(t)$ тягових двигунів. А напруга $U_{ек}$, в свою чергу, залежить від $l_{ек}$, тобто від місця розташування ЕРС на тяговій мережі.

Якщо $l_{ек}$ відносно невелике, тобто ЕРС розташовано поблизу ТП2, тоді струм КЗ $i_{кз}$ і струм i_2 ТП2 різко зростають. Струм i_2 досягає своєї уставки і ШВ ТП2 вимикається, а струм $i_{кз}$, після різкого зростання, зменшується до нового усталеного значення (рис. 4.9). Одночасно, струм i_1 (від ТП1) повільно зростає теж до нового усталеного значення. Напруга $u_е(t)$ різко спадає, стає рівною спаду $U_{ек}$, а воно мале, бо $l_{ек}$ невелике. В той же час магнітний потік $\Phi(t)$ і струм $i_г(t)$ спадають повільно, виконується умова (4.4), в результаті виникає генераторний струм $i_г(t)$, який замикається через «закоротку». Після певного кидка $i_г(t)$ повільно зменшується до нуля по мірі загасання $\Phi(t)$.

Зі збільшенням $l_{ек}$ (при русі поїзда) величина $U_{ек}$ зростає (але будемо вважати, що ШВ ТП1 ще не спрацьовує) і тому з часом загасання $\Phi(t)$ струм ЕРС переходить із генераторного у двигунний (рис. 4.10) і останній, після невеликого зростання, досягає свого усталеного значення.

Якщо ж $l_{\text{ек}}$ збільшується далі (за рахунок руху поїзда), тобто ЕРС знаходиться ще ближче до ТП1, тоді струм i_1 ТП1 різко зростає, досягає своєї уставки, в результаті ШВ ТП1 вимикається і струм i_1 спадає до нуля (рис. 4.11). Тим самим вимикається повністю живляча напруга для ЕРС (бо ШВ ТП2 вимкнувся ще раніше).

Спад напруги $U_{\text{ек}}$, а отже і $u_{\text{е}}(t)$, різко зменшується до нуля, а $\Phi(t)$ і $e_{\text{г}}(t)$ зменшуються повільно і ЕРС після тягового режиму (рис. 4.10), незалежно від розташування, переходить у режим повторної генерації (рис. 4.11), який триває доти, поки генераторний струм не розмагнітить магнітну систему тягових двигунів і $\Phi(t)$ не зменшиться до нуля.

Заслуговує уваги також режим КЗ між ТП1 і ЕРС. Нехай $l_{1\text{к}} < l_1$, тобто ЕРС розташований на невеликій відстані від ТП1 та виникло КЗ в точці к-к' (рис. 4.4).

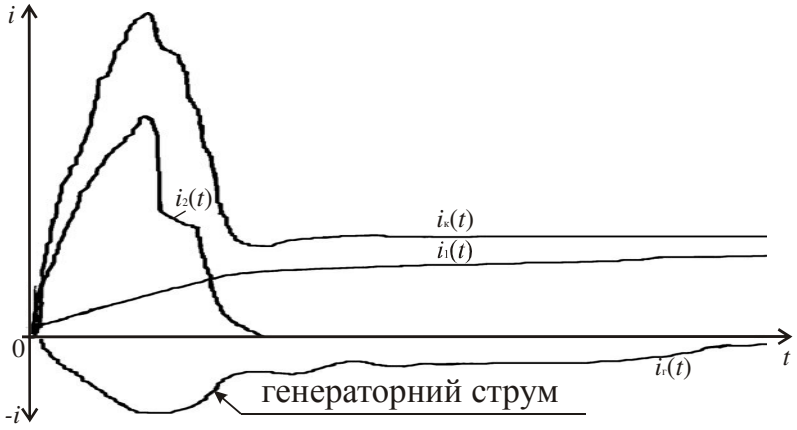


Рисунок 4.9 – Перехідні струми в режимі КЗ (якісний вигляд)

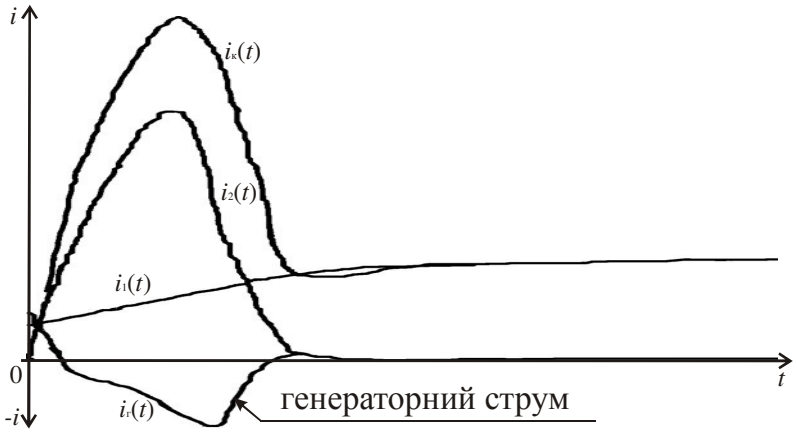


Рисунок 4.10 – Перехідні струми в режимі КЗ (якісний вигляд)

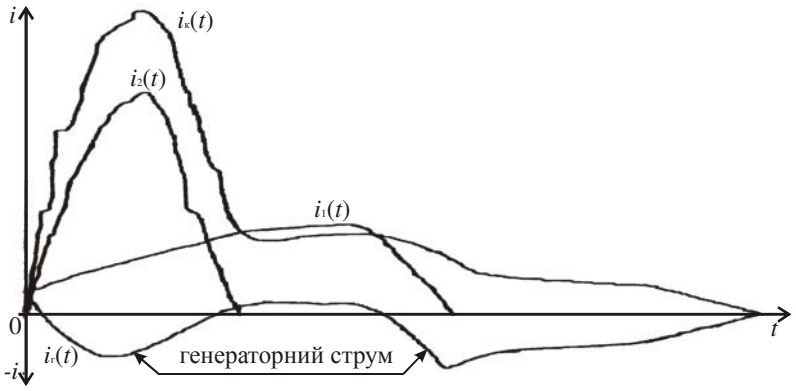


Рисунок 4.11 – Перехідні струми в режимі КЗ (якісний вигляд)

В результаті фідерний струм i_1 ТП1 різко, майже лінійно, зростає та швидко досягає своєї уставки, тим самим обумовлюючи вимикання ШВ1. Внаслідок цього виникає перехідний процес перерозподілу навантаження (струму) вимкненого фідера ТП1 на фідер ТП2, струм якого i_2, хоча і повільніше ніж i_1, але зростає з моменту КЗ. Якщо в результаті такого перерозподілу буде досягнуто значення струму уставки фідера ТП2, то відбудеться вимикання ШВ2. Практика показує, що, як правило, це виникає коли фідерна зона в розглядуваному режимі вимикається з двох боків. В результаті (за тими ж міркуваннями та причинами, що і раніше) ЕРС переходить в генераторний режим. Якщо струм КЗ, а значить і фідерний i_2, недостатній для вимикання ШВ2 та він не вимкнеться, тоді струм ЕРС знову стає двигунним, зростає до величини, яка визначається напругою на струмоприймачі.

4.3 Математична модель процесу короткого замикання в тяговій мережі

Подальше математичне моделювання режиму КЗ в ТМ виконано для таких умов:

- живлення фідерних зон двостороннє;
- працюючий на ділянці ЕРС –електровози типів : ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1, 2ЕЛ4;
- схеми з’єднання ТЕД: «С», «СП», «П»;
- послаблення збудження: ПЗ1-ПЗ4;

- відстань від ТП1 до точки КЗ незмінна, $l_{1к} = 0,5\ км$ (const), ЕРС переміщується в сторону ТП2, $l_{ек} = 0,5; 9,5; 18,5\ км$ (var);
- відстань від ТП2 до ЕРС незмінна, $l_{2к} = 1,0\ км$ (const), точку КЗ наближаємо до ЕРС, $l_{ек} = 18,5; 14; 9\ км$ (var);
- міжпідстанційна ділянка двоколійна, вузлова схема секціонування;
- міжпідстанційна ділянка двоколійна, паралельна схема секціонування.

4.3.1 Пусковий режим – схема послідовного з`єднання («С» - з'єднання) тягових двигунів

Як відомо, режим пуску електровоза постійного струму здійснюється при послідовному з'єднанні («С») ТЕД. Послідовне з'єднання ТЕД є частим режимом ведення поїздів електровозом, про що свідчать, наприклад, дані таблиці 4.1 для ділянок Придніпровської залізниці. Тому розрахуємо і проаналізуємо виникнення генераторних струмів якраз на цьому з'єднанні ТЕД електровоза ДЕ1.

Таблиця 4.1

Кількість і тривалість ходу електровозів на «С»-позиції

№	Ділянка	Тип і № електровоза,	Маса поїзда, т	Загальна тривалість поїздки, годин	З'єднання «С»	
					Кількість випадків	Тривалість кожного випадку, хв.
1	Дніпропетровськ-Чаплине	ВЛ8 № 665	5025	1,84	5	2; 0,5; 1,0; 5,22; 0,2
2	П'ятихатки-Дніпропетровськ	ВЛ8 № 278	5087	2,24	9	4; 2; 0,3; 2; 2,1; 5; 5,5; 4; 3
3	Дніпропетровськ-П'ятихатки	ВЛ8 № 278	4768	1,94	9	1; 1; 1,3; 0,75; 1; 0,67; 0,1; 0,1; 0,17

Спочатку розглянемо режим КЗ в точці ТМ на відстані $l_{1к} = 0,5\ км$ (тобто практично біля ТП1), а відстань від ЕРС до точки КЗ

$l_{ек} = 0{,}5;\ 9{,}5;\ 18{,}5\ км$ (рис. 4.12) при відстані між тяговими підстанціями ТП1 і ТП2 рівній $l = 20\ км$.

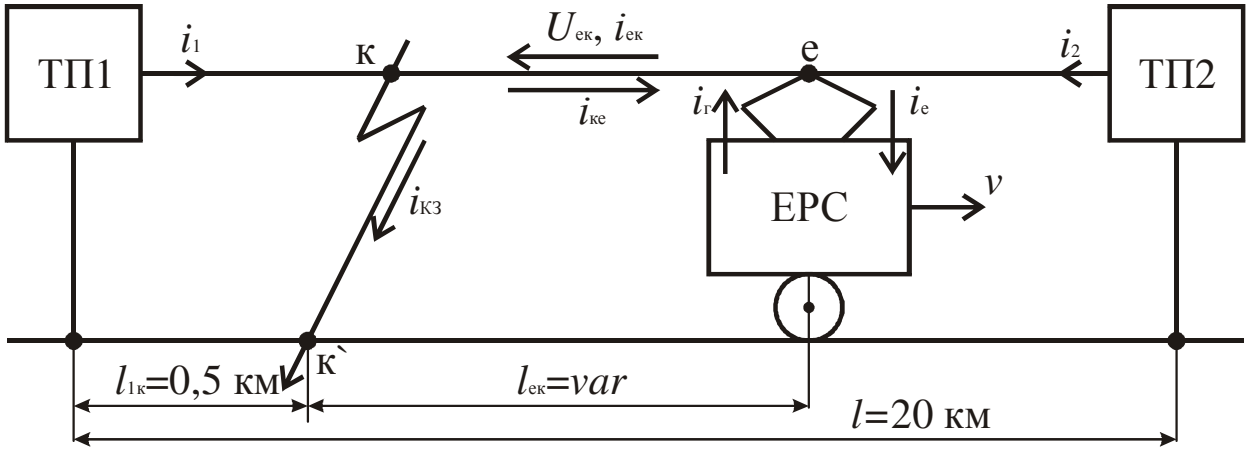


Рисунок 4.12 – Схема СЕТ у режимі з КЗ на фідерній зоні та з динамічним навантаженням (ЕРС що рухається)

Математична модель СЕТ з одним електровозом (типу ДЕ1) на фідерній зоні (рис. 4.12) являє собою систему рівнянь [246]:

$$\left(R_{т1} + R_{пс1} + R_{зр1} + R_{р1} + R_{о1}\right)\cdot i_1 + \left(L_{т1} + L_{зр1} + L_{к1} + L_{р1} + L_{о1}\right)\frac{di_1}{dt} + R_{ішl-1}\cdot i_{ішl-1} +$$

$$+L_{ішl-1}\frac{di_{ішl-1}}{dt} + R_{ішl-2}\cdot i_{ішl-2} + L_{ішl-2}\frac{di_{ішl-2}}{dt} = e_{пс1}(t); \qquad (4.7)$$

$$\left(R_{т2} + R_{пс2} + R_{зр2} + R_{р2} + R_{о2}\right)\cdot i_2 + \left(L_{т2} + L_{зр2} + L_{к2} + L_{р2} + L_{о2}\right)\frac{di_2}{dt} + R_{ішl-1}\cdot i_{ішl-1} +$$

$$+L_{ішl-1}\frac{di_{ішl-1}}{dt} + R_{ішl-2}\cdot i_{ішl-2} + L_{ішl-2}\frac{di_{ішl-2}}{dt} + \left(R_{кек} + R_{рек}\right)\cdot i_{ек} + L_{кек}\frac{di_{ек}}{dt} = e_{пс2}(t); \qquad (4.8)$$

$$\left(R_{кек} + R_{рек}\right)\cdot i_{ек} + L_{кек}\frac{di_{ек}}{dt} + 8\left(R_я + R_{дп} + R_{ко} + R_з\right)\cdot i_я -$$

$$-8L_я\frac{di_я}{dt} + 2p\sigma_з\omega_з\frac{d}{dt}\left(\Phi_1 + \ldots + \Phi_8\right) = C_w\omega\left(\Phi_1 + \ldots + \Phi_8\right) \qquad (4.9)$$

$$i_я - i_1 - i_2 = 0; \qquad (4.10)$$

$$\left.\begin{aligned}
&i_{я} - i_{\mu 1} + i_{вхр1} = 0;\\
&i_{я} - i_{\mu 2} + i_{вхр2} = 0;\\
&i_{я} - i_{\mu 3} + i_{вхр3} = 0;\\
&i_{я} - i_{\mu 4} + i_{вхр4} = 0;\\
&i_{я} - i_{\mu 5} + i_{вхр5} = 0;\\
&i_{я} - i_{\mu 6} + i_{вхр6} = 0;\\
&i_{я} - i_{\mu 7} + i_{вхр7} = 0;\\
&i_{я} - i_{\mu 8} + i_{вхр8} = 0;
\end{aligned}\right\} \qquad (4.11)$$

$$\left.\begin{aligned}
&i_{\mu 1} = f\left(\Phi_1(t)\right);\\
&i_{\mu 2} = f\left(\Phi_2(t)\right);\\
&i_{\mu 3} = f\left(\Phi_3(t)\right);\\
&i_{\mu 4} = f\left(\Phi_4(t)\right);\\
&i_{\mu 5} = f\left(\Phi_5(t)\right);\\
&i_{\mu 6} = f\left(\Phi_6(t)\right);\\
&i_{\mu 7} = f\left(\Phi_7(t)\right);\\
&i_{\mu 8} = f\left(\Phi_8(t)\right);
\end{aligned}\right\} \qquad (4.12)$$

$$\left.\begin{aligned}
&R_{вхр}^{зг} \cdot i_{вхр1} + \sigma_з \omega_з \frac{d\Phi_1}{dt} = 0;\\
&R_{вхр}^{зг} \cdot i_{вхр2} + \sigma_з \omega_з \frac{d\Phi_2}{dt} = 0;\\
&R_{вхр}^{зг} \cdot i_{вхр3} + \sigma_з \omega_з \frac{d\Phi_3}{dt} = 0;\\
&R_{вхр}^{зг} \cdot i_{вхр4} + \sigma_з \omega_з \frac{d\Phi_4}{dt} = 0;\\
&R_{вхр}^{зг} \cdot i_{вхр5} + \sigma_з \omega_з \frac{d\Phi_5}{dt} = 0;\\
&R_{вхр}^{зг} \cdot i_{вхр6} + \sigma_з \omega_з \frac{d\Phi_6}{dt} = 0;\\
&R_{вхр}^{зг} \cdot i_{вхр7} + \sigma_з \omega_з \frac{d\Phi_7}{dt} = 0;\\
&R_{вхр}^{зг} \cdot i_{вхр8} + \sigma_з \omega_з \frac{d\Phi_8}{dt} = 0,
\end{aligned}\right\} \qquad (4.13)$$

де $\sigma_з$ – коефіцієнт розсіювання ОЗ ТЕД; $i_{вхр}$ – вихровий струм в остові ТЕД; i_μ – струм намагнічення станини відповідного ТЕД, який є нелінійною функцією основного магнітного потоку $\Phi(t)$.

$$i_\mu(\Phi) = a' + b' \cdot \Phi + c' \cdot \Phi^2 + d' \cdot \Phi^3 + e' \cdot \Phi^4 + f' \cdot \Phi^5 + k' \cdot \Phi^6.$$

Коефіцієнти $a', b', c', d', e', f', k'$ полінома представлено в таблиці Д.2 додатку Д. Розглядувану систему (4.7)-(4.13) слід доповнити рівняннями (3.50)-(3.53) для ШВ. В системі диференціальних рівнянь електромагнітного стану СЕТ рівняння (4.11)-(4.13) описують внутрішні електромагнітні процеси, які відбуваються в тягових машинах ЕРС. Оскільки в роботі розглядаються тільки вантажні восьмивісні електровози серій (ДЕ1, 2ЕЛ4, ВЛ10, ВЛ8) постійного струму, то вважатимемо ці рівняння подібні для всіх серій з тією лише різницею, що підставляються відповідні їх параметри (таблиці Д.1-Д.4 додатку Д). Тому тут і в подальших математичних моделях типу (4.11)-(4.13) будемо називати «рівняннями ЕРС».

Результати чисельних розрахунків з врахуванням зазначених вище (в підрозділах 3.3.3, і 4.1) припущень представлені на рис. 4.13-4.24 та 4.26-4.31, із яких випливає таке.

У розглядуваному режимі КЗ (біля ТП1 в точках к-к` $l_{1к} = 0{,}5\,км$, рис. 4.12) складова струму ($i_{ке} = 0$) і тому живлення ЕРС частково переходить на фідер підстанції ТП2. Одночасно, струм КЗ, тобто в «закоротці» $i_{кз}$ і фідерний струм i_1 від ТП1 (рис. 4.12) різко зростають (рис. 4.13 і 4.14). Струм $i_1(t)$ досягає своєї ставки ($I_{у1} = 3000\,A$) і швидкодіючий вимикач ШВ1 на тяговій підстанції ТП1 через 0,022 с після початку КЗ починає вимикатись і через 0,033 с повністю вимикається (рис. 4.13), при цьому, зазначене вимикання ШВ1 ТП1 відбувається при розташуванні ЕРС у будь-якій точці фідерної зони, тобто, при будь-якій відстані між ЕРС і точкою КЗ.

Характер зміни струму КЗ, тобто $i_{кз}$, в залежності від відстані $l_{ек}$ (рис. 4.12 і 4.14) однаковий: спочатку, в період вимикання ШВ1, він різко зростає

до 6200…6600 А, потім також різко зменшується до 2000…2500 А і встановлюється в новому усталеному значені 2500…3000 А. Тривалість такого перехідного процесу складає 0,3…0,35 с (рис. 4.14).

Одночасно, фідерний струм i_2 (від ТП2, рис. 4.12 [246]) спочатку лінійно зі швидкістю $(3…3{,}5)\cdot 10^4$ А/с, а потім експоненціально зростає до 2330 А при $l_{ек} = 0{,}5\,км$, а при русі поїзда до 2400 А – $l_{ек} = 9{,}5\,км$ і 2600А – $l_{ек} = 18{,}5\,км$ (рис. 4.15). Приріст максимального значення цього струму склав відповідно 2270, 2176 і 2255 А, що може бути використано при розрахунках струму уставки фідера і для правильного вибору параметрів датчика релейного захисту. І, як випливає із рис. 4.15, при розглянутих відстанях $l_{ек}$ (рис. 4.12) фідерний струм i_2 не досягає уставки 3000 А і тому ШВ2 не вимикається і ТП2 продовжує живити ЕРС.

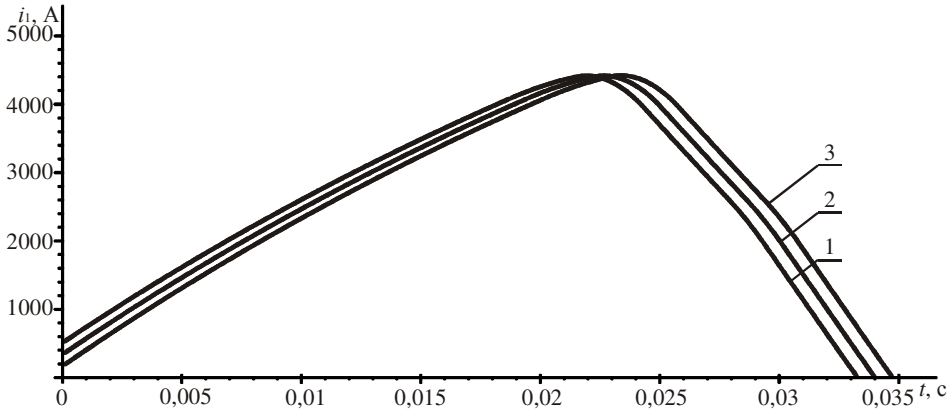


Рисунок 4.13 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1 в режимі КЗ в тяговій мережі при різній відстані $l_{ек}$ (км): 1 – 0,5; 2 – 9,5; 3 – 18,5

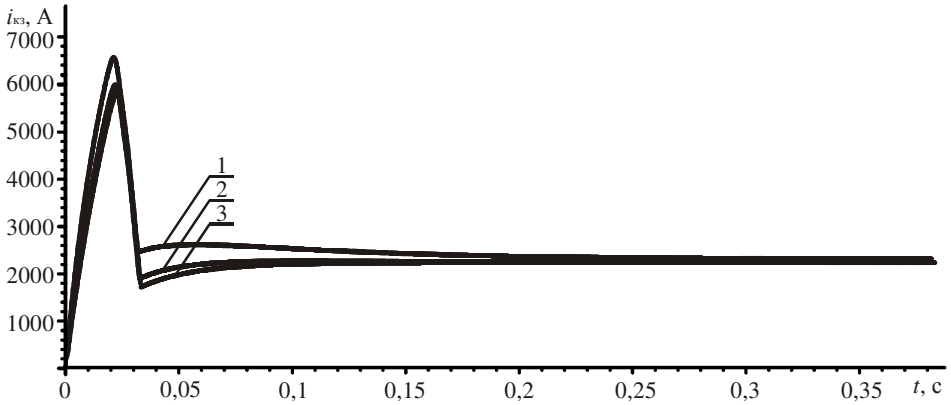


Рисунок 4.14 – Часові залежності струму КЗ для умов рис. 4.13

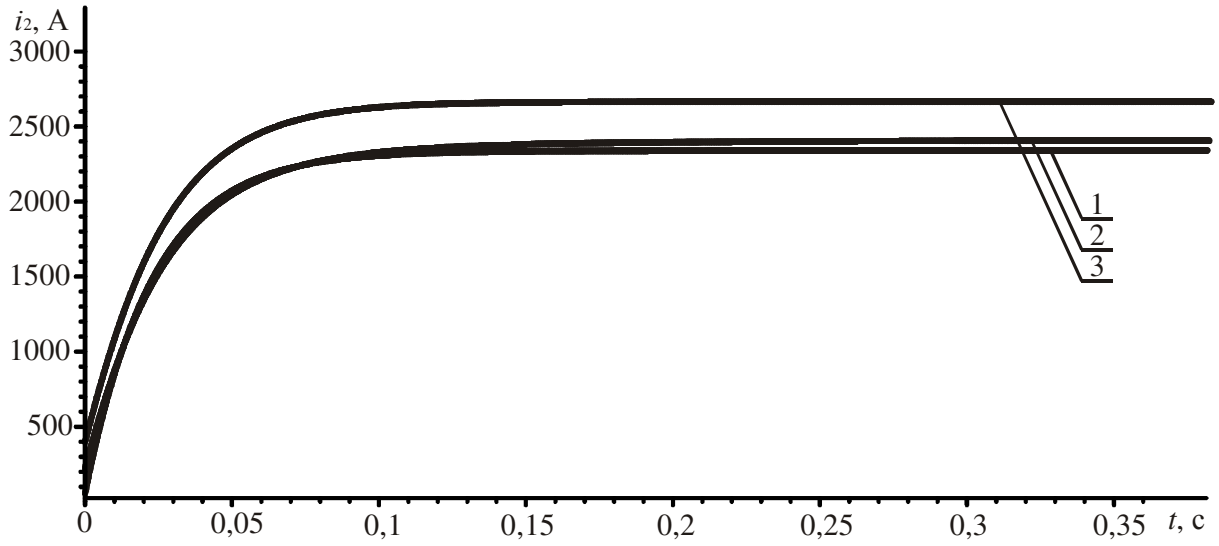


Рисунок 4.15 – Часові залежності фідерного струму ТП2 для умов рис. 4.13

Також одночасно з вимиканням ШВ1 і зростанням i_2 (рис. 4.15) збільшується струм $i_{ек}$ між ЕРС і точкою КЗ (рис. 4.16), а, отже, і спад напруги $U_{ек}$ на цій же ділянці. Однак напруга на струмоприймачі $u_e(t)$ зменшується спочатку кидком (в момент КЗ), а потім повільно (рис. 4.17), досягаючи свого усталено значення, обумовленого напругою на працюючій ТП2 і рівного спаду $U_{ек}$: ~100 В при $l_{ек} = 0{,}5\,км$; 1200 В – 9,5 км і 2400 В – 18,5 км. Різке зменшення напруги на струмоприймачі призводить також до різкого початкового (в термін вимикання ШВ1) зменшення тягового струму електровоза i_e (рис. 4.18), (на рис. 4.12 цей струм позначено як $i_д$). Зменшується також основний магнітний потік $\Phi(t)$ тягових двигунів ЕРС (рис. 4.19), а також їх проти-е.р.с., яка залежить, як відомо, від $\Phi(t)$. Однак $\Phi(t)$ знижується значно повільніше, ніж струм електровоза i_e, що пов'язано з демпферуючою дією магнітного потоку, створеного вихровими струмами в магнітопроводі ТЕД (рис. 4.20), достатньо великих максимальних значень (230…1080 А) в період вимикання ШВ1 ТП1. Зрозуміло і очевидно із рис. 4.19, що і проти-е.р.с. $e(t)$ ТЕД електровоза знижується повільніше, ніж напруга на струмоприймачі $u_e(t)$ (рис. 4.17), що дорівнює спаду $U_{ек}$ (рис. 4.12). Тому з часом, після вимикання ШВ1 (і при $i_e = 0$), $u_e(t)$ вирівнюється з $e(t)$, а потім стає меншою,

ніж $e(t)$. В результаті ТЕД переходять в генераторний режим (рис. 4.18), максимальне значення струму якого $i_г$ при $l_{ек} = 0,5\,км$ досягає 760 А. Отже, імовірність генераторного режиму визначається співвідношенням спад у напруги в ТМ $U_{ек}$ на ділянці *ек*, яке дорівнює напрузі на струмоприймачі $U_е$, на ділянці ЕРС і точкою КЗ. Тобто, при великій відстані $l_{ек}$ генераторний струм може не виникнути, як це спостерігається на рис. 4.18, кр. 3, що побудована для $l_{ек} = 18,5\,км$, а найбільш імовірно виникнення генераторного режиму у ЕРС, що знаходиться найближче до місця КЗ.

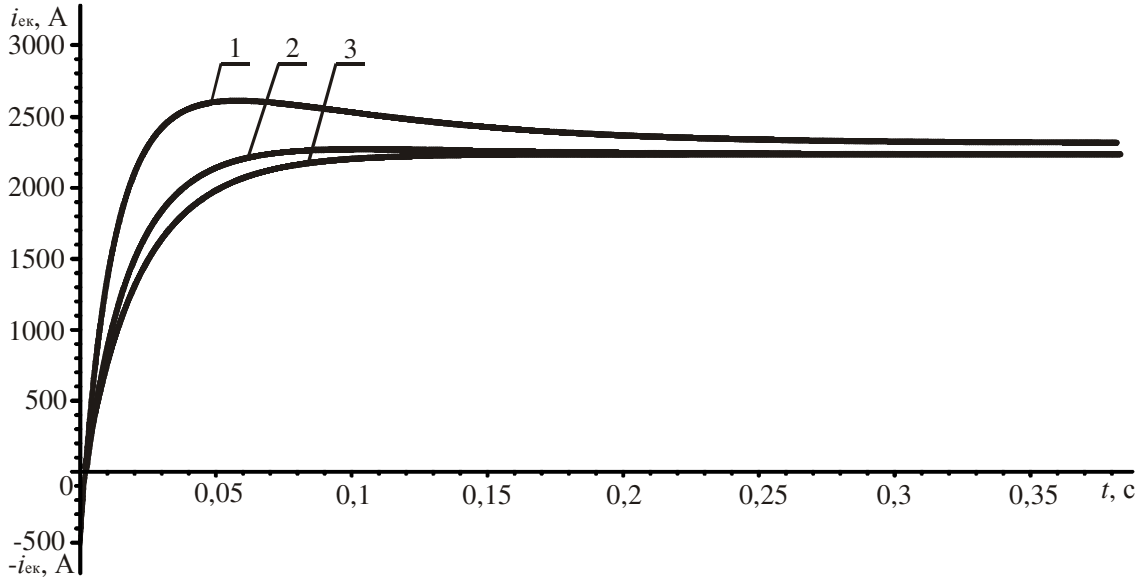


Рисунок 4.16 – Часові залежності струму ТМ між ЕРС і точкою КЗ для умов рис. 4.13

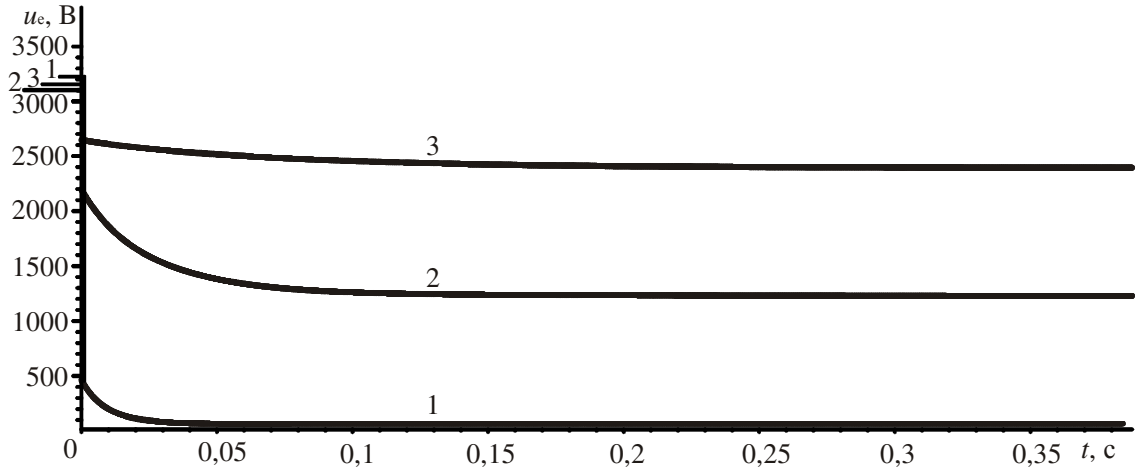


Рисунок 4.17 – Часові залежності напруги на струмоприймачі електровозу для умов рис. 4.13

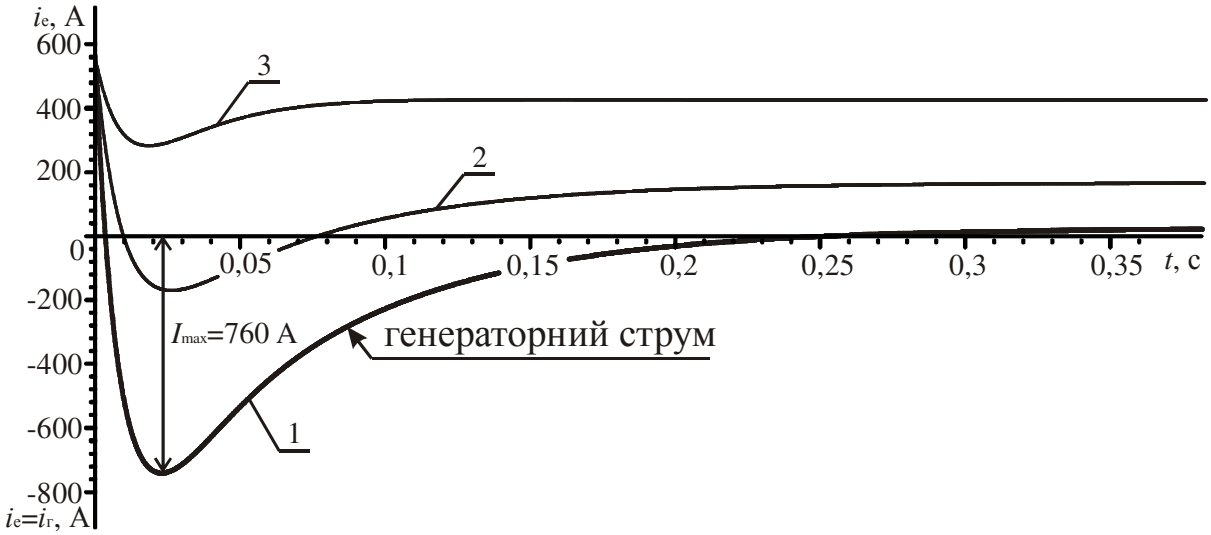


Рисунок 4.18 – Часові залежності струму електровозу для умов рис. 4.13

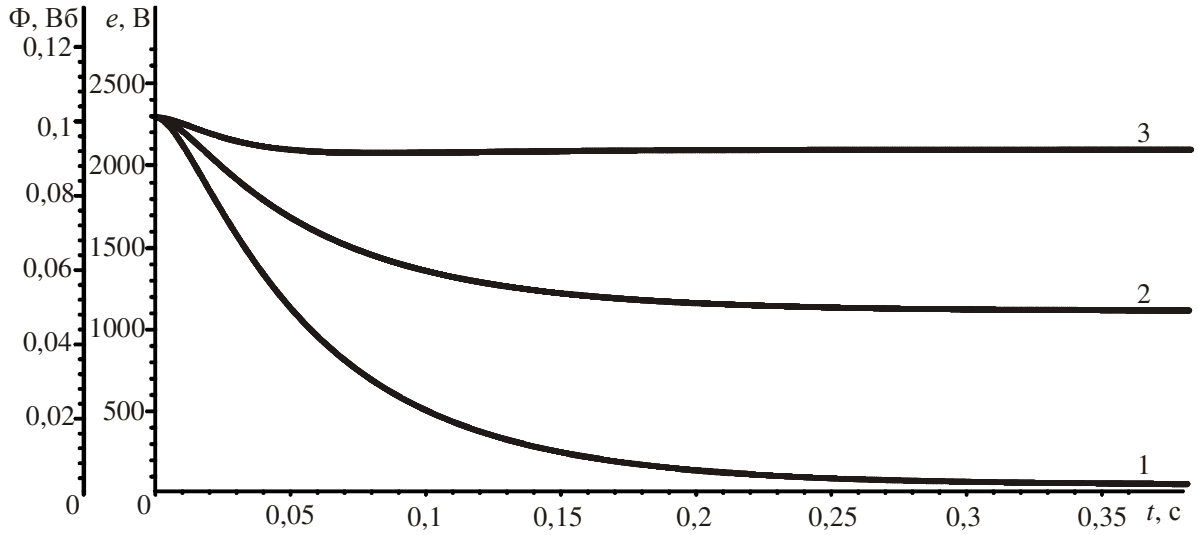


Рисунок 4.19 – Часові залежності магнітного потоку, а також проти-е.р.с. всіх ТЕД електровозу для умов рис. 4.13

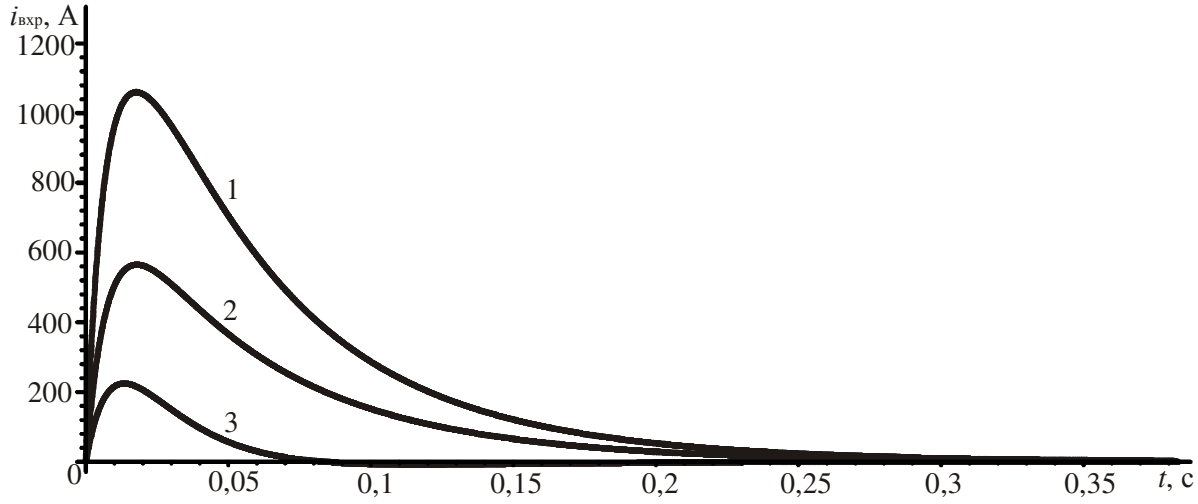


Рисунок 4.20 – Часові залежності вихрових струмів ТЕД електровозу для умов рис. 4.13

Генераторний струм у подальшому, з часом перехідного процесу, після характерного сплеску (кидка) починає повільне експоненціальне загасання до певного усталеного режиму (рис. 4.18), що обумовлено таким же характером зменшенням $\Phi(t)$, а, отже і проти-е.р.с. (рис. 4.19). Тривалість сплеску генераторного струму співрозмірна з терміном часу вимикання струму i_1 швидкодіючим вимикачем ТП1 і складає 0,035 с (рис. 4.18). В той же час ЕРС переходить в генераторний режим через 5…20 мс після початку КЗ, а весь перехідний процес зміни струму $i_е(t)$ триває 0,075…0,25 с. При нормативному терміні часу спрацьовування релейного захисту СТЕП не більше 0,08 с [33].

Характер зміни розглянутих вище (у режимі повного поля ПП) перехідних величин у режимах послаблення збудження ПЗ1-ПЗ4 такий же, як і у режимі повного збудження, але значення цих величин дещо інші. У режимі ПЗ на будь-якій ступені для схеми рис. 4.12 і відстанях $l_{1к} = 5\ км, l_{ек} = 5\ км$ на початку терміну зміни (0,12…0,15 с) спостерігається менша швидкість загасання $\Phi(t)$ (рис. 4.21), а, отже, і проти-е.р.с. Це пояснюється тим, що струм у контурі «обмотка збудження – шунтувальна вітка (З-Ш)», підтримуючи $\Phi(t)$, в основному зменшує ступінь його загасання за рахунок «розряду» індуктивного шунта через обмотку збудження. Демпферуюча дія вихрових струмів на основний потік невелика, оскільки зменшення власне Φ_{max} і $\frac{d\Phi}{dt}$ обумовлює і зменшення вихрових струмів на ПЗ у порівнянні з режимом ПП (рис. 4.22). В результаті зазначеного в режимах ПЗ створюється більшої тривалості і більша різниця між проти-е.р.с. ТЕД і напругою на струмоприймачі, що й обумовлює більш тривалий генераторний струм $i_г(t)$ з більшим у 1,4…2,2 рази максимальним значенням (до 880 А на ПЗ4 проти 400 А на ПП) (рис. 4.23).

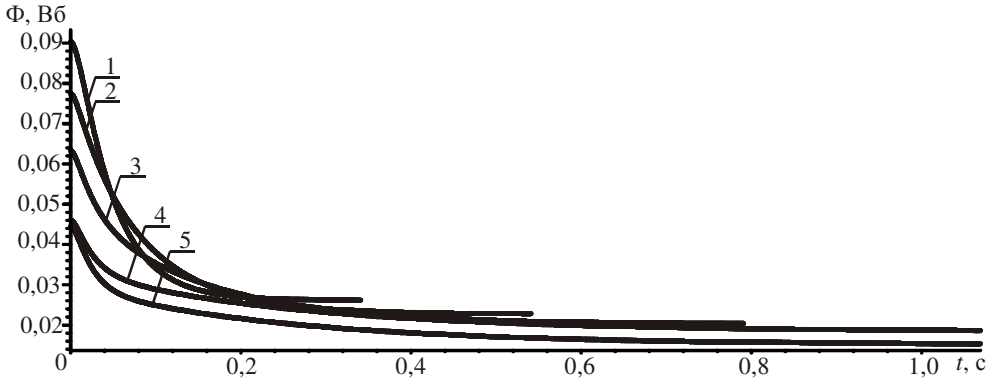


Рисунок 4.21 – Часові залежності магнітного потоку в режимі КЗ в тяговій мережі при різному збуджені ТЕД: 1 – повне поле (ПП); 2 – ПЗ1; 3 – ПЗ2; 4 – ПЗ3; 5 – ПЗ4

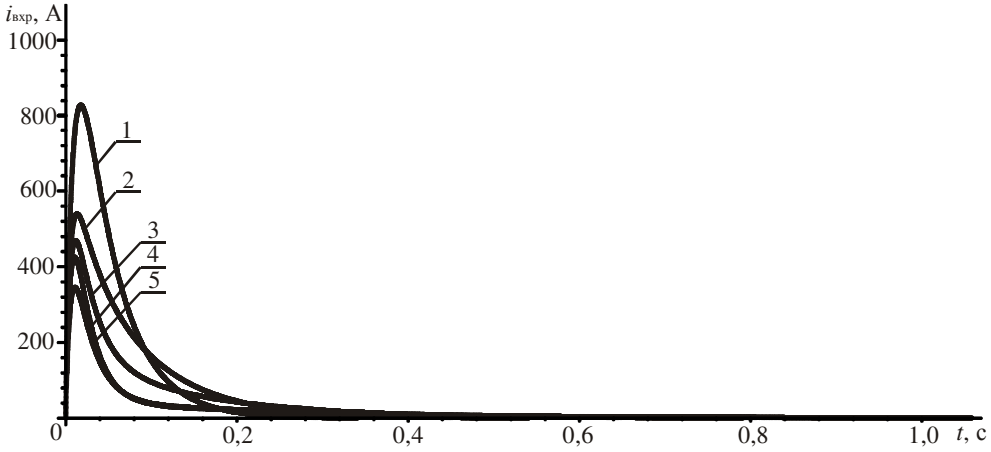


Рисунок 4.22 – Часові залежності зміни вихрових струмів для умов рис. 4.21

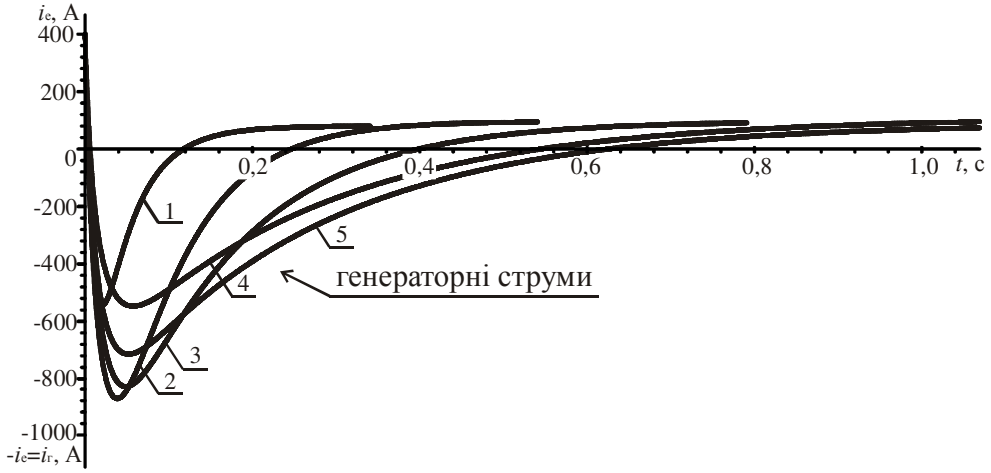


Рисунок 4.23 – Часові залежності зміни струму електровозу для умов рис. 4.21

Наші попередні розрахунки, а також досліди в [15] показали, що одним із цікавих є режим КЗ в різних точках ТМ при умові розташування ЕРС біля ТП (наприклад ТП2, рис. 4.24).

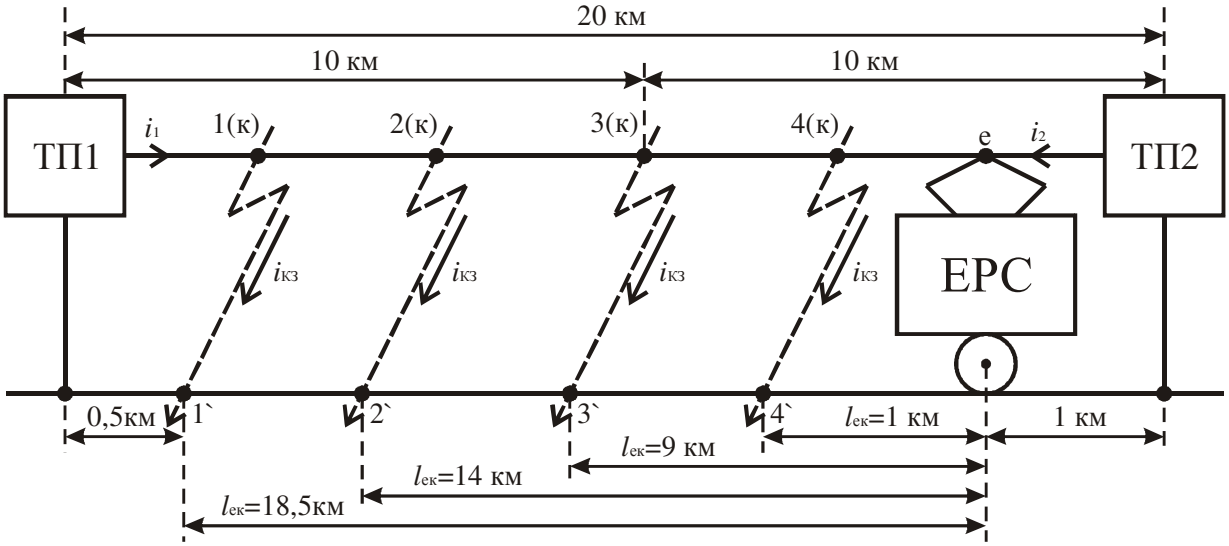


Рисунок 4.24 – Схема КЗ при різному положенні точки КЗ на фідерній зоні

В дослідах КЗ №1 і №4, тобто в точках відповідно 1-1’ і 4-4’ (рис. 4.24), характер зміни і значення перехідних величин такі ж самі, як і в дослідах за схемою рис. 4.12 при $l_{ек} = 0,5$ і $18,5\ км$.

При КЗ в точках 2-2’ і 3-3’ (рис. 4.24) фідерні струми i_1 та i_2 обох ТП, а також струм $i_{кз}$ в «закоротках» різко зростають. Перші досягають струму уставки 3000 А, в результаті ШВ обох ТП вимикаються (рис. 4.25, 4.26, і 4.27). При цьому, що закономірно, при КЗ всередині міжпідстанційної зони (в т. 3-3’) характери зростання і спадання $i_1(t)$ та $i_2(t)$, а також терміни час повного вимикання (0,058 с) однакові (рис. 4.26), а при КЗ в точках 2-2’ – спочатку спрацьовує ШВ ТП1 (через 0,042 с після початку КЗ), а потім – ШВ ТП2 (рис. 4.25). Вимикання обох ШВ обумовлює повне зняття живлення з цієї фідерної зони, а, значить, і ЕРС. Напруга на струмоприймачі різко зменшується до нуля (з короткочасним кидком у від’ємне значення) (рис. 4.28), а $\Phi(t)$ (рис. 4.29), отже і проти-е.р.с. ТЕД, зменшується повільно, обумовлюючи тим самим перехід ТЕД і всього електровозу в генераторний режим (рис. 4.30). Струм цього режиму, досягнувши максимального значення 1000 А, повільно зменшується до нуля за термін часу 0,2..0,3 с, що дорівнює

зменшенню $\Phi(t)$ до нуля (рис. 4.29), тобто, терміну часу розмагнічування магнітної системи усіх ТЕД.

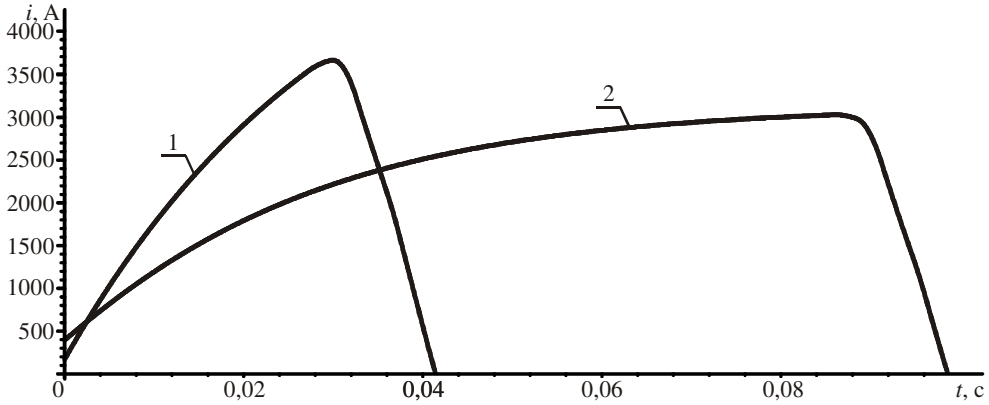


Рисунок 4.25 – Часові залежності зміни фідерних струмів ТП в режимі КЗ в тяговій мережі при довжині $l_{ек} = 14\ км$: 1 – $i_1(t)$; 2 – $i_2(t)$

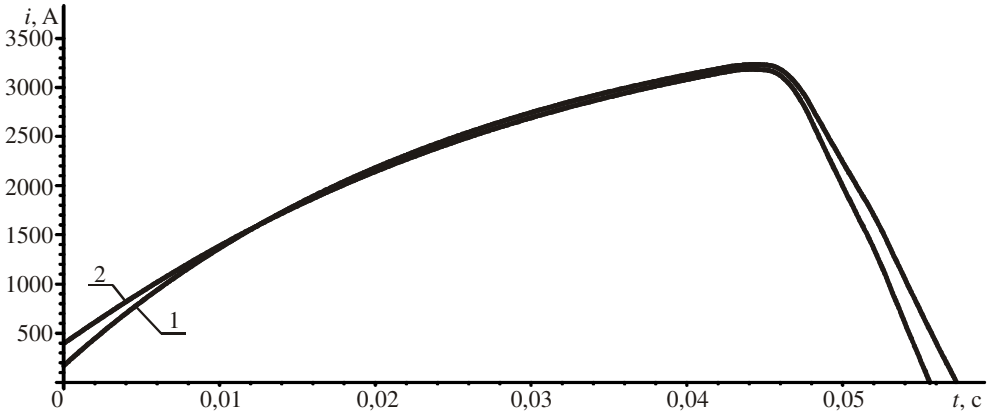


Рисунок 4.26 – Часові залежності зміни фідерних струмів ТП в режимі КЗ в тяговій мережі при довжині $l_{ек} = 9\ км$: 1 – $i_1(t)$; 2 – $i_2(t)$

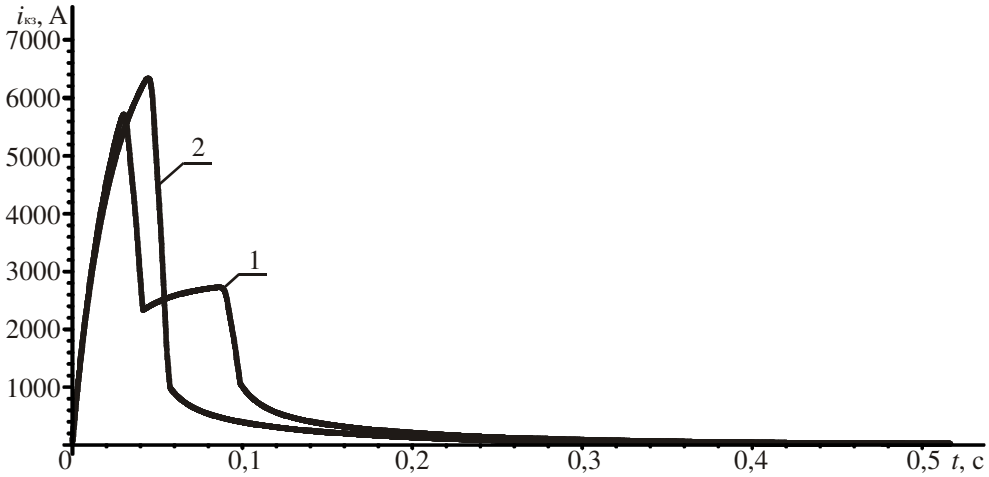


Рисунок 4.27 – Часові залежності зміни струму КЗ в тяговій мережі при різній довжині $l_{ек}$: 1 – 14 *км*; 2 – 9 *км*

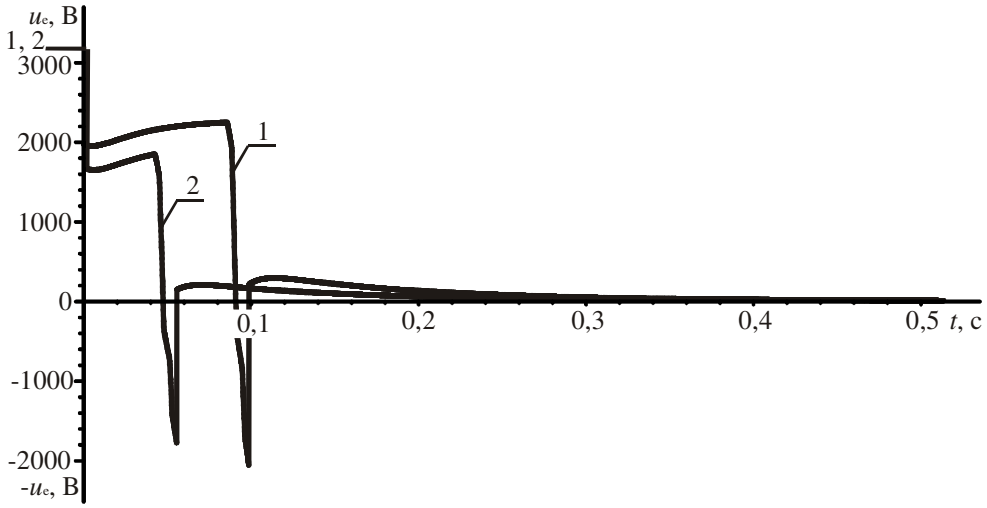


Рисунок 4.28 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі ЕРС в режимі КЗ в тяговій мережі при різній довжині $l_{ек}$: 1 – 14 *км* ; 2 – 9 *км*

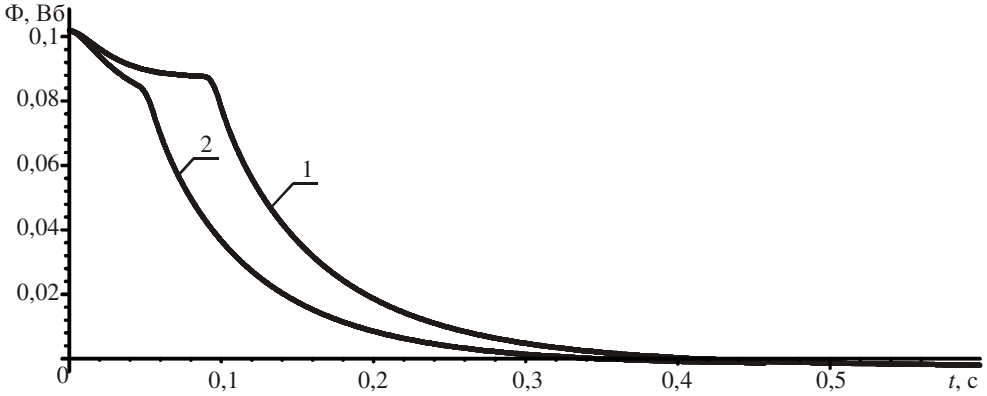


Рисунок 4.29 – Часові залежності зміни магнітного потоку ТЕД в режимі КЗ в тяговій мережі при різній довжині $l_{ек}$: 1 – 14 *км* ; 2 – 9 *км*

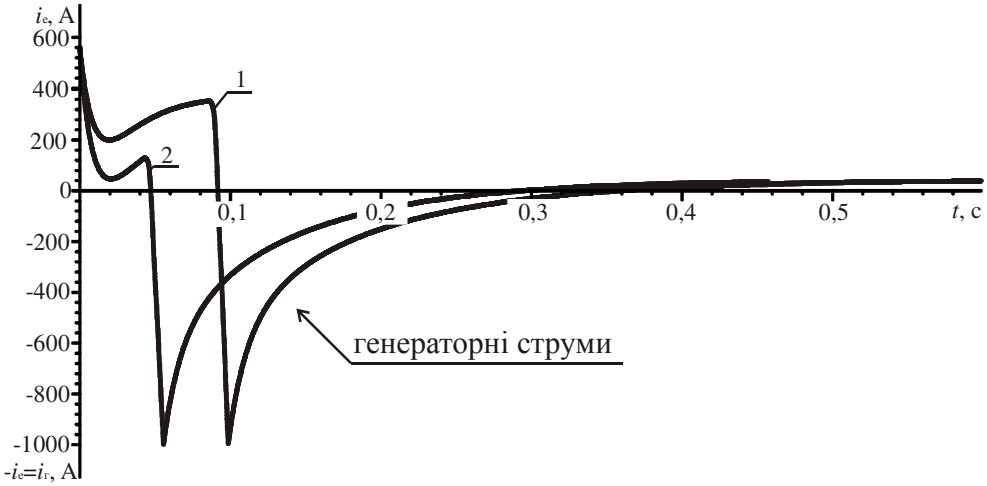


Рисунок 4.30 – Часові залежності зміни струму ЕРС, в режимі КЗ в ТМ при різній довжині $l_{ек}$: 1 – 14 *км* ; 2 – 9 *км*

4.3.2 Тяговий режим на серієс-паралельному з'єднанні тягових двигунів

Спочатку проаналізуємо режим КЗ за рис. 4.12, тобто у випадку, коли КЗ відбулося на відстані 0,5 км від ТП1, а відстань від точки КЗ до ЕРС змінювалась і складала 0,5, 9,5 та 18,5 км (у подальшому криві усіх рисунків позначені відповідно як 1, 2 та 3).

Математична модель цього режиму на «СП»-з'єднанні являє собою систему рівнянь:

$$\left(R_{\text{т1}}+R_{\text{пс1}}+R_{\text{зр1}}+R_{\text{р1}}+R_{\text{о1}}\right)\cdot i_1+\left(L_{\text{т1}}+L_{\text{зр1}}+L_{\text{к1}}+L_{\text{р1}}+L_{o1}\right)\frac{di_1}{dt}+R_{\text{іш1-1}}\cdot i_{\text{іш1-1}}+$$

$$+L_{\text{іш1-1}}\frac{di_{\text{іш1-1}}}{dt}+R_{\text{іш1-2}}\cdot i_{\text{іш1-2}}+L_{\text{іш1-2}}\frac{di_{\text{іш1-2}}}{dt}=e_{\text{пс1}}(t); \qquad (4.14)$$

$$\left(R_{\text{т2}}+R_{\text{пс2}}+R_{\text{зр2}}+R_{\text{р2}}+R_{\text{о2}}\right)\cdot i_2+\left(L_{\text{т2}}+L_{\text{зр2}}+L_{\text{к2}}+L_{\text{р2}}+L_{o2}\right)\frac{di_2}{dt}+R_{\text{іш2-1}}\cdot i_{\text{іш2-1}}+$$

$$+L_{\text{іш2-1}}\frac{di_{\text{іш2-1}}}{dt}+R_{\text{іш2-2}}\cdot i_{\text{іш2-2}}+L_{\text{іш2-2}}\frac{di_{\text{іш2-2}}}{dt}+\left(R_{\text{кек}}+R_{\text{рек}}\right)\cdot i_{\text{ек}}+L_{\text{кек}}\frac{di_{\text{ек}}}{dt}=e_{\text{пс2}}(t); \qquad (4.15)$$

$$\left(R_{\text{кек}}+R_{\text{рек}}\right)\cdot i_{\text{ек}}+L_{\text{кек}}\frac{di_{\text{ек}}}{dt}+4\left(R_{\text{я}}+R_{\text{дп}}+R_{\text{ко}}+R_{\text{з}}\right)\cdot i_{\text{я1}}-$$

$$-4L_{\text{я}}\frac{di_{\text{я1}}}{dt}+2p\sigma_{\text{з}}\omega_{\text{з}}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right)=C_{\text{w}}\omega\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right)\ ; \qquad (4.16)$$

$$\left(R_{\text{кек}}+R_{\text{рек}}\right)\cdot i_{\text{ек}}+L_{\text{кек}}\frac{di_{\text{ек}}}{dt}+4\left(R_{\text{я}}+R_{\text{дп}}+R_{\text{ко}}+R_{\text{з}}\right)\cdot i_{\text{я2}}-$$

$$-4L_{\text{я}}\frac{di_{\text{я2}}}{dt}+2p\sigma_{\text{з}}\omega_{\text{з}}\frac{d}{dt}\left(\Phi_5+\ldots+\Phi_8\right)=C_{\text{w}}\omega\left(\Phi_5+\ldots+\Phi_8\right); \qquad (4.17)$$

$$i_{\text{я1}}+i_{\text{я2}}-i_1-i_2=0. \qquad (4.18)$$

Розглядувану систему (4.14)-(4.18) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53) і рівняннями ЕРС (4.11)-(4.13).

Результати чисельних розрахунків представлено на рис. 4.31-4.41.

За виглядом і чисельним характером зміни досліджуваних перехідних величин такі ж самі, як в режимі «С»-з'єднання ТЕД. Різниця полягає лише в деяких значеннях, що обумовлено меншою результуючою індуктивністю силового кола ЕРС, а саме, швидкодіючий вимикач ТП1 вимикає фідерний струм i_1 для всіх відстаней $l_{\text{ек}}$. Цей струм за виглядом такий же як на рис.

4.13, але повний термін часу вимикання на 0,004 с менше, ніж на «С»-з'єднанні.

Струм в «закоротці» $i_{кз}$ за виглядом рис. 4.14, але його максимальне значення I_{max} досягає 9100 А проти 6600 А при «С» - з'єднанні.

Фідерний струм i_2 другої підстанції в усталеному режимі, як і на рис. 4.15, зростає за експоненціальним законом лише до 2850 А (при $l_{ек} = 18{,}5\ км$), тобто не досягає уставки 3000 А і тому ШВ ТП2 не спрацьовує, а продовжує живити і ЕРС, і точку КЗ.

Струм $i_{ек}$ на ділянці КМ між ЕРС і точкою КЗ (за характером рис. 4.16) при $l_{ек} = 0{,}5\ км$ (рис. 4.12) збільшився до 4700 А (замість 2700 А –при «С»-з'єднанні); однак усталене значення $i_{ек}$ для всіх $l_{ек}$ приблизно дорівнює 2000 А. Напруга на струмоприймачі $u_e(t)$ змінюється за законом і значенням згідно з рис. 4.17.

Із рис. 4.31 для генераторного струму $-i_e = i_г$ випливає, що менше значення індуктивності (при «СП» - з'єднанні у порівнянні з «С» - з'єднанням) обумовлює, по-перше, збільшення кидка (I_{max}) струму до 3500 А (при $l_{ек} = 0{,}5\ км$) і, по-друге, до зменшення майже у 2 рази тривалості перехідного процесу генераторного струму (до 0,12…0,13 с), а значить $I^2 \cdot t$ менші $I \cdot t$.

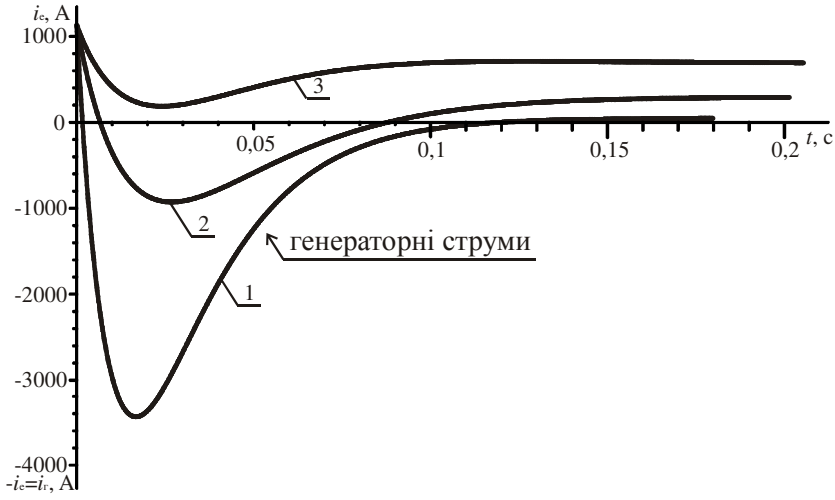


Рисунок 4.31 – Часові залежності зміни струму електровозу в режимі КЗ в тяговій мережі при різній довжині $l_{ек}$ (км): 1 – 0,5; 2 – 9,5; 3 – 18,5

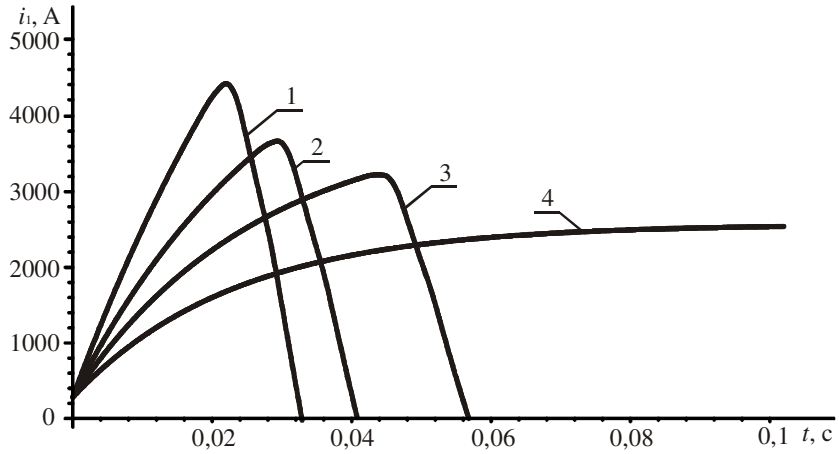


Рисунок 4.32 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1, в режимі КЗ в ТМ при різній довжині $l_{\text{ек}}$ (км): 1 – 18,5; 2 – 14; 3 – 9; 4 – 1

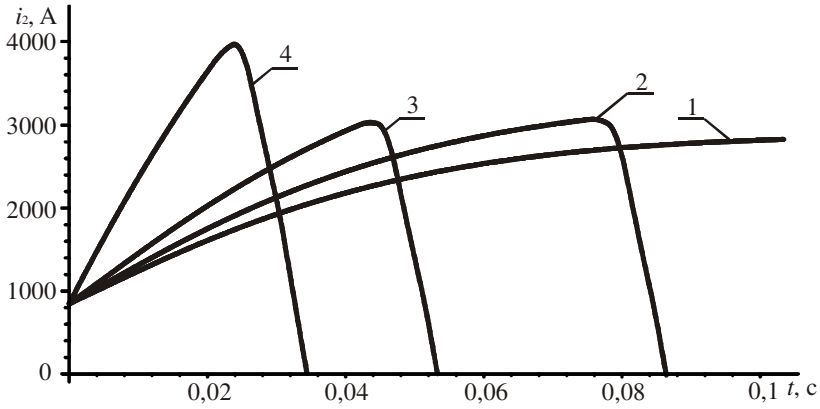


Рисунок 4.33 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП2 для умов рис. 4.32

Тепер розглянемо процеси в КМ згідно з рис. 4.24, коли ЕРС розташовано на відстані 1 км від ТП2, а точка КЗ в КМ змінюється і знаходиться на відстані 0,5; 5,0; 10 і 18 км від ТП1, а від ЕРС – відповідно на ($l_{\text{ек}}$) 18,5; 14; 9 і 1 км.

Із рис. 4.32 (кр. 1, 2, 3) випливає, що ШВ ТП1 спрацьовує при КЗ у «перших» трьох точках, тобто в точках 1-1’, 2-2’ і 3-3’ (рис. 4.24). При цьому терміни часу повного вимикання ШВ для зазначених відстаней відповідно складають 0,033; 0,042 і 0,057 с. Якщо КЗ відбувається у точці 4-4’, ШВ ТП1 не спрацьовує, оскільки, внаслідок спаду напруги на ділянці КМ довжиною 18 км, напруги U_1 на виході ТП1 недостатньо, щоб фідерний струм i_1 досяг уставки 3000 А на вимикання ШВ ТП1; він збільшується лише до 2500 А (рис. 4.32, кр. 4).

ШВ ТП2 навпаки (рис. 4.33), що закономірно, вимикається при КЗ в «останніх» трьох точках КМ, а саме – 4-4’, 3-3’ і 2-2’, а в точці 1-1’ він не спрацьовує (рис. 4.33, кр. 1). Виходить, що точка 1-1’ відносно вимикання ШВ ТП2 така ж сама (симетрична), як і точка 4-4’ відносно ШВ ТП1. Однак, внаслідок того, що точка 4-4’ знаходиться значно ближче (відстань 1 км) до ЕРС, ніж 1-1’ (18 км), характер спаду напруги на струмоприймачі $u_{\text{е}}(t)$, а, отже, імовірність виникнення генераторного режиму, при КЗ в точках 1-1’ і 4-4’ різні. У першому режимі (КЗ в 1-1’) напруга зменшується лише до 2150 В (рис. 4.34, а) і, як результат, генераторний струм не виникає (рис. 4.34, б). У другому режимі (КЗ в 4-4’) напруга $u_{\text{е}}(t)$ за термін часу 0,12 с зменшується до нуля (рис. 4.35, а) і тому генераторний струм електровоза, досягаючи в максимумі 2800 А (рис. 4.35, б).

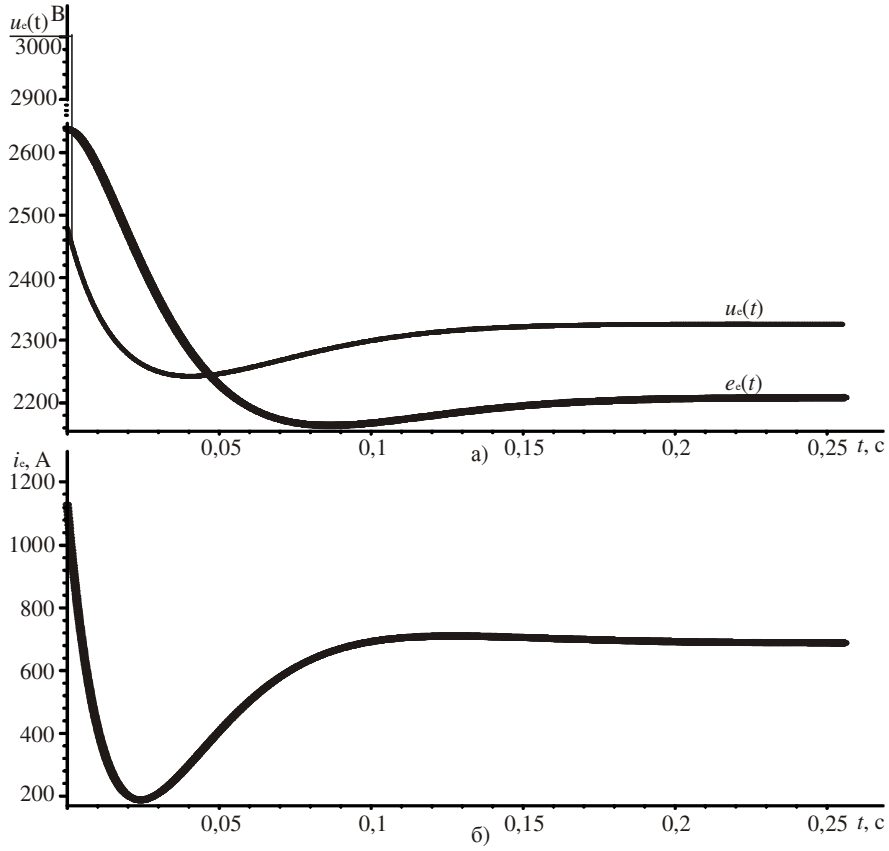


Рисунок 4.34 – Часові залежності зміни напруги, проти-е.р.с (а), струму електровоза (б) в режимі КЗ в тяговій мережі при довжині $l_{\text{ек}} = 18{,}5\ км$

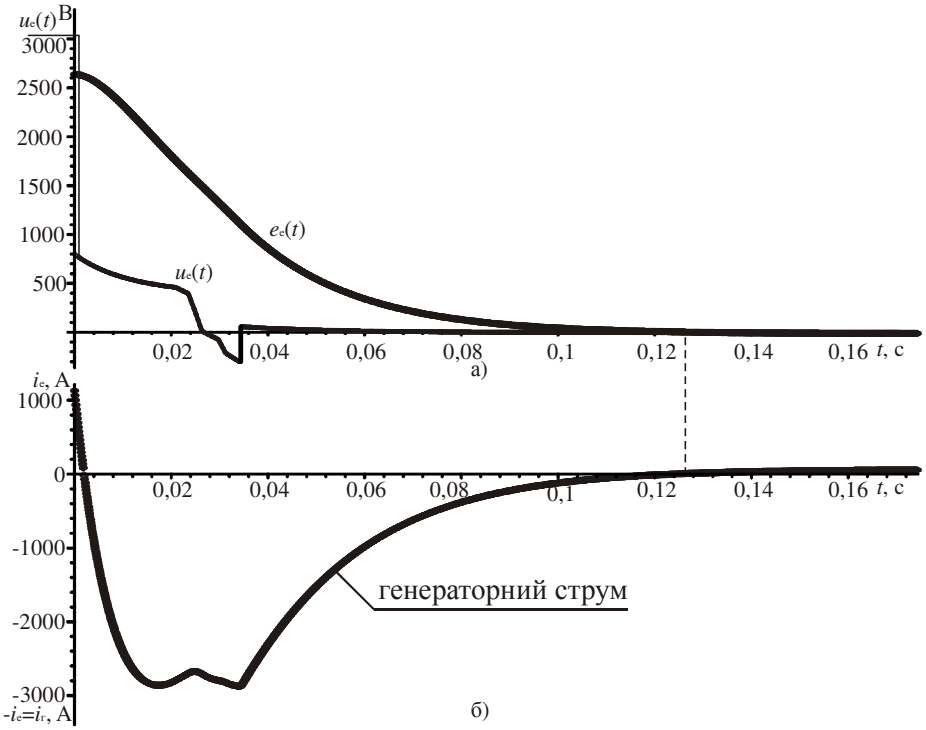


Рисунок 4.35 – Часові залежності зміни напруги, проти-е.р.с (а), струму електровоза (б) в режимі КЗ в ТМ при довжині $l_{ек} = 1{,}0\ км$

Дещо інакше протікають процеси при КЗ в середніх точках (2-2’ і 3-3’, рис. 4.14) міжпідстанційної зони, бо, як зазначалось і випливає із рис. 4.32 і 4.33, у цьому випадку вимикаються ШВ обох ТП.

При КЗ в точці 2-2’ спочатку спрацьовує ШВ ТП1 (рис. 4.32, кр. 2) і живлення ЕРС повністю переходить на ТП2, що викликає додатковий, у порівнянні з початковим, спад напруги в ТМ між точкою КЗ і ЕРС; напруга на струмоприймачі спадає повільно (рис. 4.36). Крім цього, процес вимикання фідерного струму $i_1(t)$ обумовлює індуктування в ТЕД значної е.р.с. самоіндукції ($e(t) = L_д \dfrac{di_д}{dt}$), яка за напрямком співпадає з генераторною е.р.с. Поєднання цих факторів створює умови переходу ТЕД в генераторний режим, струм якого зростає поки що на невелике значення 100 А (рис. 4.37). Далі, по мірі загасання $\Phi(t)$ (рис. 4.38), генераторна е.р.с. зменшується і ЕРС переходить у тяговий режим (рис. 4.38), струм якого зростає до 500 А. Однак, через 0,044 с фідерний струм i_2 ТП2 досягає уставки 3000 А і ШВ ТП2 вими-

кається (рис. 4.33, кр. 2). Напруга на струмоприймачі $u_{\text{е}}(t)$ різко зменшується до нуля (рис. 4.33, кр. 1) і електровоз переходить в режим повторної генерації (рис. 4.37). При цьому генераторний струм після кидка до 1900 А (тривалістю 0,22 с, що дорівнює часу вимикання ШВ ТП2) експоненціально зменшується по мірі загасання $\Phi(t)$ і $e_{г}(t)$ (рис. 4.38), обумовленого розмагнічуванням тим же генераторним струмом магнітної системи ТЕД. Після зменшення $u_{\text{е}}(t)$ до нуля і зворотного кидка ця напруга деякий час (0,15…0,25 с) підтримується за рахунок експоненціально загасаючої генераторної е.р.с. (рис. 4.36).

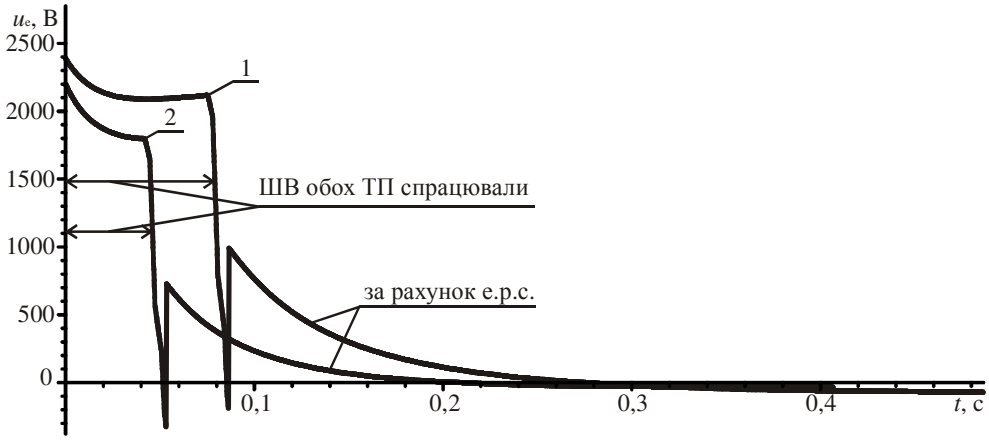


Рисунок 4.36 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі ЕРС в режимі КЗ в тяговій мережі при різній довжині $l_{\text{ек}}$ (км): 1–14,0 ; 2–9,0

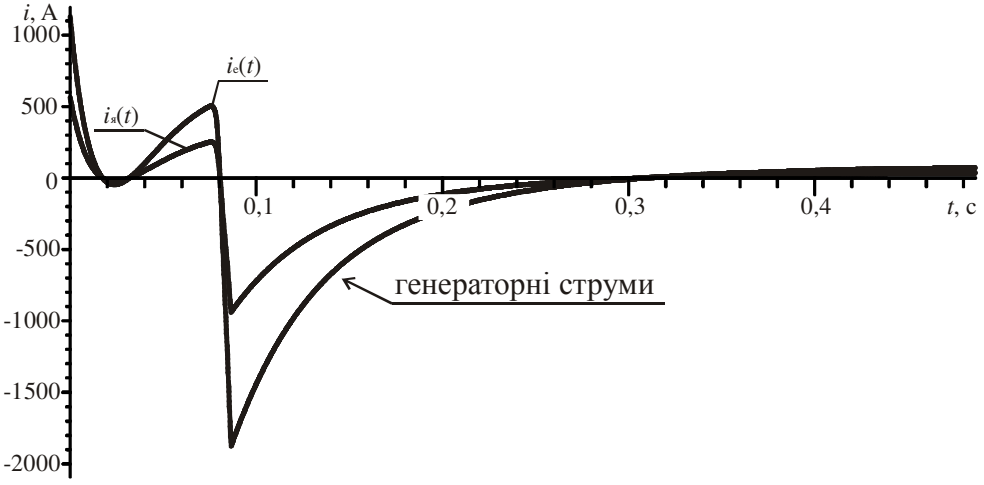


Рисунок 4.37 – Часові залежності зміни струму електровозу і якоря ЕРС в режимі КЗ в тяговій мережі при довжині $l_{\text{ек}} = 14,0\ км$

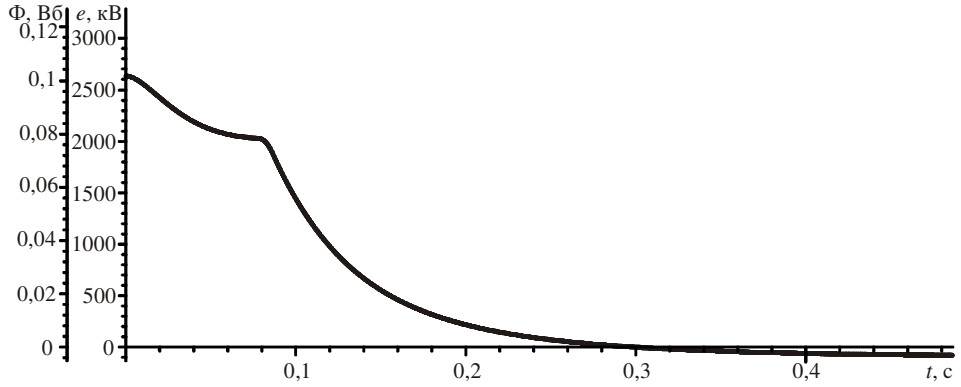


Рисунок 4.38 – Часові залежності зміни основного МП і проти-е.р.с. електровоза в режимі КЗ в тяговій мережі при довжині $l_{\text{ек}} = 14{,}0\ км$

При КЗ в точці 3-3’ (рис. 4.14), тобто в середині міжпідстанційної зони, ШВ обох ТП через 0,0535 с після початку КЗ вимикаються одночасно, що закономірно (рис. 4.32 і 4.33, кр. 3). Напруга на струмоприймачі $u_{\text{е}}(t)$ змінюється аналогічно попередньому режиму (рис. 4.36, кр. 2) і тому електровоз таким же чином переходить у єдиний, без повторення, генераторний режим (рис. 4.39, кр. 2) з максимальним значенням сплеску струму 2250 А і його тривалістю 0,2…0,22 с. У подальшому, з загасанням $\Phi(t)$ і $e_{\text{г}}(t)$, струм генерації спадає до нуля.

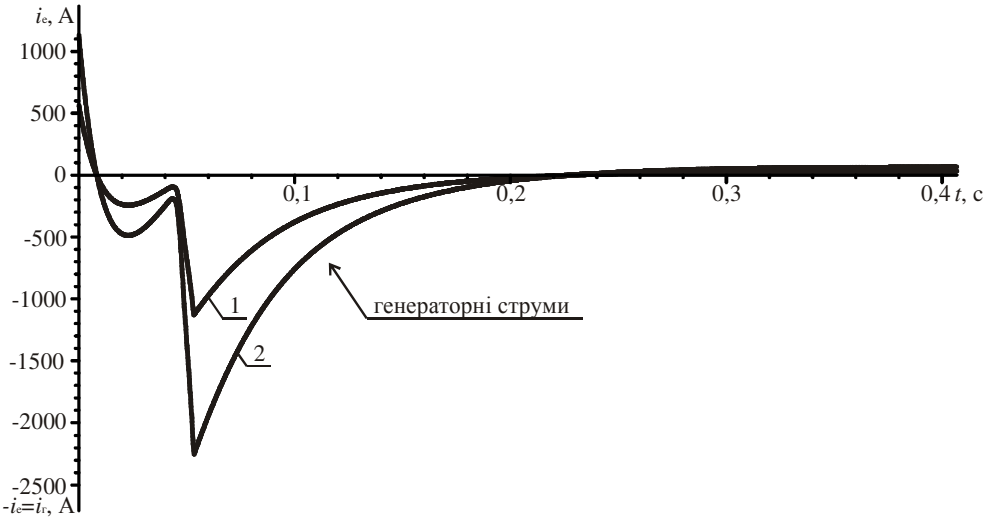


Рисунок 4.39 – Часові залежності зміни струму ЕРС для умов рис. 4.36

В обох останніх режимах КЗ (в точках 2-2’ і 3-3’) струм КЗ $i_{\text{кз}}$ (в «закоротці») досягає значної величини, 6000…6400 А (рис. 4.40).

Режим ПЗ було досліджено за схемою рис. 4.14, коли КЗ відбулося у точці за 5 км від ТП1, а ЕРС знаходився теж на відстані 5 км від точки КЗ.

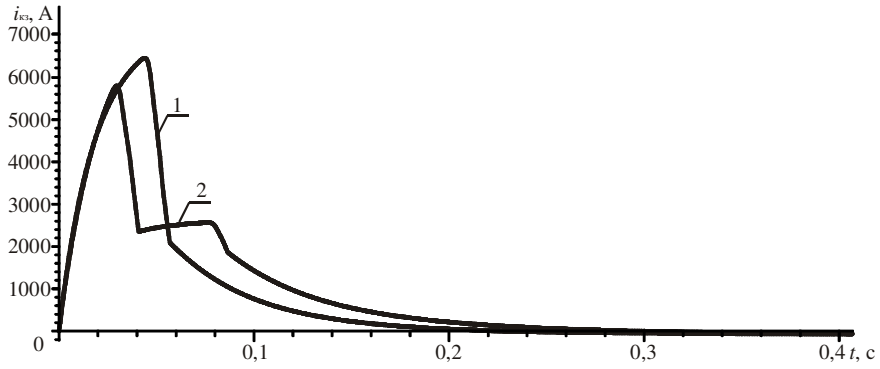


Рисунок 4.40 – Часові залежності струму КЗ для умов рис. 4.36

Результати розрахунків і розсуди показують, що закономірності впливу процесів у шунтувальній вітці на величини генераторних струмів для «СП – з'єднання» ТЕД такі ж самі, як і для «С»-з'єднання (рис. 4.24). Генераторні струми у режимі ПЗ1-ПЗ4 для «СП»-з'єднання у 3…6 разів більш триваліші і у 2…2,5 рази більші за максимальним значенням, ніж у режимі повного поля (рис. 4.41).

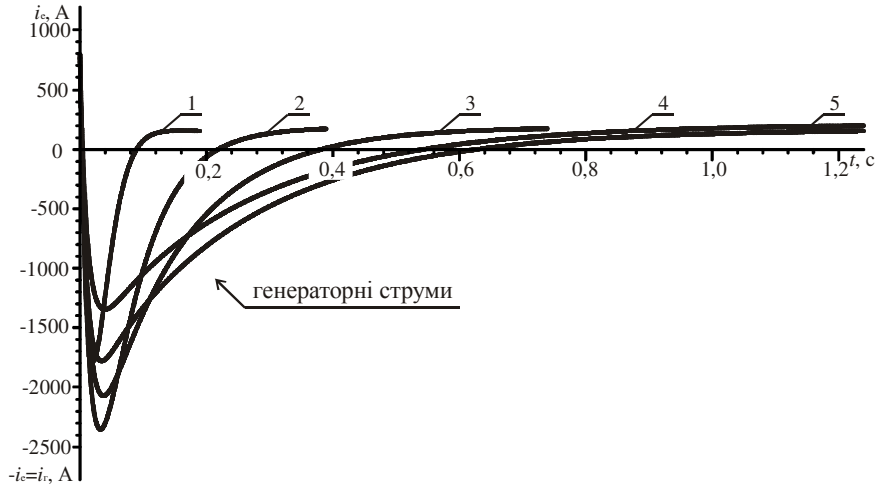


Рисунок 4.41 – Часові залежності струму ЕРС в режимі КЗ в ТМ при різному збуджені ТЕД: 1 – повне поле (ПП); 2 – ОП1; 3 – ОП2; 4 – ОП3; 5 – ОП4

4.3.3 Паралельне з'єднання тягових двигунів

У режимах паралельного з'єднання, як і при «С» чи «СП»-з'єднанні ТЕД, при КЗ тягової мережі біля ТП1 (на відстані $l_{1к} = 0{,}5\,км$, рис. 4.14) ШВ

ТП1 вимикається незалежно від відстані (0,5; 9,5; і 18,5 км) ЕРС до точки КЗ (рис. 4.42). Однак, за рахунок меншої величини результуючої індуктивності тягових кіл ЕРС термін часу повного вимикання ШВ1 при «П»-з'єднанні на 5…6 мс менший, ніж на «С» чи на «СП»-з'єднанні. Крім цього, із рис. 4.42 випливає, що чим ближче знаходиться ЕРС до точки КЗ, тим більше швидкість зростання струму $i_1(t)$ і тим менший термін часу повного вимикання ШВ ТП1 (відповідно 0,026; 0,029 і 0,032 на рис. 4.42).

Струм КЗ $i_{кз}$ (в «закоротці») має характер зміни, як і на рис. 4.14, але його максимальне значення, 16800 А, суттєво перевищує значення, 6600 і 9100 А, у режимах «С» і «СП»-з'єднання ТЕД (рис. 4.43).

У режимах $l_{ек} = 0{,}5$ і $9{,}5\,км$ фідерний струм i_2 не досягає уставки, і тому ШВ ТП2, як і на «С» і «СП»-з'єднанні, не спрацьовує (рис. 4.44). І лише при розташуванні ЕРС біля ТП2 ($l_{ек} = 18{,}5\,км$) струм i_2 досягає уставки і ШВ ТП2 вимикається через 0,12 с після початку КЗ і через 0,085 с після спрацьовування ШВ ТП1 (рис. 4.44).

Одночасно з вимиканням ШВ ТП1 напруга на струмоприймачі $u_е(t)$ швидко зменшується особливо різко і до нуля при $l_{ек} = 0{,}5\,км$ і до 1250 В при $l_{ек} = 9{,}5\,км$ (рис. 4.45). Це обумовлює швидкий перехід ТЕД в генераторний режим з $I_{max} = 11500\,A$ при $l_{ек} = 0{,}5\,км$ (рис. 4.46).

Однак, при знаходженні ЕРС біля ТП2 ($l_{ек} = 18{,}5\,км$) напруга $u_е(t)$ після вимикання ШВ ТП1 зменшується лише до 2150 В (рис. 4.45), тому $e_г(t)$ ще не перевищує $u_е(t)$ і ТЕД не переходять в режим генерації. Лише після спрацьовування ШВ ТП2 напруга падає до нуля і ЕРС через 0,1 с після початку КЗ переходять в генераторний режим з $I_{max} = 1800\,A$ (рис. 4.46). У подальшому, генераторні струми для всіх режимів (рис. 4.46) експоненціально спадають разом з загасанням основного магнітного потоку (рис. 4.47).

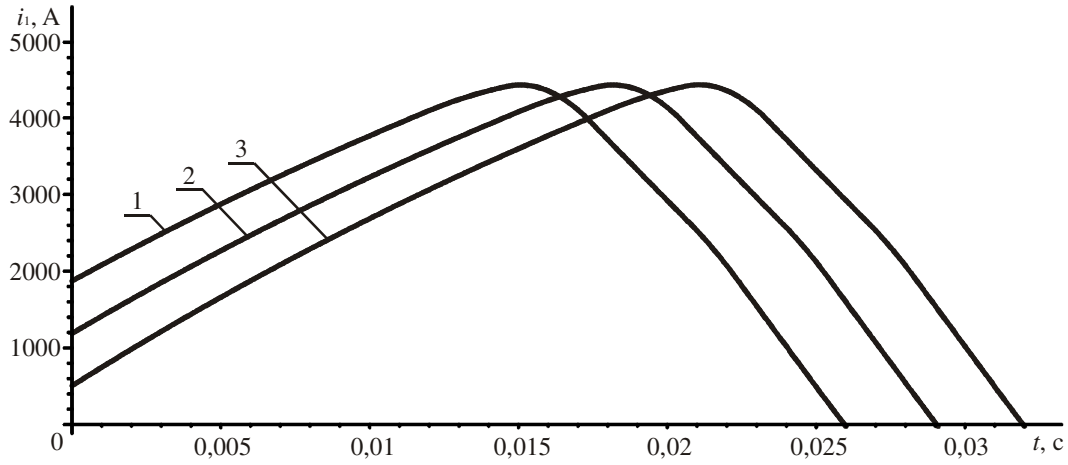


Рисунок 4.42 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1 в режимі КЗ в тяговій мережі при різній довжині $l_{\text{ек}}$ (км): 1 – 0,5; 2 – 9,5; 3 – 18,5

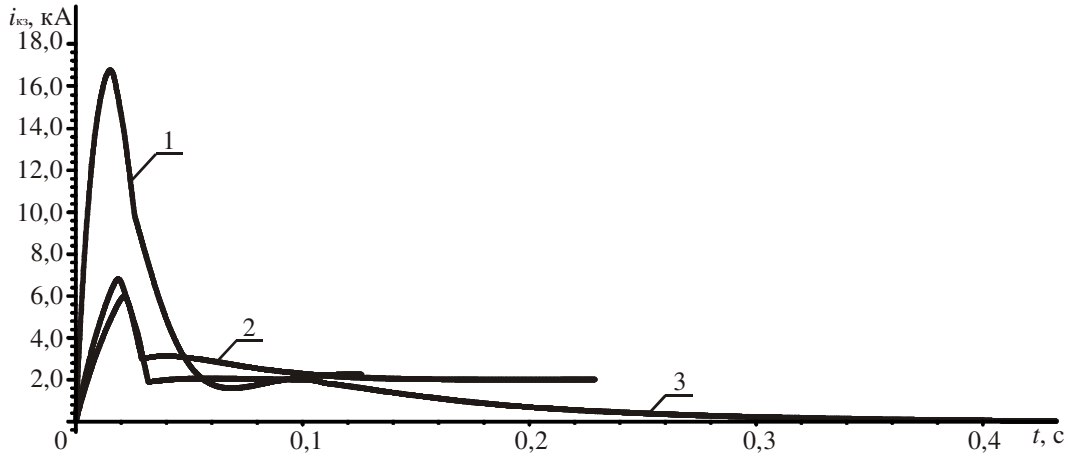


Рисунок 4.43 – Часові залежності зміни струму КЗ для умов рис. 4.42

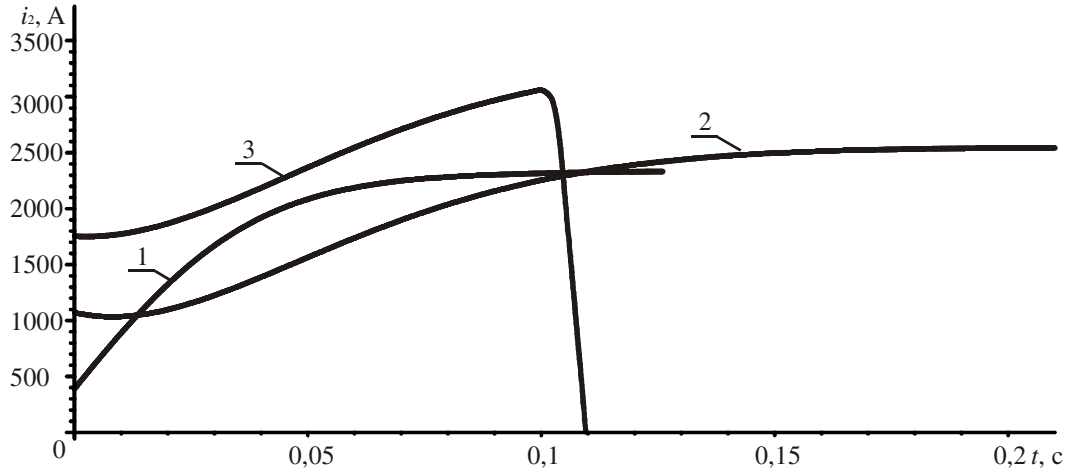


Рисунок 4.44 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП2 для умов рис. 4.42

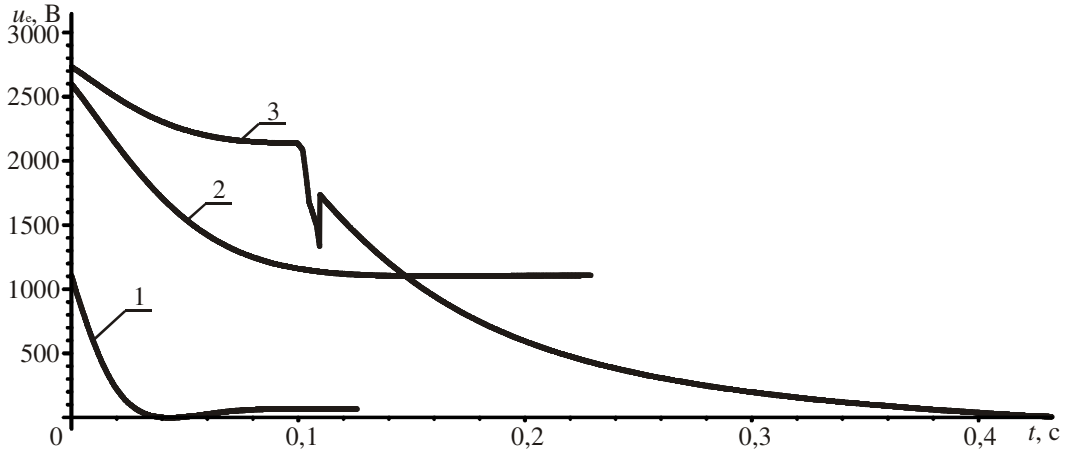


Рисунок 4.45 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі ЕРС для умов рис. 4.42

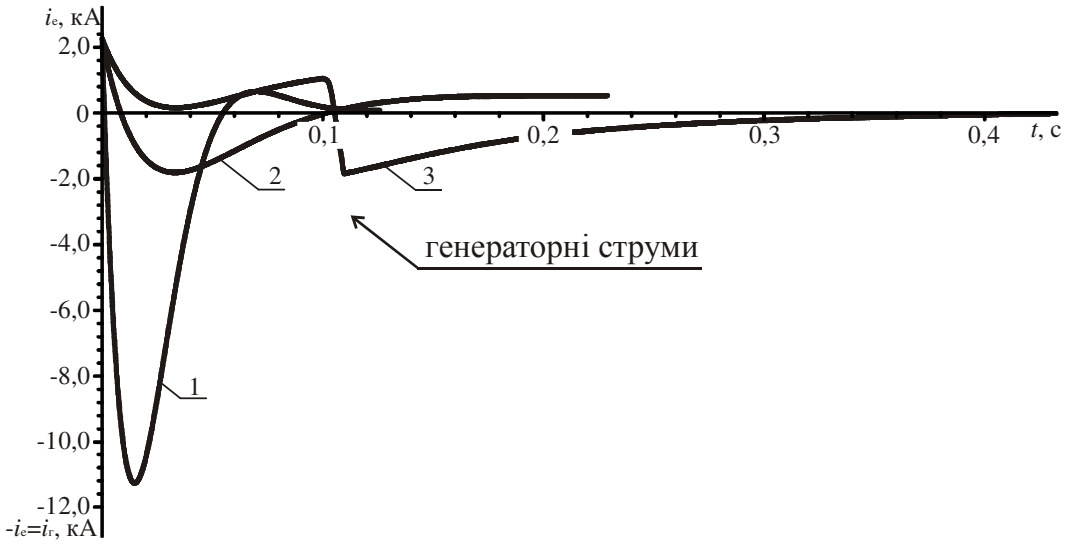


Рисунок 4.46 – Часові залежності зміни струму ЕРС для умов рис. 4.42

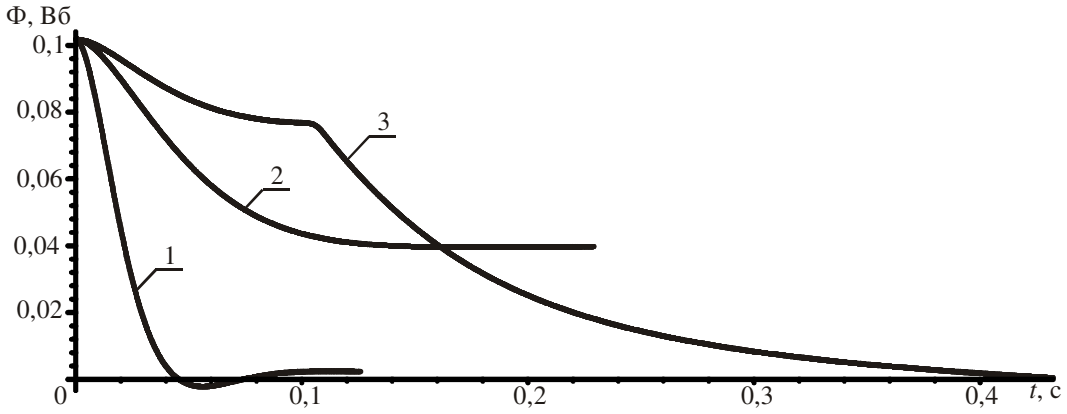


Рисунок 4.47 – Часові залежності зміни основного МП для умов рис. 4.42

Терміни часу перехідних процесів КЗ для кіл з розглянутими режимами складають відповідно 0,1; 0,16; і 0,5 с.

Тепер розглянемо процеси в системі згідно зі схемою рис. 4.24. Характер зміни і значення перехідних величин при КЗ в точці 1-1', тобто на відстані 0,5 км від ТП1, у повній мірі такі самі, як і при КЗ в точці к-к' (рис. 4.12) попереднього режиму (при $l_{\text{ек}} = 18{,}5\ км$) (див. рис. 4.42-4.47, криві 3). Також однаковий характер зазначених перехідних величин (з деякою невеликою різнею в значеннях) при КЗ в точці 4-4' (рис. 4.24) і в точці к-к' при $l_{\text{ек}} = 0{,}5\ км$ (рис. 4.12). (див. рис. 4.42-4.47, кр. 1). Тому зазначені режими далі не аналізувались.

Проаналізуємо більш докладно процеси при КЗ в точках 2-2' та 3-3' (рис. 4.24). У цих режимах ШВ обох ТП з невеликим часовим інтервалом вимикаються (рис. 4.48, 4.49). В результаті напруга на струмоприймачі $u_{\text{е}}(t)$ вже після спрацьовування ШВ ТП1 різко зменшується до 1000-1200 В (рис. 4.50), а $\Phi(t)$ (рис. 4.51) зменшується незначно, лише на 0,015 Вб (отже, і проти-е.р.с. знижується незначно) і тому ТЕД переходять в генераторний режим з $I_{\max} = 300\ A$ і $200\ A$ (рис. 4.52). У подальшому, з загасанням $\Phi(t)$ і $e_{\text{г}}(t)$, генераторний струм зменшується, в режимі КЗ в точці 2-2' (5 км) він встигає (до вимикання ШВ ТП2) перейти у двигунний режим (рис. 4.52, кр. 1). Після спрацьовування ШВ ТП2 напруга на струмоприймачі $u_{\text{е}}(t)$ в обох режимах експоненціально спадає до нуля (рис. 4.50), а $\Phi(t)$ зменшується повільніше і тому спостерігається новий кидок струму генерації (для режиму КЗ в точці 2-2' - повторної) відповідно 1200 і 3100 А (рис. 4.52).

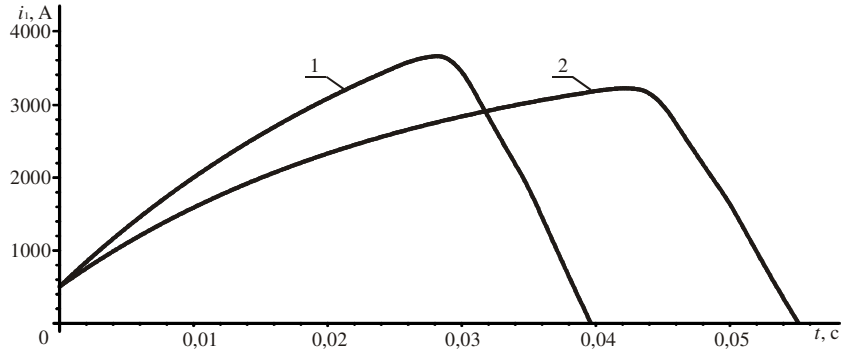


Рисунок 4.48 –Часові залежності зміни фідерного струму ТП1, в режимі КЗ в тяговій мережі при різній довжині $l_{\text{ек}}$: 1–14,0 *км*; 2–9,0 *км*

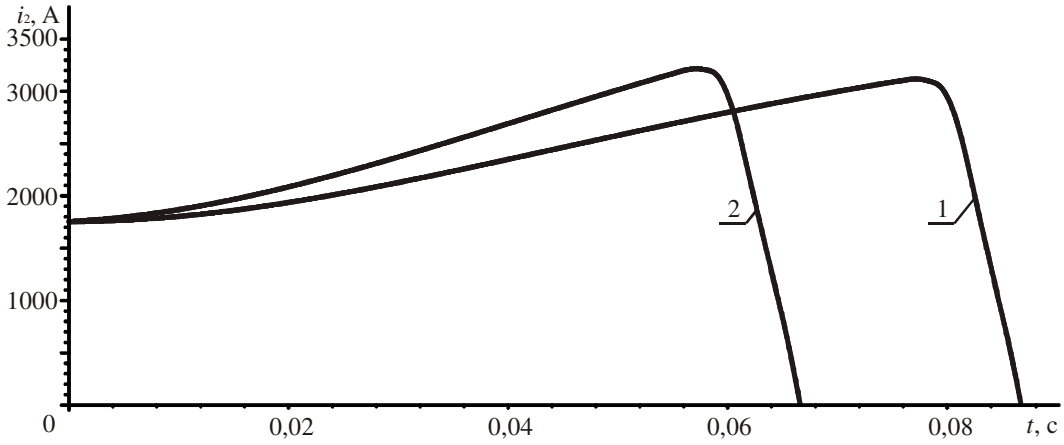


Рисунок 4.49 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1 для умов рис. 4.48

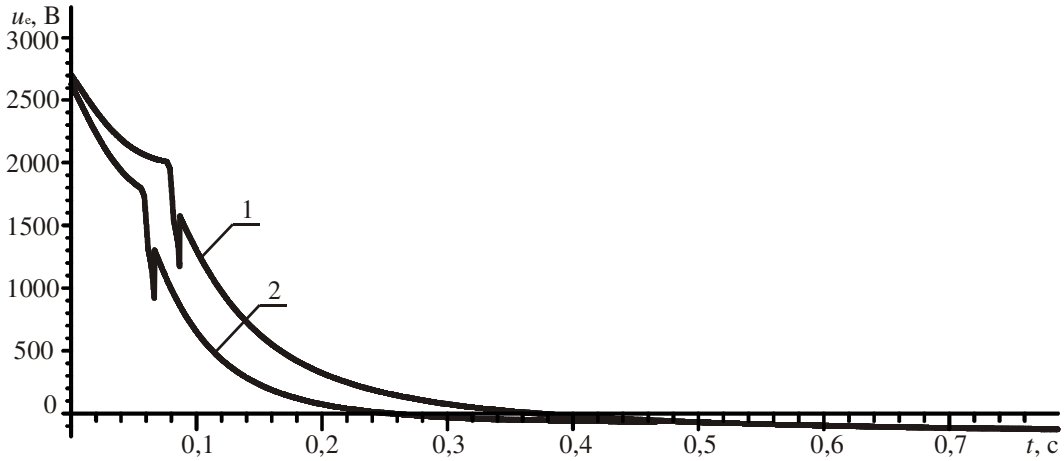


Рисунок 4.50 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі ЕРС для умов рис. 4.48

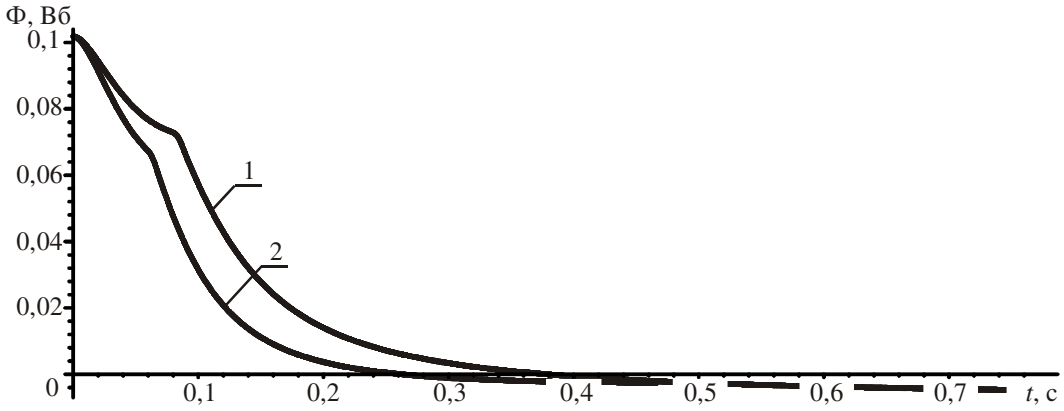


Рисунок 4.51 – Часові залежності зміни основного магнітного потоку ТЕД для умов рис. 4.48

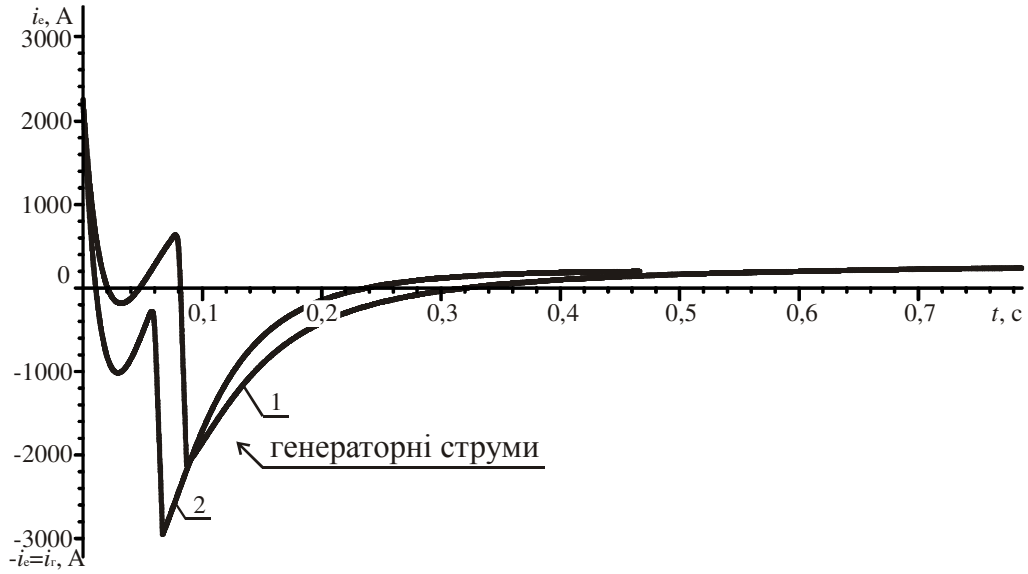


Рисунок 4.52 – Часові залежності зміни струму ЕРС для умов рис. 4.48

Характери зміни струму короткого замикання $i_{кз}$ (в «закоротці») і вихрових струмів $i_{вхр}$ в розглянутих режимах приведені на рис. 4.53 і 4.54.

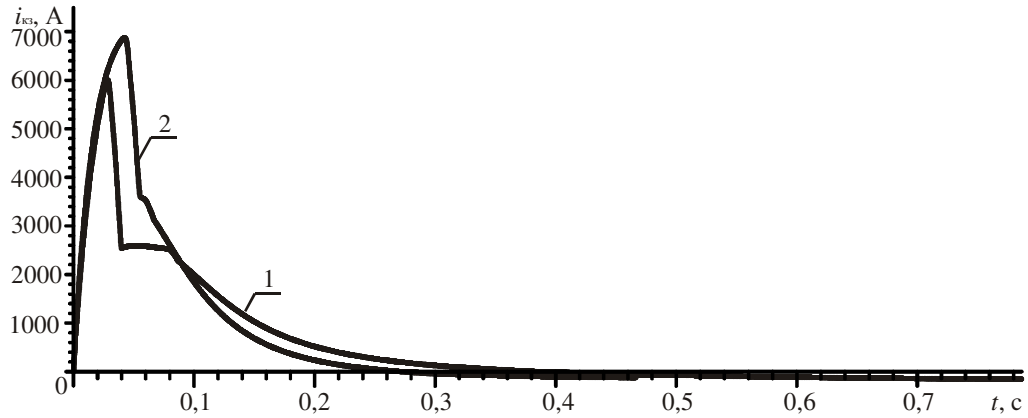


Рисунок 4.53 – Часові залежності зміни струму КЗ для умов рис. 4.48

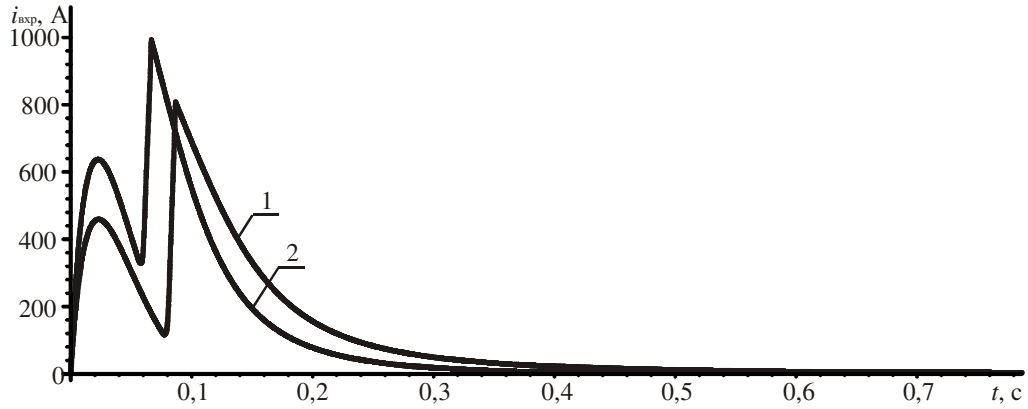


Рисунок 4.54 – Часові залежності зміни вихрових струмів ТЕД ЕРС для умов рис. 4.48

Додаткова порівняльна характеристика перехідних процесів для «С», «СП» і «П» - з'єднань ТЕД приведена у додатку Е.

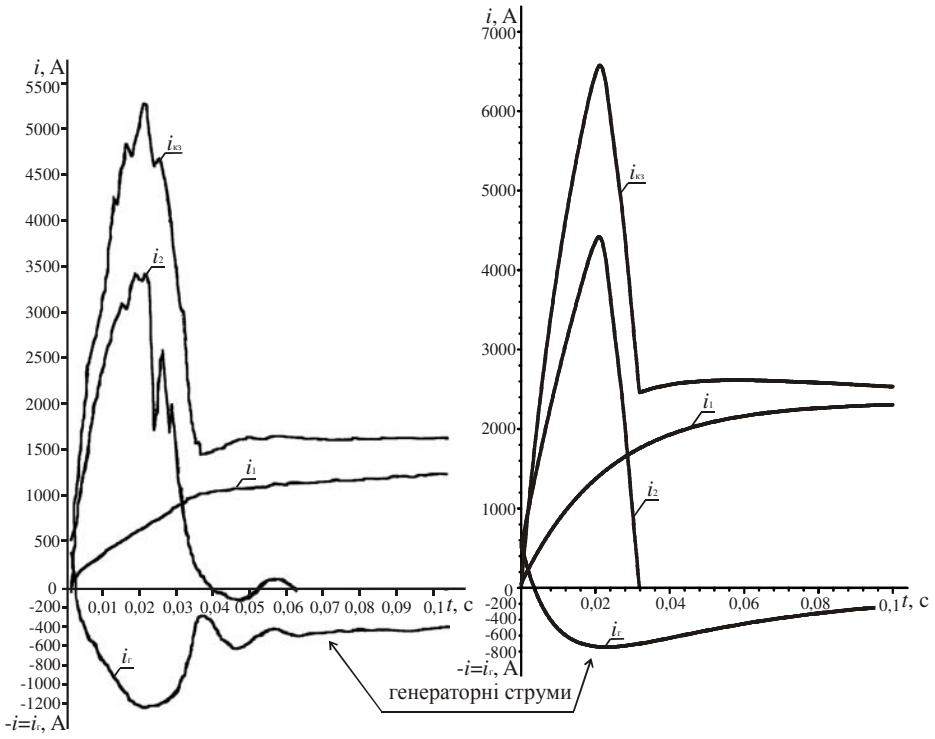
4.3.4 Оцінка адекватності математичних моделей режиму короткого замикання

Оцінку адекватності розроблених вище математичних моделей режиму КЗ з ЕРС виконаємо, використовуючи експериментальні дослідження робіт [15, 245], бо, як уже зазначалося, автору даної роботи не вдалося виконати подібні експерименти на залізницях України. Адже розглядуваний режим з точки зору безпеки його проведення є надзвичайно небезпечним: може призвести до значних пошкоджень ЕРС, контактної підвіски, і, головне, ураження електричним струмом співробітників району контактної мережі, який безпосередньо виконуватиме штучне КЗ.

В [15, 245] експерименти були виконані для перших шестивісних електровозів типу ВЛ19. Деякі технічні данні цього електровоза отримані за довідником [252] і представлені в додатку Є. Звісно, за такою мізерною кількістю вихідних даних, у порівнянні з додатком Д, розрахувати математичну модель при наявності на фідерній зоні електровозу вищезазначеної серії не представляється можливим. Тому автором було прийнято рішення створити математичну модель гіпотетичного шестивісного електровозу з тяговими двигунами типу НБ-406, як найбільш наближених до ДПЕ-340А в електровозі ВЛ19. За таблицею Є.1 додатку Є в моделі були враховані деякі данні електровозу ВЛ19, а саме: $D_{\text{кп}} = 1220\ мм$, $\mu = 3{,}74$. Схема експериментальної та розрахункової моделей представлена на рис. 4.8, вихідні данні про параметри елементів СТЕП були отримані з робіт [15, 245].

На рис. 4.55 представлені часові залежності струмів тягових підстанцій ТП1 і ТП2 відповідно $i_1(t)$ і $i_2(t)$, струму короткого замикання $i_{\text{кз}}(t)$, а також генераторного струму ЕРС $i_{\text{е}}(t) = i_{\text{г}}(t)$. На рис 4.55 експериментальні та теоретичні часові залежності зображені не в одній системі координат, оскільки створений гіпотетичний локомотив лише частково відповідає

силовій схемі реального електровозу ВЛ19. Із порівняння наведених залежностей, випливає, що їх форма подібна, проте, дещо відрізняються дані максимальних значень струмів розрахункових та експериментальних. Однак, не зважаючи на деяку відмінність, можна казати про хорошу збіжність результатів й тим самим достатню адекватність розроблених математичних моделей.



а) б)

Рисунок 4.55 – Часові залежності перехідних струмів в елементах СЕТ в режимі КЗ при наявності ЕРС на фідерній зоні: а) – експериментальні (рис. 55, а [15] або рис. 3, а [245]); б) – теоретичні

4.4 Коротке замикання в тяговій мережі з вузловою схемою живлення і різними координатами точок короткого замикання і електрорухомої одиниці

Розглянемо випадок вузлової схема живлення двоколійної ділянки з електровозом серії ДЕ1, що рухається на «СП» - з'єднанні і живиться номінальним струмом, $I_{\text{ном}} = 565\ A$.

Схема режиму КЗ (дано йому №1) приведена на рис. 4.56.

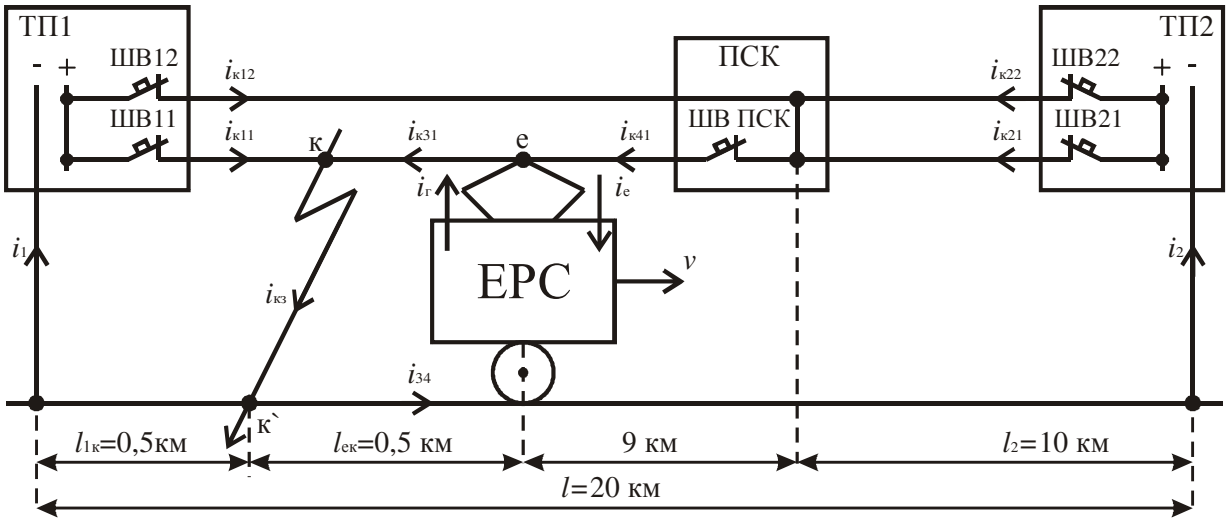


Рисунок 4.56 – Схема двоколійної ділянки СЕТ в режимі КЗ № 1 на фідерній зоні

Математична модель процесів системі описується системою рівнянь:

$$\left(R_{т1}+R_{пс1}+R_{зр1}+R_{р1}+R_{о1}\right)\cdot i_1+\left(L_{т1}+L_{зр1}+L_{о1}\right)\frac{di_1}{dt}+R_{іш1\text{-}1}\cdot i_{іш1\text{-}1}+L_{іш1\text{-}1}\frac{di_{іш1\text{-}1}}{dt}+$$

$$+R_{іш1\text{-}2}\cdot i_{іш1\text{-}2}+L_{іш1\text{-}2}\frac{di_{іш1\text{-}2}}{dt}+R_{к1}\cdot i_{к11}+L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}=e_{пс1}(t); \qquad (4.19)$$

$$\left(R_{т2}+R_{пс2}+R_{зр2}+R_{р2}+R_{о2}+R_{р4}\right)\cdot i_2+\left(L_{т2}+L_{зр2}+L_{о2}\right)\frac{di_2}{dt}+R_{іш2\text{-}1}\cdot i_{іш2\text{-}1}+$$

$$+L_{іш2\text{-}1}\frac{di_{іш2\text{-}1}}{dt}+R_{іш2\text{-}2}\cdot i_{іш2\text{-}2}+L_{іш2\text{-}2}\frac{di_{іш2\text{-}2}}{dt}+R_{к2}\cdot i_{к21}+L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}+R_{к4}\cdot i_{к41}+L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}+$$

$$+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}+R_{р3}\cdot i_{34}=e_{пс2}(t); \qquad (4.20)$$

$$R_{к2}\cdot i_{к22}+L_{к2}\frac{di_{к22}}{dt}-R_{к2}\cdot i_{к21}-L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}=0; \qquad (4.21)$$

$$\left(R_{к1}+R_{к3}+R_{к4}\right)\cdot i_{к12}+\left(L_{к1}+L_{к3}+L_{к4}\right)\frac{di_{к12}}{dt}+R_{к4}\cdot i_{к41}+L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}+$$

$$+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}-R_{к1}\cdot i_{к11}-L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}=0; \qquad (4.22)$$

$$-4\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+R_{з}\right)\cdot i_{я1}-4L_{я}\frac{di_{я1}}{dt}-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+...+\Phi_4\right)+$$

$$+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}+R_{р3}\cdot i_{34}=C_{w}\omega\left(\Phi_1+...+\Phi_4\right); \qquad (4.23)$$

$$-4\left(R_{\text{я}}+R_{\text{дп}}+R_{\text{ко}}+R_{\text{з}}\right)\cdot i_{\text{я}2}-4L_{\text{я}}\frac{di_{\text{я}2}}{dt}-2p\sigma_{\text{з}}\omega_{\text{з}}\frac{d}{dt}\left(\Phi_5+...+\Phi_8\right)+$$

$$+R_{\text{к}3}\cdot i_{\text{к}31}+L_{\text{к}3}\frac{di_{\text{к}31}}{dt}+R_{\text{р}3}\cdot i_{34}=C_{\text{w}}\omega\left(\Phi_5+...+\Phi_8\right); \quad (4.24)$$

$$i_1-i_{\text{к}11}-i_{\text{к}12}=0; \quad (4.25)$$

$$i_2-i_{\text{к}21}-i_{\text{к}22}=0; \quad (4.26)$$

$$i_{\text{к}31}+i_{\text{к}11}-i_{\text{кз}}=0; \quad (4.27)$$

$$i_{\text{я}1}+i_{\text{я}2}+i_{34}-i_2-i_1=0; \quad (4.28)$$

$$i_{\text{к}22}+i_{\text{к}21}+i_{\text{к}12}-i_{\text{к}41}=0. \quad (4.29)$$

Систему (4.19)-(4.29) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53), а також рівняннями електромагнітних процесів в ЕРС (4.11)-(4.13).

Система диференціальних рівнянь електромагнітного стану СЕТ розглядуваного режиму, представлена для першого етапу. Загалом же «ліквідація» аварійного режиму в ТМ складається з 5 етапів, що випливає із аналізу схеми 4.56 і результатів розрахунку.

При КЗ електровоз шунтується і струм $i_{\text{к}11}(t)$ першого фідера ТП1 різко зростає, через 0,008 с досягаючи уставки 3000 А, в результаті ШВ11 цього фідера вимикається через 0,025 с після початку КЗ (рис. 4.57, а). Аварійний режим призводить також до зростання струму $i_{\text{к}41}(t)$ між ПСК і ЕРС, він зростає до уставки, $i_{\text{к}11}(t)$ через 0,038 с після КЗ і 0,013 с після ШВ11 швидкодіючий автомат ПСК ШВ4 також спрацьовує (рис. 4.57, б). Одночасно з цим спочатку різко (від 3300 до 500 В) потім більш повільно (але зі змінними стрибками) зменшується напруга на електровозі $u_{\text{е}}(t)$ (рис. 4.58, а), а $\Phi(t)$ і проти-е.р.с. (рис. 4.58, а) спадають експоненціально, тобто більш повільно, ніж $u_{\text{е}}(t)$. В результаті різниця $e_{\text{е}}(t)-u_{\text{е}}(t)$ швидко стає суттєвою, що й обумовлює виникнення генераторного режиму ЕРС з максимальним значенням струму ~ 4800 А і тривалістю режиму 0,07 с. (рис. 4.58, б).

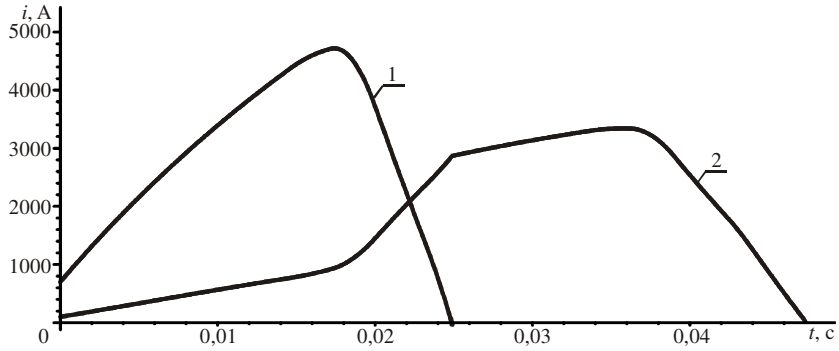


Рисунок 4.57 – Часові залежності зміни фідерних струмів ТП1 і ПСК в режимі КЗ в ТМ: 1 – $i_{к11}(t)$; 2 – $i_{к41}(t)$

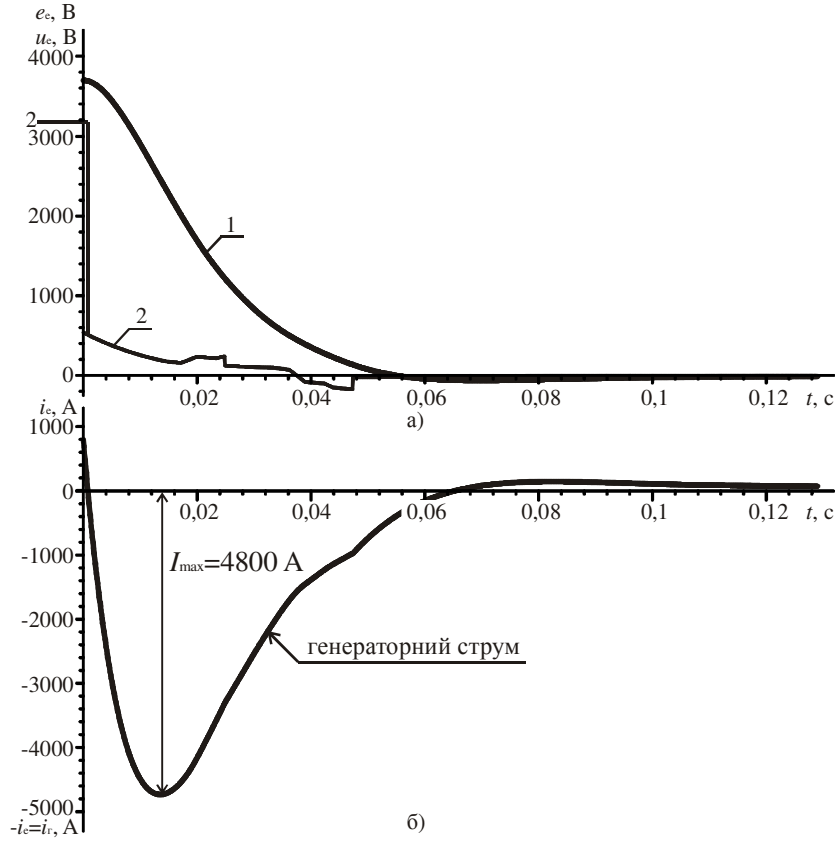


Рисунок 4.58 – Часові залежності зміни проти-е.р.с. і напруги на струмоприймачі ЕРС (а), а також струму ЕРС (б) в режимі КЗ в тяговій мережі: 1 – $e_{е}(t)$; 2 – $u_{е}(t)$

До вимикання ШВ11 на точку КЗ працювали ТП1 і ЕРС і тому і струм $i_{к31}(t)$ між точкою КЗ та ЕРС, і струм $i_{кз}$ (в «закоротці») різко збільшившись через 0,07 с після КЗ, перший до 6100 А, а другий – 10200 А, спадають до нуля.

У розглядуваному режимі вимикачі ШВ12, ШВ21 та ШВ22 (рис. 4.56) не вимикаються і тому струми $i_1(t)$, $i_2(t)$ тягових підстанцій, а також в рейці $i_{34}(t)$, після закономірного різкого зростання (відповідно до 4000, 1700 та 6300 А), зменшуються, але не до нуля, а до зрівнювального струму 100-180 А. Окрім цього, цікавими є різко коливальні характери зміни напруг на ТП1 і ТП2 (рис. 4.59). Хоча тривалість таких коливань невелика, десь біля 0,048 с, але насторожує, по-перше, велика кількість (рис. 4.59) стрибків і, по-друге, амплітуда найбільшого кидка досягає відповідно 9100 і 5800 В. Зрозуміло, що потрібний аналіз впливу таких змін напруг при КЗ на пристрої СТЕП.

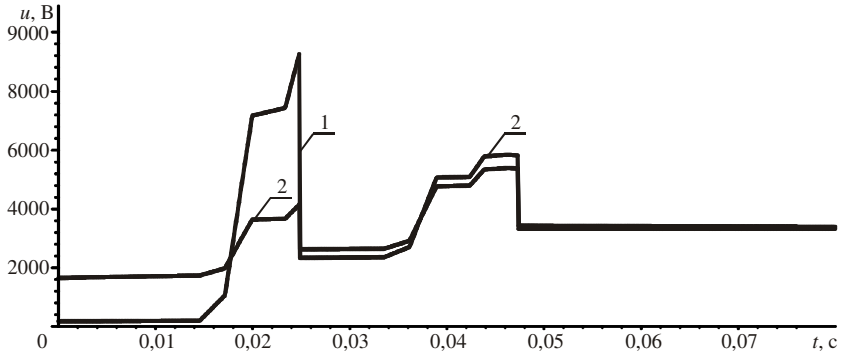


Рисунок 4.59 – Часові залежності зміни фідерних напруг ТП1 ТП2 в режимі КЗ в тяговій мережі: 1 – $u_1(t)$; 2 – $u_2(t)$

Розрахуємо і проаналізуємо режим КЗ (дамо йому №2) згідно зі схемою 4.60.

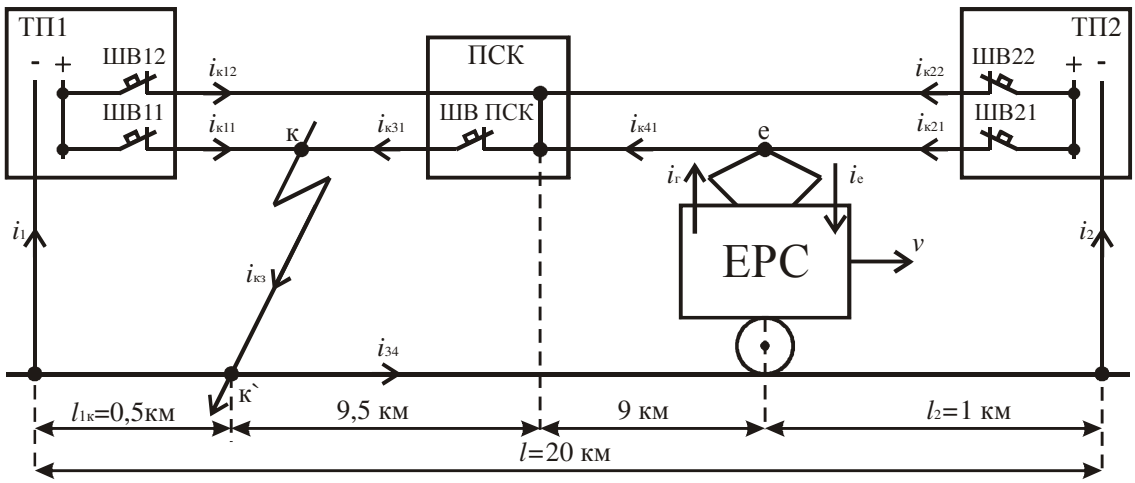


Рисунок 4.60 – Схема двоколійної ділянки СЕТ в режимі КЗ № 2 на фідерній зоні

Математична модель являє собою систему рівнянь:

$$\left(R_{т1}+R_{пс1}+R_{зр1}+R_{р1}+R_{о1}\right)\cdot i_1+\left(L_{т1}+L_{зр1}+L_{о1}\right)\frac{di_1}{dt}+R_{ішl-1}\cdot i_{ішl-1}+L_{ішl-1}\frac{di_{ішl-1}}{dt}+$$

$$+R_{ішl-2}\cdot i_{ішl-2}+L_{ішl-2}\frac{di_{ішl-2}}{dt}+R_{к1}\cdot i_{к11}+L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}=e_{пс1}(t); \quad (4.30)$$

$$\left(R_{т2}+R_{пс2}+R_{зр2}+R_{р2}+R_{о2}+R_{р4}\right)\cdot i_2+\left(L_{т2}+L_{зр2}+L_{о2}\right)\frac{di_2}{dt}+R_{ішl2-1}\cdot i_{ішl2-1}+$$

$$+L_{ішl2-1}\frac{di_{ішl2-1}}{dt}+R_{ішl2-2}\cdot i_{ішl2-2}+L_{ішl2-2}\frac{di_{ішl2-2}}{dt}+R_{к2}\cdot i_{к21}+L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}+R_{к4}\cdot i_{к41}+L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}+$$

$$+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}+\left(R_{р3}+R_{р4}\right)\cdot i_{34}=e_{пс2}(t); \quad (4.31)$$

$$\left(R_{к1}+R_{к3}\right)\cdot i_{к12}+\left(L_{к1}+L_{к3}\right)\frac{di_{к12}}{dt}+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}-R_{к1}\cdot i_{к11}-L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}=0; \quad (4.32)$$

$$-4\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+R_{з}\right)\cdot i_{я1}-4L_{я}\frac{di_{я1}}{dt}-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+...+\Phi_4\right)+R_{к4}\cdot i_{к41}+$$

$$+L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}+\left(R_{р3}+R_{р4}\right)\cdot i_{34}=C_{w}\omega\left(\Phi_1+...+\Phi_4\right); \quad (4.33)$$

$$-4\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+R_{з}\right)\cdot i_{я2}-4L_{я}\frac{di_{я2}}{dt}-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_5+...+\Phi_8\right)+R_{к3}\cdot i_{к31}+$$

$$+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}+R_{к4}\cdot i_{к41}+L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}+\left(R_{р3}+R_{р4}\right)\cdot i_{34}=C_{w}\omega\left(\Phi_5+...+\Phi_8\right); \quad (4.34)$$

$$R_{к2}\cdot i_{к22}+L_{к2}\frac{di_{к22}}{dt}-R_{к4}\cdot i_{к41}-L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}-R_{к2}\cdot i_{к21}-L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}=0; \quad (4.35)$$

$$i_1-i_{к11}-i_{к12}=0; \quad (4.36)$$

$$i_2-i_{к21}-i_{к22}=0; \quad (4.37)$$

$$i_{к31}+i_{к11}-i_{кз}=0; \quad (4.38)$$

$$i_{я1}+i_{я2}+i_{34}-i_2=0; \quad (4.39)$$

$$i_{к22}+i_{к12}+i_{к41}-i_{к31}=0. \quad (4.40)$$

Розглядувану систему (4.30)-(4.40) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53), а також рівняннями електромагнітних процесів в ЕРС (4.11)-(4.13).

Із результатів розрахунку моделі випливає наступне.

При переміщенні поїзда (електровоза) на 18 км від точки КЗ у бік ТП2 (рис. 4.60) струм $i_{к11}(t)$ першого фідера ТП1 також досягає уставки і ШВ11 ТП1 також через 0,025 с спрацьовує; хід зміни $i_{к11}(t)$ такий же самий, як і у

режимі 1 (рис. 4.57, кр. 1). Як і у режимі 1, подібно змінюється струм $i_{к31}$ між ПСК і КЗ: за 0,025 с наростає до уставки і ШВ ПСК вимикається через 0,02 с після спрацьовування ШВ11 ТП1.

Магнітний потік ТЕД змінюється на невелике значення 0,025 Вб і за аналогією змінюється і проти-е.р.с. (рис. 4.61, а), тому генераторний струм (тривалістю 0,037 с) за максимумом досягає лише ~1300 А (рис. 4.61, б), тобто у 3…7 рази менше, ніж у режимі 1. Це ще раз підкреслює той висновок, що чим далі від точки КЗ знаходиться ЕРС, тим менші амплітуди і тривалості генераторного струму. Звернемо увагу також на різко змінний коливальний ($U_{emax} > 4000\,B$) характер зміни напруги на струмоприймачі (рис. 4.61, а, кр.2). Закономірності зміни напруг на ТП1 і ТП2 чітко такі самі, як і у режимі 1 (рис. 4.59).

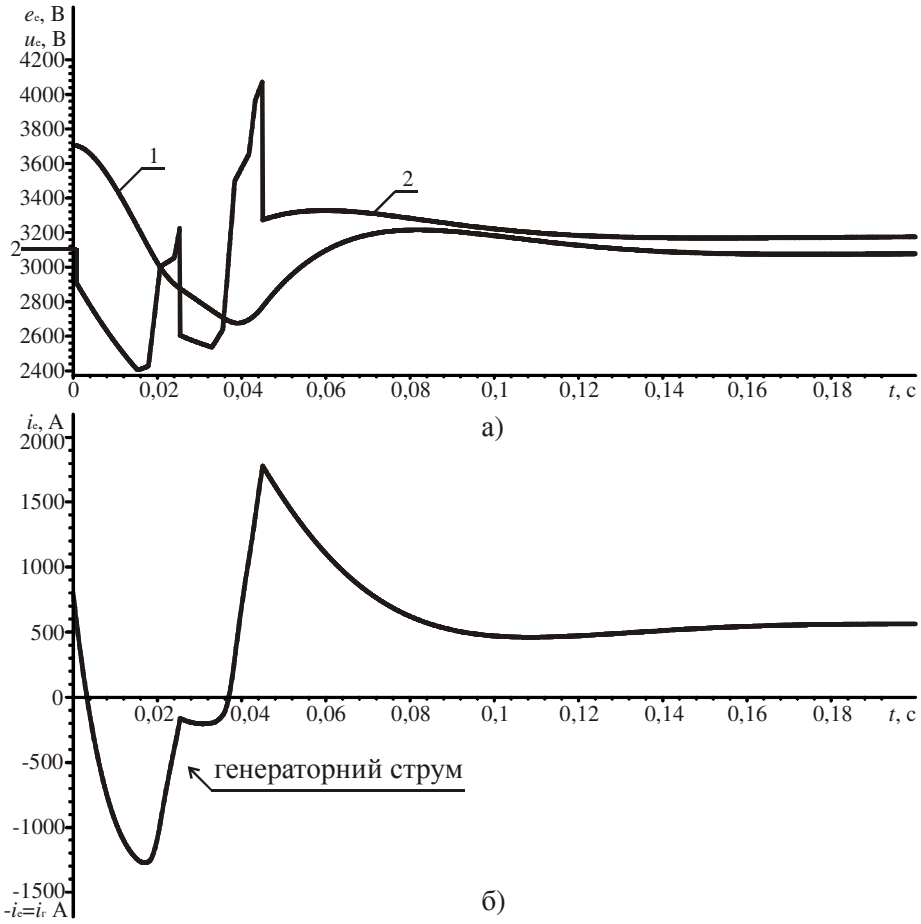


Рисунок 4.61 – Часові залежності зміни проти-е.р.с. і напруги на струмоприймачі ЕРС (а), а також струму ЕРС (б) в режимі КЗ в ТМ: 1 – $e_{е}(t)$; 2 – $u_{е}(t)$

Струми $i_1(t)$, $i_2(t)$ в ТП1 і ТП2, а також $i_{34}(t)$ в рейці, як і в режимі 1, після відповідних кидків зменшуються до вирівнювального струму (рис. 4.62 і 4.63). Струм $i_{кз}(t)$ в «закоротці» внаслідок більшої віддаленості ЕРС від точки КЗ, за амплітудою 6000 А, і тривалістю 0,045 с (рис. 4.64), змінюється інакше, ніж у режимі 1 (I_{max} ≈10000 А і тривалість 0,068 с).

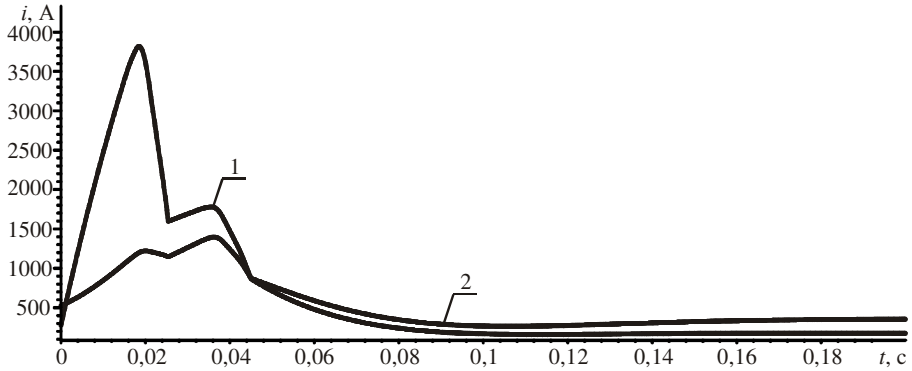


Рисунок 4.62 – Часові залежності зміни фідерних струмів ТП1, 2 в режимі КЗ в тяговій мережі: 1 – $i_1(t)$; 2 – $i_2(t)$

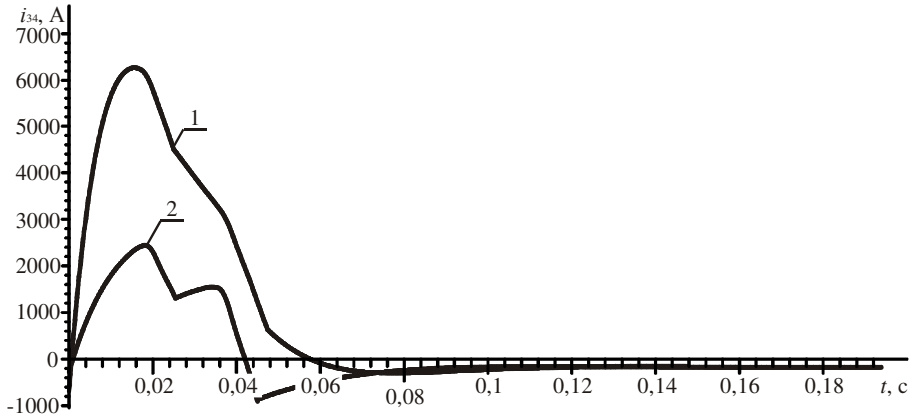


Рисунок 4.63 – Часові залежності зміни струму в рейках між ЕРС і точкою КЗ в режимі КЗ в ТМ: 1 – режим КЗ № 1; 2 – режим КЗ № 2

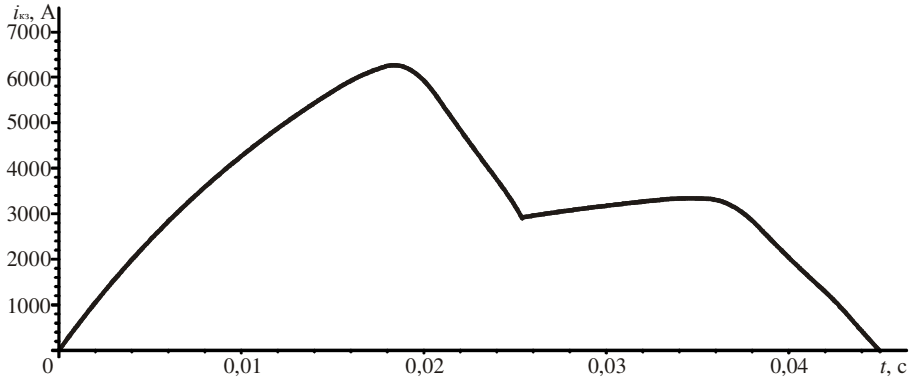


Рисунок 4.64 – Часова залежність зміни струму в точці КЗ в режимі КЗ в ТМ

Розглянемо режим (№ 3) згідно рис. 4.65

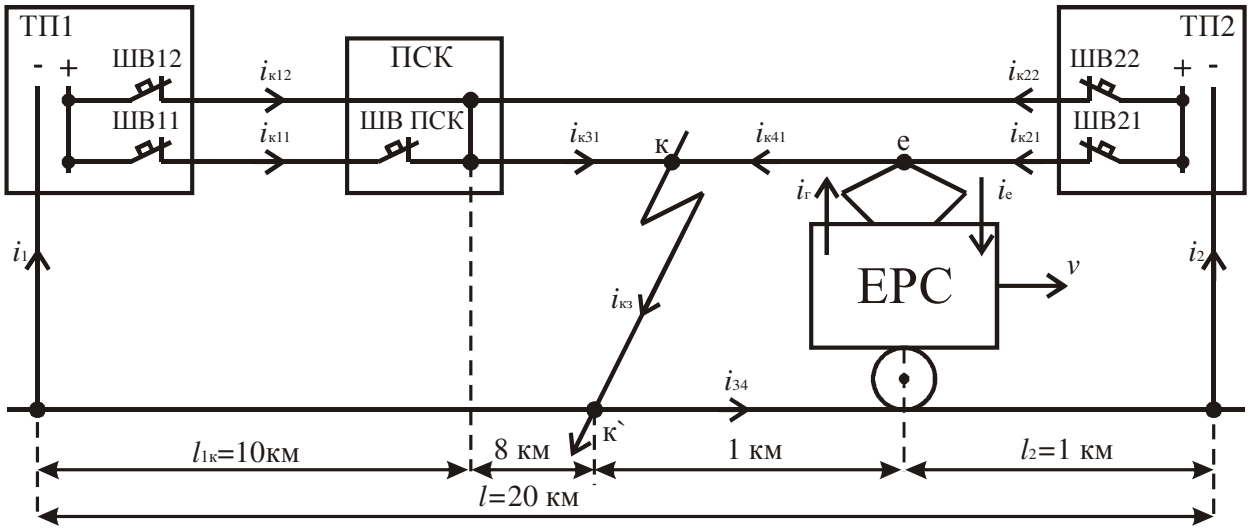


Рисунок 4.65 – Схема двоколійної ділянки СЕТ в режимі КЗ № 3 на фідерній зоні

Математична модель являє собою рівняння:

$$\left(R_{т1}+R_{пс1}+R_{зр1}+R_{р1}+R_{о1}\right)\cdot i_1+\left(L_{т1}+L_{зр1}+L_{о1}\right)\frac{di_1}{dt}+R_{іш1\text{-}1}\cdot i_{іш1\text{-}1}+L_{іш1\text{-}1}\frac{di_{іш1\text{-}1}}{dt}+$$

$$+R_{іш1\text{-}2}\cdot i_{іш1\text{-}2}+L_{іш1\text{-}2}\frac{di_{іш1\text{-}2}}{dt}+R_{к1}\cdot i_{к11}+L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}+R_{кз}\cdot i_{к31}+L_{кз}\frac{di_{к31}}{dt}=e_{пс1}(t);\quad (4.41)$$

$$\left(R_{т2}+R_{пс2}+R_{зр2}+R_{р2}+R_{о2}+R_{р4}\right)\cdot i_2+\left(L_{т2}+L_{зр2}+L_{о2}\right)\frac{di_2}{dt}+R_{іш2\text{-}1}\cdot i_{іш2\text{-}1}+$$

$$+L_{іш2\text{-}1}\frac{di_{іш2\text{-}1}}{dt}+R_{іш2\text{-}2}\cdot i_{іш2\text{-}2}+L_{іш2\text{-}2}\frac{di_{іш2\text{-}2}}{dt}+R_{к2}\cdot i_{к21}+L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}+R_{к4}\cdot i_{к41}+L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}+$$

$$+R_{р4}\cdot i_{34}=e_{пс2}(t);\quad (4.42)$$

$$R_{к1}\cdot i_{к12}+L_{к1}\frac{di_{к12}}{dt}-R_{к1}\cdot i_{к11}-L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}=0;\quad (4.43)$$

$$-4\left(R_я+R_{дп}+R_{ко}+R_з\right)\cdot i_{я1}-4L_я\frac{di_{я1}}{dt}-2p\sigma_з\omega_з\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right)+R_{к4}\cdot i_{к41}+$$

$$+L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}+R_{р4}\cdot i_{34}=C_w\omega\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right);\quad (4.44)$$

$$-4\left(R_я+R_{дп}+R_{ко}+R_з\right)\cdot i_{я2}-4L_я\frac{di_{я2}}{dt}-2p\sigma_з\omega_з\frac{d}{dt}\left(\Phi_5+\ldots+\Phi_8\right)+$$

$$+R_{к4}\cdot i_{к41}+L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}+R_{р4}\cdot i_{34}=C_w\omega\left(\Phi_5+\ldots+\Phi_8\right);\quad (4.45)$$

$$R_{к2}\cdot i_{к22}+L_{к2}\frac{di_{к22}}{dt}+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}-R_{к4}\cdot i_{к41}-L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}-$$

$$-R_{к2}\cdot i_{к21}-L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}=0; \qquad (4.46)$$

$$i_1-i_{к11}-i_{к12}=0; \qquad (4.47)$$

$$i_2-i_{к21}-i_{к22}=0; \qquad (4.48)$$

$$i_{к31}+i_{к41}-i_{кз}=0; \qquad (4.49)$$

$$i_{я1}+i_{я2}+i_{34}-i_2=0; \qquad (4.50)$$

$$i_{к22}+i_{к12}+i_{к11}-i_{к31}=0. \qquad (4.51)$$

Розглядувану систему (4.41)-(4.51) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53), а також рівняннями електромагнітних процесів в ЕРС (4.11)-(4.13).

Цей режим є дещо «дзеркальним» до режиму №1 відносно розташування точки КЗ і ЕРС, що й обумовлює схожість ряду перехідних величин та їх значень. Невелика різниця останніх спричинена лише тим, що у розглядуваному режимі №3 відстань між точкою КЗ, ЕРС і ТП2 складає 1 км, а у режимі – 0,5 км (відносно ТП1).

І в цьому режимі (№3) ЕРС шунтується «закороткою», фідерний струм $i_{к21}(t)$ зростає до уставки і через 0,032 с після початку КЗ ШВ21 підстанції ТП2 вимикається; характер зміни $i_{к21}(t)$ саме такий як $i_{к11}(t)$ (рис. 4.57, кр.1). Одночасно з цим збільшується (а після вимикання ШВ21 – навіть різко) струм $i_{к31}(t)$ між ПСК і точкою КЗ. В результаті останній досягає уставки і ШВ ПСК спрацьовує через 0,015 с після вимикання ШВ21; характер зміни $i_{к31}(t)$ як $i_{к41}(t)$ (рис. 4.57, кр. 2).

Порівняння часових залежностей рис. 4.66 і 4.58 з кривими рис. 4.61 свідчить ще раз про те, що, чим ближче ЕРС знаходиться до точки КЗ, тим різкіше і до більш низького рівня знижується напруга на струмоприймачі $u_e(t)$ і тим більший за амплітудою і тривалістю виникає генераторний струм (на рис. 4.66, б: $I_{\max г}=4200\ A$), хоча і е.р.с. (що обумовлена зміною $\Phi(t)$ (рис. 4.67. та рис. 4.66)) спадає експоненціально теж до нуля (рис. 4.66 і 4.58,

кр. 1), але повільніше, ніж зменшення $u_{\text{е}}(t)$ (рис. 4.66 і 4.58, кр.2). До цього треба додати, що у зв'язку із зазначеною зміною $u_{\text{е}}(t)$ і $\Phi(t)$ вихрові струми (які пропорційні $\Phi(t)$, і $\frac{d\Phi}{dt}$) досягають більшого максимального значення, якщо ЕРС ближче до точки КЗ (рис. 4.68, $I_{\max\,\text{вх}} = 2300$ А $I_{\max\,г} = 4200$ А тривалість – 0,07 с).

Враховуючи схемотехнічну схожість розглядуваного режиму № 3 з режимом № 1, цілком закономірно, що струм $i_1(t)$ ТП1 в режимі 3 змінюється як $i_2(t)$ ТП2 за винятком більшої амплітуди (~2200 А проти 1700 А). Теж саме можна помітити відносно струму $i_2(t)$ ТП2 в режимі 3 і струму $i_1(t)$ ТП1 в режимі 1, однак $I_{2\max} > I_{1\max}$ і досягає ~ 4000 А.

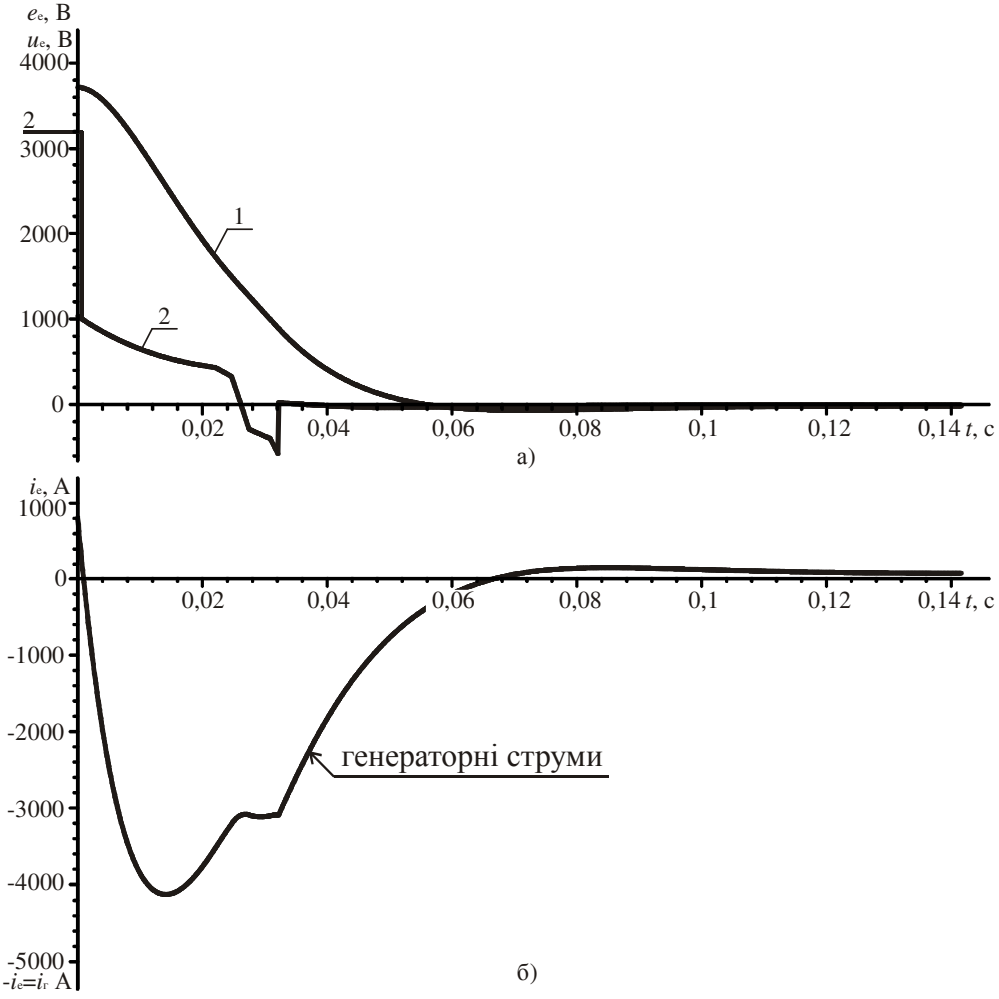


Рисунок 4.66 – Часові залежності зміни проти-е.р.с. і напруги на струмоприймачі ЕРС (а), а також струму ЕРС (б) в режимі КЗ в ТМ: 1 – $e_{\text{е}}(t)$; 2 – $u_{\text{е}}(t)$

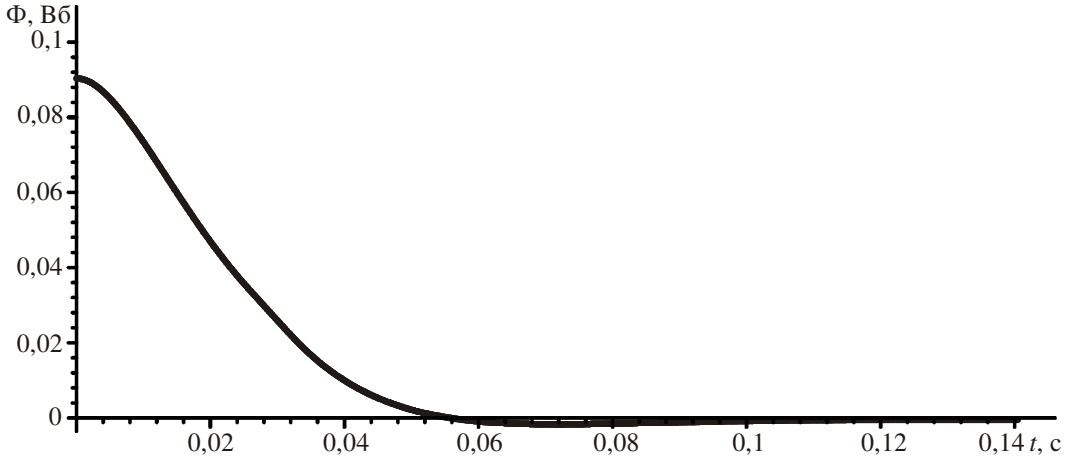


Рисунок 4.67 – Часова залежність зміни основного МП ТЕД при режимі КЗ в ТМ

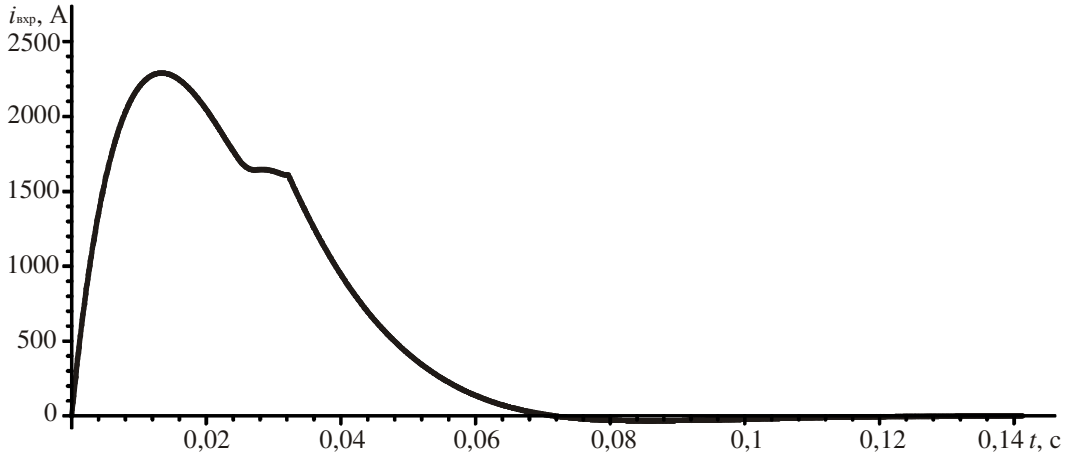


Рисунок 4.68 – Часова залежність зміни вихрових струмів в остові ТЕД при режимі КЗ в ТМ

4.5 Коротке замикання в тяговій мережі з паралельною схемою секціонування і різними координатами точок короткого замикання і електрорухомої одиниці

Найбільш розповсюдженою схемою живлення ТМ на залізницях електрифікованих постійним струмом є паралельна схема секціонування при наявності на міжпідстанційній зоні ПСК і ППС. Поділ ділянки ТМ між двома живлячими ТП, головним чином, призначено для селективної роботи систем захисту під час аварійних режимів, що виникають СЕТ. Схему заміщення такої ділянки представлено на рис. 4.69. ТЕД ЕРС на цій схемі з'єднані послідовно («С»-з'єднання).

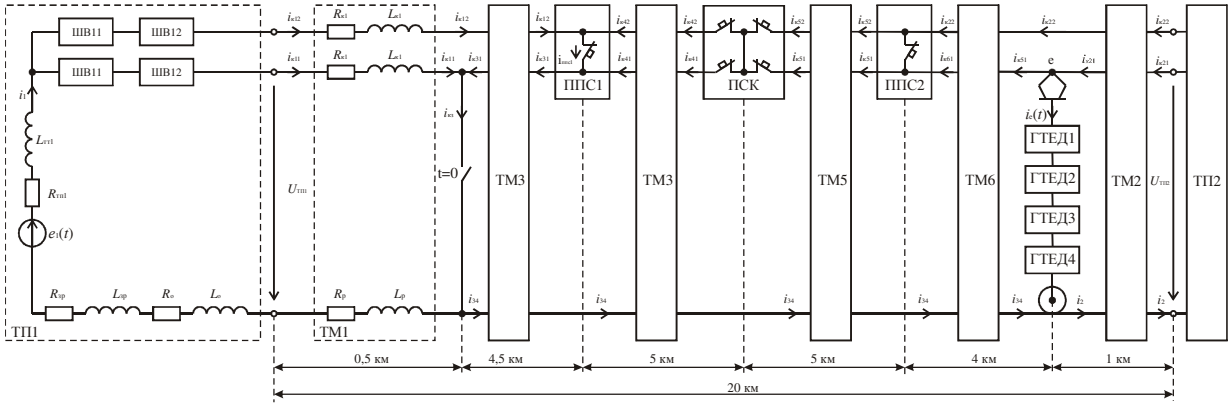


Рисунок 4.69 – Схема заміщення СЕТ в режимі КЗ в ТМ при її паралельній схемі секціонування

Під час математичного моделювання в цьому підрозділі струм електровозу, як початкову умову, було прийнято номінальним $I_{\text{е}} = I_{\text{ном}}$. Точка КЗ знаходиться на відстані 0,5 км від ТП1; електровоз на відстані 1 км від ТП2. Процеси в схемі рис. 4.69 описуються системою рівнянь:

$$\left(R_{\text{т2}} + R_{\text{пс2}} + R_{\text{зр2}} + R_{\text{р2}} + R_{\text{о2}}\right)\cdot i_2 + \left(L_{\text{т2}} + L_{\text{зр2}} + L_{\text{о2}}\right)\frac{di_2}{dt} + R_{\text{іш2-1}}\cdot i_{\text{іш2-1}} +$$
$$+L_{\text{іш2-1}}\frac{di_{\text{іш2-1}}}{dt} + R_{\text{іш2-2}}\cdot i_{\text{іш2-2}} + L_{\text{іш2-2}}\frac{di_{\text{іш2-2}}}{dt} + R_{\text{к2}}\cdot i_{\text{к21}} + L_{\text{к2}}\frac{di_{\text{к21}}}{dt} + R_{\text{кб}}\cdot i_{\text{кб1}} +$$
$$+L_{\text{кб}}\frac{di_{\text{кб1}}}{dt} + \left(\frac{R_{\text{к5}}}{2} + \frac{R_{\text{к4}}}{2}\right)\cdot i_{41} + \left(\frac{L_{\text{к5}}}{2} + \frac{L_{\text{к4}}}{2}\right)\frac{di_{41}}{dt} + R_{\text{к3}}\cdot i_{\text{к31}} + L_{\text{к3}}\frac{di_{\text{к31}}}{dt} +$$
$$+\left(R_{\text{р3}} + R_{\text{р4}} + R_{\text{р5}} + R_{\text{р6}}\right)\cdot i_{34} = e_{\text{пс2}}(t); \qquad (4.52)$$

$$\left(R_{\text{т1}} + R_{\text{пс1}} + R_{\text{зр1}} + R_{\text{р1}} + R_{\text{о1}}\right)\cdot i_1 + \left(L_{\text{т1}} + L_{\text{зр1}} + L_{\text{о1}}\right)\frac{di_1}{dt} + R_{\text{іш1-1}}\cdot i_{\text{іш1-1}} +$$
$$+L_{\text{іш1-1}}\frac{di_{\text{іш1-1}}}{dt} + R_{\text{іш1-2}}\cdot i_{\text{іш1-2}} + L_{\text{іш1-2}}\frac{di_{\text{іш1-2}}}{dt} + R_{\text{к1}}\cdot i_{\text{к11}} + L_{\text{к1}}\frac{di_{\text{к11}}}{dt} = e_{\text{пс1}}(t); \qquad (4.53)$$
$$R_{\text{кб}}\cdot i_{\text{кб1}} + L_{\text{кб}}\frac{di_{\text{кб1}}}{dt} + R_{\text{к5}}\cdot i_{\text{к51}} + L_{\text{к5}}\frac{di_{\text{к51}}}{dt} + R_{\text{к3}}\cdot i_{\text{к31}} + L_{\text{к3}}\frac{di_{\text{к31}}}{dt} + R_{\text{к4}}\cdot i_{\text{к41}} +$$
$$+L_{\text{к4}}\frac{di_{\text{к41}}}{dt} + \left(R_{\text{р3}} + R_{\text{р4}} + R_{\text{р5}} + R_{\text{р6}}\right)\cdot i_{34} - 8\left(R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{з}}\right)\cdot i_{\text{я}} -$$
$$-8L_{\text{я}}\frac{di_{\text{я}}}{dt} + 2p\sigma_{\text{з}}\omega_{\text{з}}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1 + \ldots + \Phi_8\right) = C_{\text{w}}\omega\left(\Phi_1 + \ldots + \Phi_8\right); \qquad (4.54)$$
$$\left(R_{\text{к1}} + R_{\text{к3}}\right)\cdot i_{\text{к12}} + \left(L_{\text{к1}} + L_{\text{к3}}\right)\frac{di_{\text{к12}}}{dt} + R_{\text{к3}}\cdot i_{\text{к31}} + L_{\text{к3}}\frac{di_{\text{к31}}}{dt} - R_{\text{к1}}\cdot i_{\text{к11}} + L_{\text{к1}}\frac{di_{\text{к11}}}{dt} = 0. \qquad (4.55)$$

$$\left(R_{к2}+R_{к6}\right)\cdot i_{к22}+\left(L_{к2}+L_{к6}\right)\frac{di_{к22}}{dt}-R_{к6}\cdot i_{к61}-L_{к6}\frac{di_{к61}}{dt}-R_{к2}\cdot i_{к21}+L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}=0; \quad (4.56)$$

$$i_1-i_{к11}-i_{к12}=0; \quad (4.57)$$

$$i_2-i_{к21}-i_{к22}=0; \quad (4.58)$$

$$i_{к11}+i_{к31}-i_1-i_{34}=0; \quad (4.59)$$

$$i_{34}+i_я-i_2=0; \quad (4.60)$$

$$i_{к12}+i_{к41}-i_{к31}=0; \quad (4.61)$$

$$i_{к22}+i_{к61}-i_{к41}=0. \quad (4.62)$$

Розглядувану систему (4.52)-(4.62) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53), а також рівняннями електромагнітних процесів в ЕРС (4.11)-(4.13).

В режимі, коли точка КЗ розташована на відстані $l_1=0,5\,км$ від ТП1, а ЕРС – 1 км від ТП2 (рис. 4.69), особливим є те, що характери зміни всіх без виключення перехідних величин однакові для всіх досліджених електровозів (ДЕ1, 2ЕЛ4, ВЛ10, ВЛ8). По-друге, має місце така послідовна риса у такій часовій послідовності вимикання таких ШВ тягової мережі (рис. 4.70): першим через 0,025 с після початку КЗ вимикається ШВ першого фідера ТП1 (рис. 4.70, кр. 1), потім через 0,017 с після цього спрацьовує ШВ ППС1 (рис. 4.70, кр. 2) і далі через 0,018 с – вимикається ШВ на ПСК (рис. 4.70, кр. 3, 4). Якраз таке вимикання ШВ, й тим самим розривання відповідних фідерних струмів, вплинуло на різко нестаціонарний часовий характер зміни як напруг і струмів ТП (рис. 4.71-4.74), так і електровозів (рис. 4.75 і 4.76). При цьому треба відзначити значні максимальні значення напруг на ТП, $U_{1\max}=7100\,В$ і $U_{2\max}=5600\,В$ (рис. 4.71 і 4.73), що виникають внаслідок накладання е.р.с. самоіндукції силових тягових кіл на стандартні підстанційні напруги. Також треба підкреслити, що при такому розташуванні ЕРС і точки КЗ ні один електровоз не переходить в генераторний режим (рис. 4.76) і найбільше максимальне значення кидка (в момент $t=00,6\,с$) тягового струму 1360…1440 А спостерігається для нових електровозів 2ЕЛ4 і ДЕ1 (рис. 4.76).

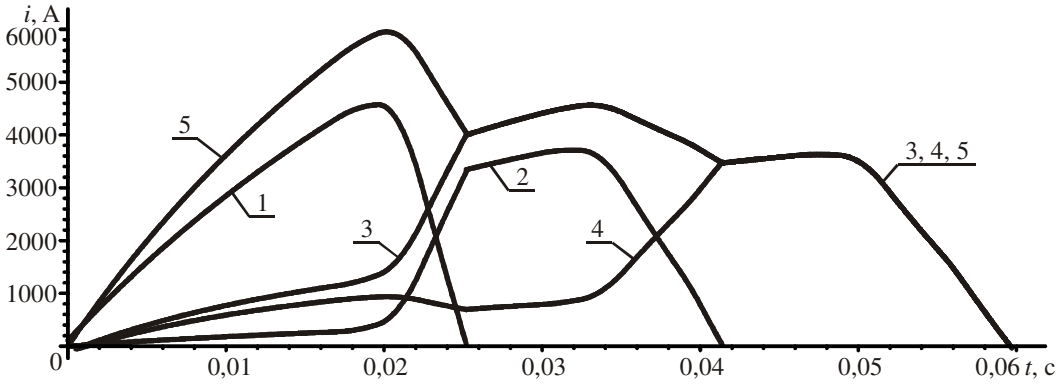


Рисунок 4.70 – Часові залежності перехідних струмів тягової мережі: 1 – струму першого фідера ТП1 $i_{к11}(t)$; 2 – струму ППС1 $i_{ппс1}(t)$; 3 – струму від ППС1 до точки КЗ $i_{к31}(t)$; 4 – струму від ПСК до ППС1 $i_{к41}(t)$; 5 – струму КЗ $i_{кз}(t)$

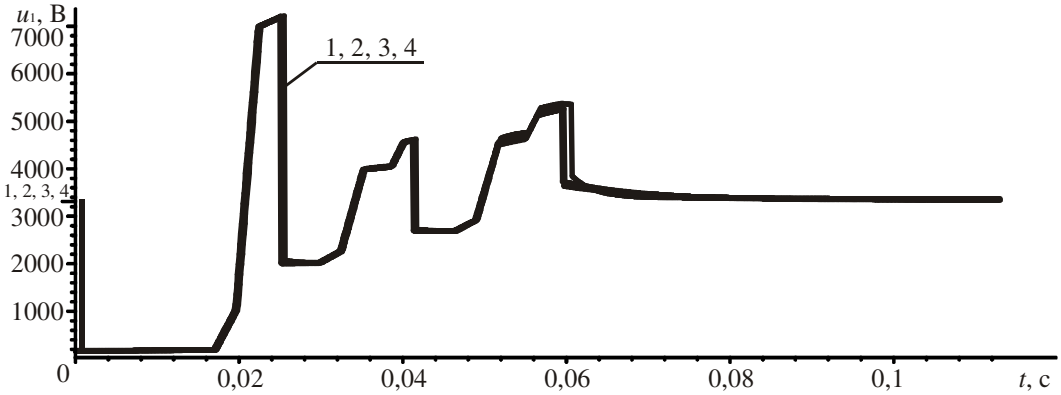


Рисунок 4.71 – Часові залежності зміни напруги на затискачах ТП1 у випадку КЗ на фідерній зоні і різних серіях електровозів на фідерній зоні: 1 – ДЕ1; 2 – 2ЕЛ4; 3 – ВЛ10; 4 – ВЛ8

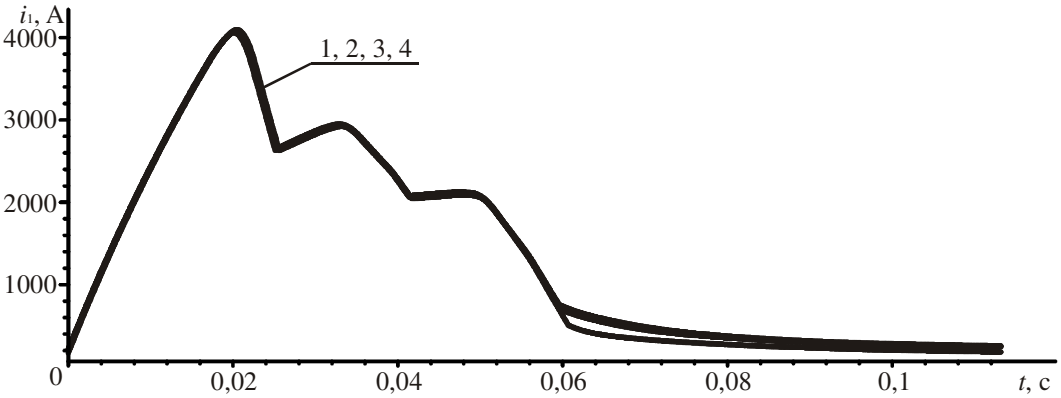


Рисунок 4.72 – Часові залежності зміни струму ТП1 для умов рис. 4.71

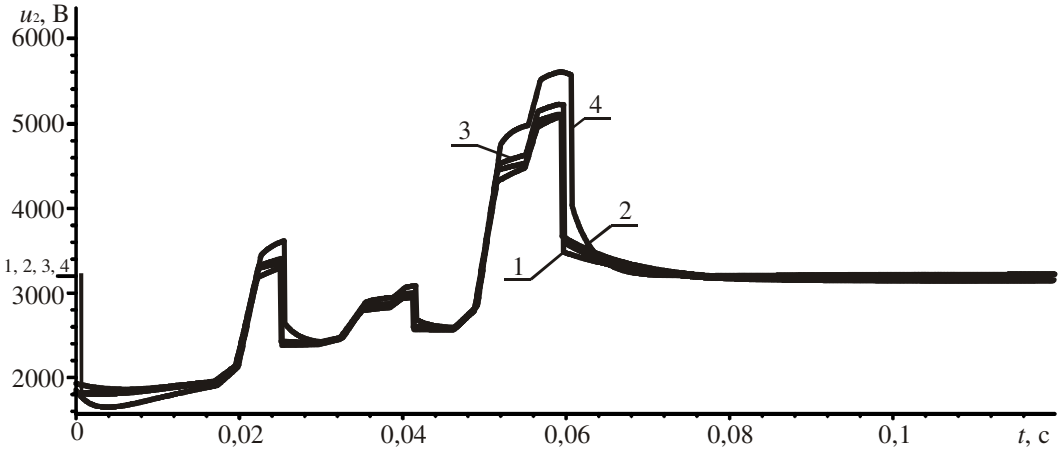


Рисунок 4.73 – Часові залежності зміни напруги на затискачах ТП2 для умов рис. 4.71

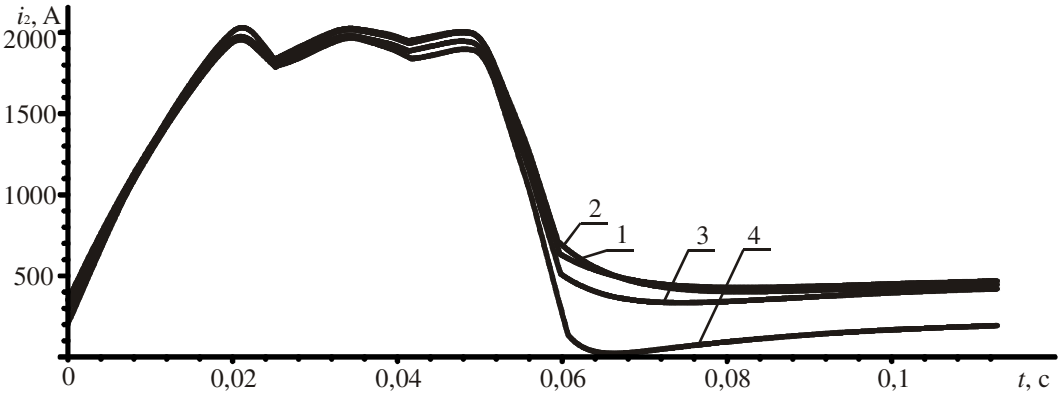


Рисунок 4.74 – Часові залежності зміни струму ТП2 для умов рис. 4.71

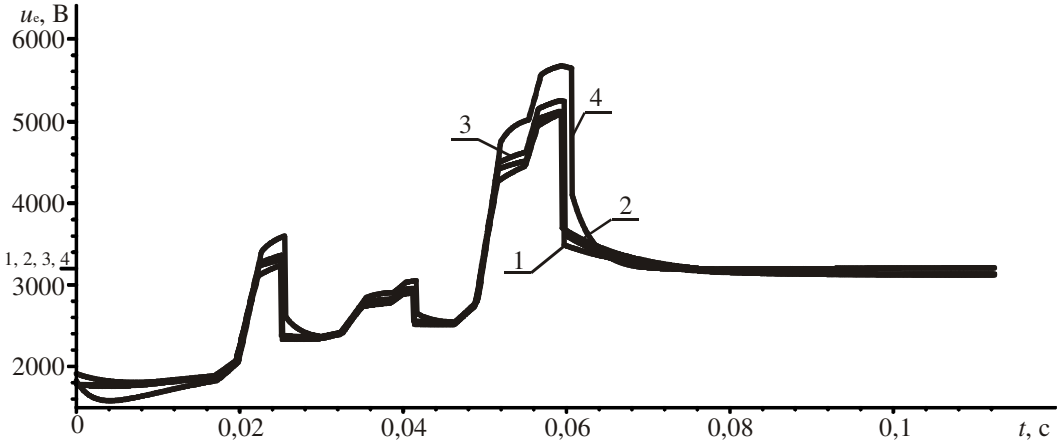


Рисунок 4.75 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі ЕРС для умов рис. 4.71

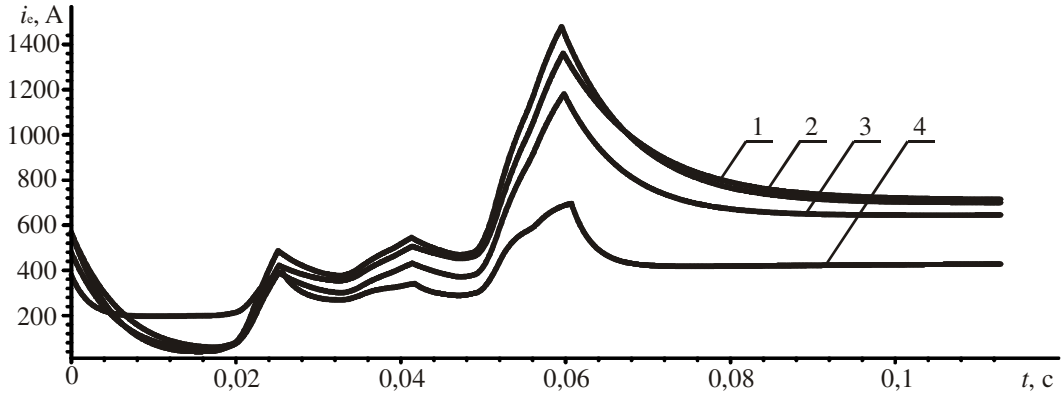


Рисунок 4.76 – Часові залежності зміни струму ЕРС для умов рис. 4.71

Тепер розрахуємо режим, коли точка КЗ знаходиться на відстані 1,0 км від ЕРС, а ЕРС – на відстані 1 км від ТП2 (рис. 4.77).

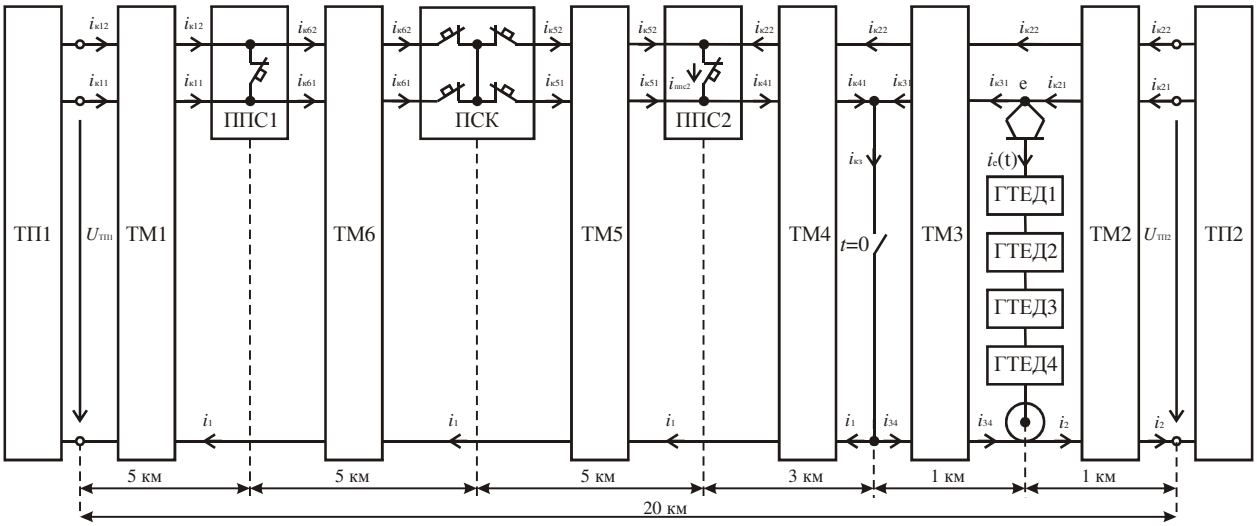


Рисунок 4.77 – Схема заміщення СЕТ в режимі КЗ в ТМ при її паралельній схемі секціонування

Математична модель являє собою систему рівнянь:

$$\left(R_{т1}+R_{пс1}+R_{зр1}+\frac{R_{к1}}{2}+\frac{R_{к6}}{2}+\frac{R_{к5}}{2}+R_{р1}+R_{о1}+R_{р6}+R_{р5}+R_{р4}+\right)\cdot i_1+$$

$$+\left(L_{т1}+L_{зр1}+\frac{L_{к1}}{2}+\frac{L_{к6}}{2}+\frac{L_{к5}}{2}+L_{о1}\right)\frac{di_1}{dt}+R_{ішl-1}\cdot i_{ішl-1}+L_{ішl-1}\frac{di_{ішl-1}}{dt}+$$

$$+R_{ішl-2}\cdot i_{ішl-2}+L_{ішl-2}\frac{di_{ішl-2}}{dt}+R_{к4}\cdot i_{к41}+L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}=e_{пс1}(t); \qquad (4.63)$$

$$\left(R_{т2}+R_{пс2}+R_{зр2}+R_{р2}+R_{о2}\right)\cdot i_2+\left(L_{т2}+L_{зр2}+L_{о2}\right)\frac{di_2}{dt}+R_{iш2\text{-}1}\cdot i_{iш2\text{-}1}+$$

$$+L_{iш2\text{-}1}\frac{di_{iш2\text{-}1}}{dt}+R_{iш2\text{-}2}\cdot i_{iш2\text{-}2}+L_{iш2\text{-}2}\frac{di_{iш2\text{-}2}}{dt}+R_{к2}\cdot i_{к21}+L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}+$$

$$+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}+R_{р3}\cdot i_{34}=e_{пс2}(t); \qquad (4.64)$$

$$R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}+R_{р3}\cdot i_{34}-8\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+R_{з}\right)\cdot i_{я}-8L_{я}\frac{di_{я}}{dt}+$$

$$+2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_8\right)=C_{w}\omega\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_8\right); \qquad (4.65)$$

$$\left(R_{к2}+R_{к3}+R_{к4}\right)\cdot i_{к22}+\left(L_{к2}+L_{к3}+L_{к4}\right)\frac{di_{к22}}{dt}+R_{к4}\cdot i_{к41}+L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}-$$

$$-R_{к3}\cdot i_{к31}-L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}-R_{к2}\cdot i_{к21}-L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}=0; \qquad (4.66)$$

$$i_2-i_{к21}-i_{к22}=0; \qquad (4.67)$$

$$i_{к41}+i_{к31}-i_1-i_{34}=0; \qquad (4.68)$$

$$i_{34}+i_{я}-i_2=0; \qquad (4.69)$$

$$i_{к22}+i_1-i_{к41}=0. \qquad (4.70)$$

Систему (4.63)-(4.70) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53), а також рівняннями електромагнітних процесів в ЕРС (4.11)-(4.13).

Із розрахунків в моделі випливає наступне. При переміщенні точки КЗ ближче до ЕРС, а отже, і до ТП2 (рис. 4.77) спочатку (для всіх електровозів) значення уставки 3500 А досягає струм $i_{21}(t)$ і ШВ цього фідера, ТП2 і він через 0,032 с вимикається (рис. 4.78, кр. 1). потім через 0,014 с після цього спрацьовує ШВ ППС1 (рис. 4.78 кр. 2) і далі, ще через 0,018 с спрацьовують ШВ і розриваються аварійні струми між ПСК і ППС1 та ППС2 (рис. 4.78, кр. 3 і 4). Ці вимикання, як і у попередньому режимі КЗ, обумовлюють як різко динамічний характер зміни напруг і струмів в розглядуваній системі, так і великі значення амплітуд імпульсів-кидків перенапруг, зокрема на ТП до 6000 В (рис. 4.79 і 4.80) і струму до 4200 А для ТП2 (рис. 4.81, кр. 2).

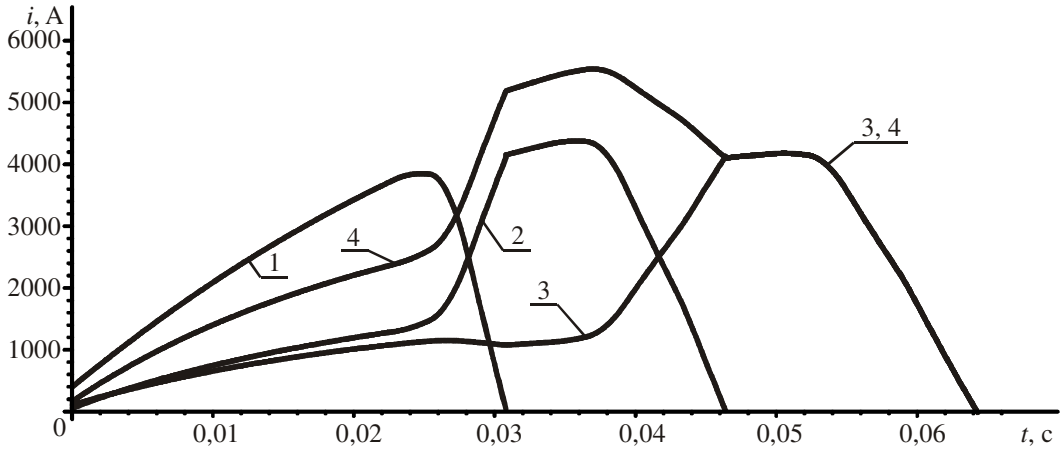


Рисунок 4.78 – Часові залежності перехідних струмів тягової мережі: 1 – струму першого фідера ТП2 $i_{к21}(t)$; 2 – струму ППС2 $i_{ппс2}(t)$; 3 – струму від ППС2 до ПСК $i_{к51}(t)$; 4 – струму від ППС2 до точки КЗ $i_{к41}(t)$

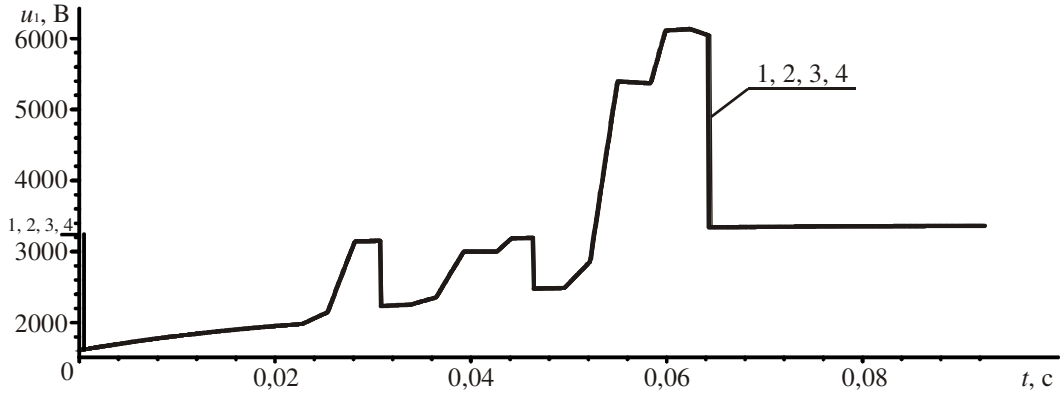


Рисунок 4.79 – Часові залежності зміни напруги на затискачах ТП1 у випадку КЗ на фідерній зоні і різних типах електровозів на фідерній зоні: 1 – ДЕ1; 2 – 2ЕЛ4; 3 – ВЛ10; 4 – ВЛ8

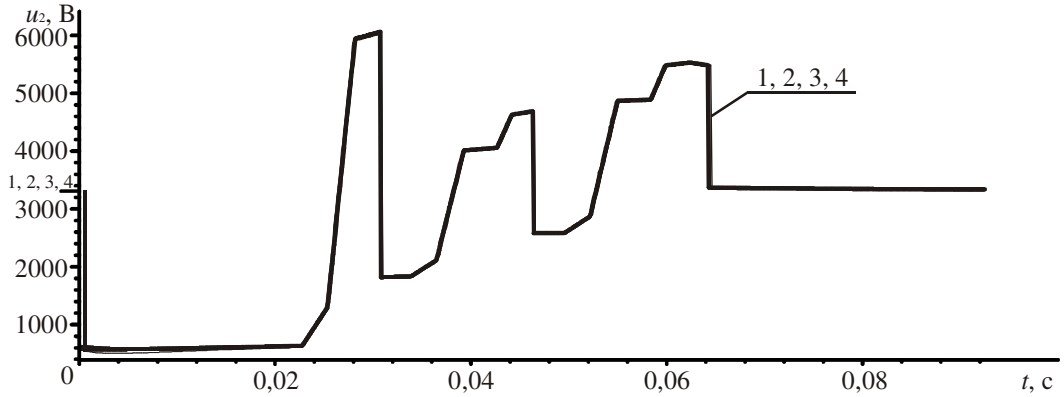


Рисунок 4.80 – Часові залежності зміни напруги на затискачах ТП2 для умов рис. 4.79

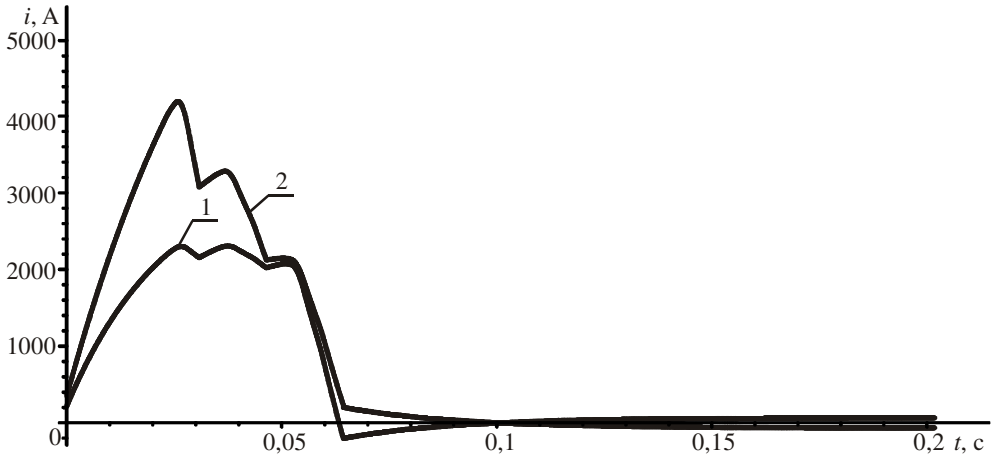


Рисунок 4.81 – Часові залежності перехідних струмів ТП1 і ТП2 для всіх серій електровозів: $1-i_1(t)$; $2-i_2(t)$

Особливістю цього режиму, у порівнянні з попереднім, є зміни сумарної проти-е.р.с. ТЕД електровозу і напруги $u_e(t)$ на його струмоприймачі: на протязі терміну часу 0,3 с (з початку КЗ) ця проти-е.р.с. (в кожному електровозі), хоча і зменшується експоненціально, але настільки повільно (що, як зазначалось, обумовлено загасанням $\Phi(t)$), що весь зазначений термін часу вона перевищує $u_e(t)$ й тим самим обумовлює генераторний режим (рис. 4.82). Тривалість генераторного струму у всіх електровозів однакова, ~0,3 с, а амплітуда імпульсів різна: у «нових» електровозів ДЕ1 і 2ЕЛ4 вона вища і досягає 920 А, у ВЛ10 – 660 А і лише у ВЛ8 – невелика, не перевищує 200 А. Імовірно, що це обумовлено потужністю і конструктивними особливостями і параметрами ТЕД електровозів. Однак всі електровози разом з ТП в однаковій мірі «живлять» точку КЗ в ТМ: амплітуда струму в «закоротці» досягає 7200 А, лише для ВЛ8 вона менша і складає 800 А (рис. 4.83).

Якщо точка КЗ знаходиться на відстані 0,5 км від ТП1, а електровоз на відстані 1,0 км від ТП1 (рис. 4.84), тоді процеси описуються системою диференціальних рівнянь, яка подібна до системи (4.30)-(4.37). Загалом ліквідація аварійного режиму в ТМ складається з таких етапів:

– фідерний струм $i_{к11}(t)$ ТП1 досягає уставки, додається також термін часу власного вимикання відповідних ШВ;

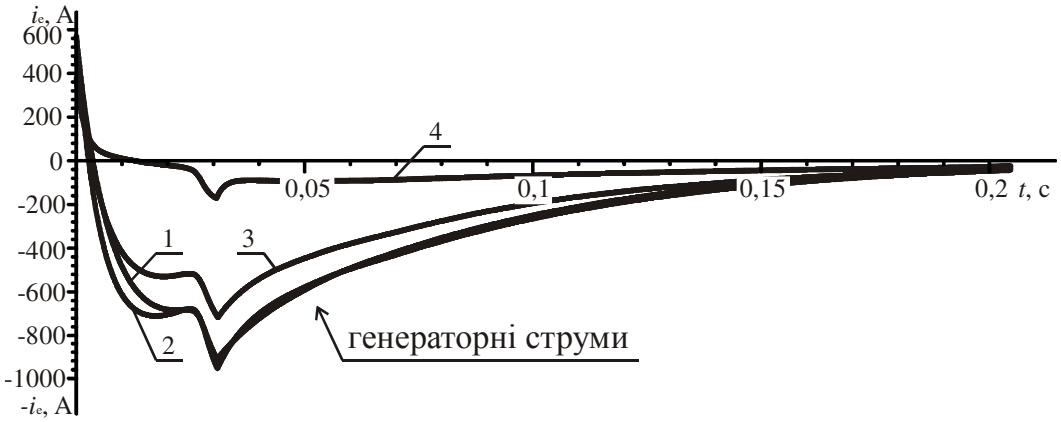


Рисунок 4.82 – Часові залежності зміни струму ЕРС для умов рис. 4.79

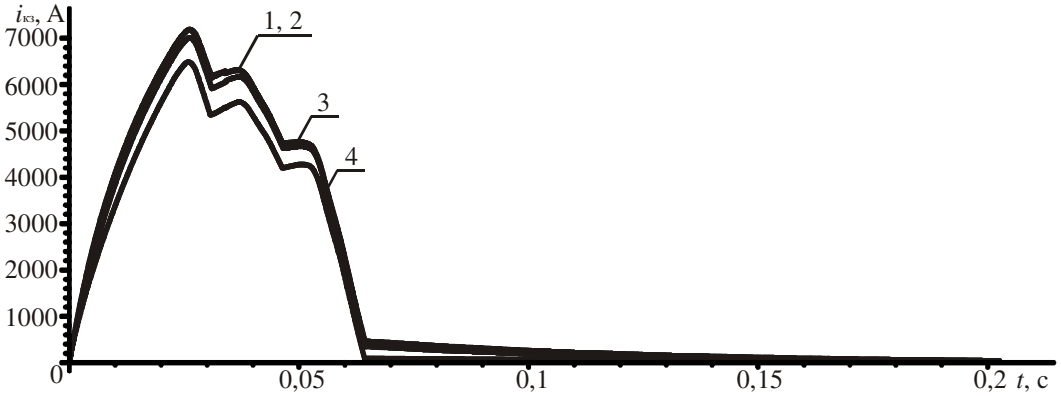


Рисунок 4.83 – Часові залежності зміни струму КЗ для умов рис. 4.79

– вимикання фідерного струму $i_{к11}(t)$ ТП1, результат цього $i_{к11}(t)=0$;

– струм ППС1 $i_{ппс1}(t)$ досягає уставки $I_{у\,ппс1}=2200\,A$ (ця величина отримана за картами уставок ШВ ТП, ПСК, ППС, які застосовуються на електрифікованих ділянках ДП «Придніпровська залізниця»);

– вимикання струму $i_{ппс1}(t)$ ППС1, результатом цього є $i_{ппс1}(t)=0$;

– срум ПСК $i_{к51}(t)$ досягає уставки $I_{у\,пск}=3000\,A$ (ця величина отримана за картами уставок ШВ ТП, ПСК, ППС, які застосовуються на електрифікованих ділянках ДП «Придніпровська залізниця»);

– вимикання струму $i_{к51}(t)$ ПСК, результатом цього є $i_{к51}(t)=0$;

– ЕРС працює на точку КЗ, до повного загасання енергії накопичених в його силовому колі.

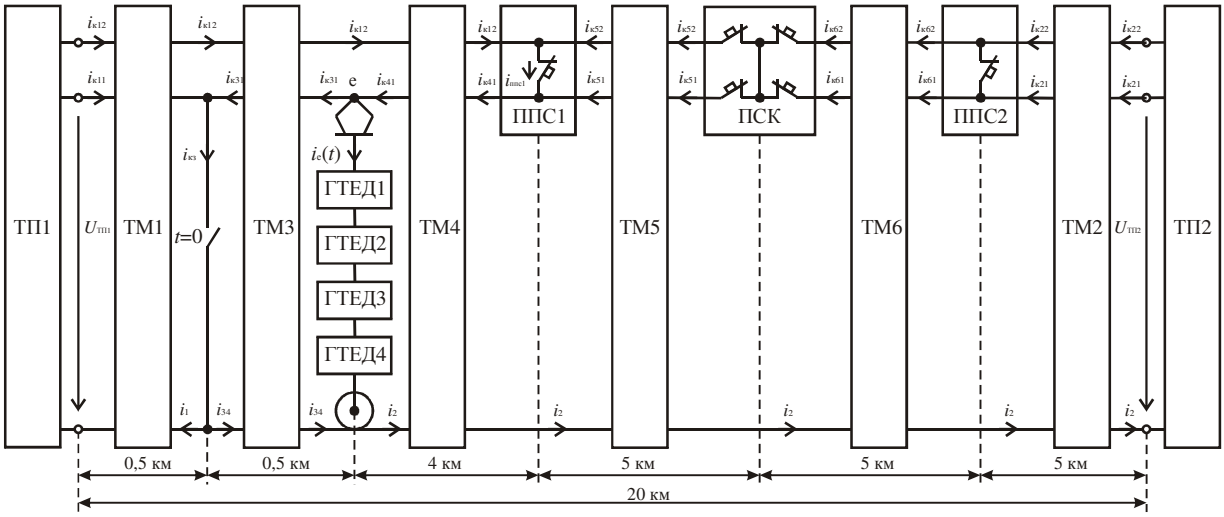


Рисунок 4.84 – Схема заміщення СЕТ в режимі КЗ в ТМ при її паралельній схемі секціонування

Як свідчать результати розрахунків попередніх двох режимів, характер зміни перехідних величин, а навіть часто і їх значення, однакові для всіх досліджених електровозів, тому проаналізуємо цей режим лише для ДЕ1. Насамперед треба зауважити, що цей режим схематично є «дзеркальним» відносно ТП і тому результати, які були отримані стосовно ТП2 (у попередньому режимі), повністю відповідають значенням перехідних величин стосовно ТП1 (розглядуваного режиму), тому зокрема маємо.

В момент КЗ досягаються уставки відповідних ШВ, вони спрацьовують і розривають аварійні струми (рис. 4.85): $i_{к11}(t)$, $i_{ппс1}(t)$, $i_{к41}(t)$, $i_{к31}(t)$ та $i_{к51}(t)$; характер зміни цих струмів і значення ті ж самі, що й на рис. 4.78. напруга на ТП1 змінюється за рис. 4.80, а на ТП2 – за рис. 4.79, струм $i_1(t)$ ТП1 такий же як на рис. 4.78, кр. 2, а $i_2(t)$ - рис. 4.81, кр. 1, характер зміни протие.р.с. і $u_e(t)$, а, отже генераторного струм відповідає рис. 4.82.

З позицій величини потенціалу рейки у перехідному режимі цікавим є значення струму у рейці (рис. 4.85): його тривалість в доданій області, в основному, зосереджена в інтервалі 0-0,07 с з $I_{max} \approx 2500\,A$ з наступним переходом до від'ємних значень ~-100 А.

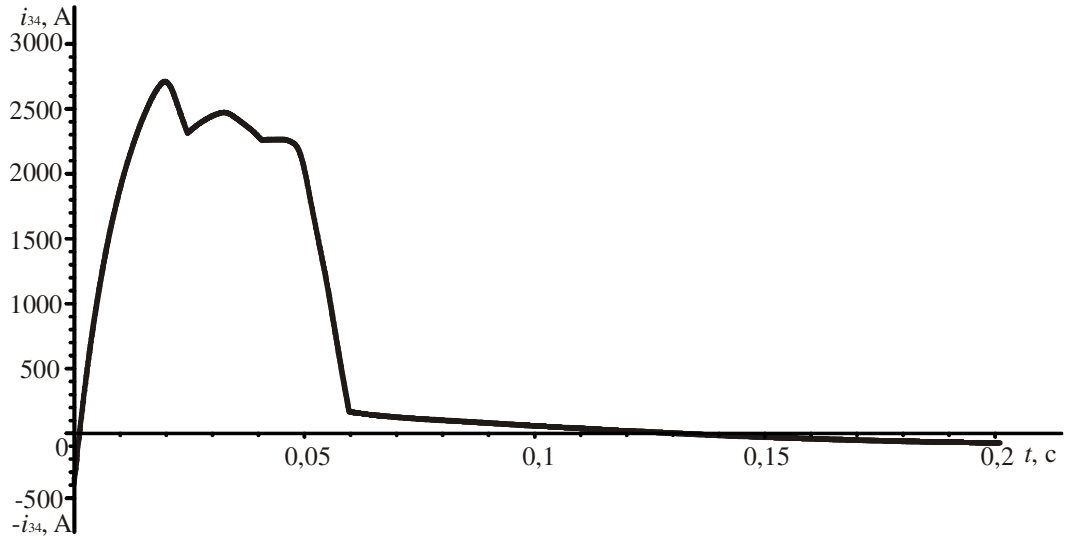


Рисунок 4.85 – Часова залежність зміни струму рейки від точки КЗ до електровоза

4.6. Перехідні електромагнітні процеси в аварійних режимах короткого замикання в силових тягових колах електровозів

Режим КЗ у силових тягових колах власне ЕРС закономірно є складовими аварійних нестаціонарних режимів у СЕТ постійного струму. Розрізняють режими внутрішнього та зовнішнього КЗ [38, 253]. Треба зазначити, що існує велика кількість наукових публікацій, в яких викладені результати досліджень режимів КЗ в силових колах різних типів електровозів виробництва НЕВЗа бувшого СРСР, зокрема це в збірнику наукових праць ВЕЛНДІ «Электровозостроение». Однак в цих роботах досліджували, по-перше, режим КЗ лише в окремому ТЕД, і, по-друге, без врахування СТЕП. Розвитком таких праць на Україні є робота [46], в якій вивчено внутрішнє і зовнішнє КЗ в тягових колах першого українського електровоза ДЕ1 при «П»-з'єднанні ТЕД. Однак і в цій роботі розглядався електровоз автономно, без врахування СТЕП. На нашу думку, нема потреби зайвий раз підкреслювати, що електромагнітні, особливо аварійні, процеси необхідно обов'язково досліджувати у всій СЕТ, враховуючи взаємний вплив підсистем СТЕП і ЕРС.

4.6.1 Особливості математичного моделювання

При зовнішньому КЗ, наприклад у випадку перекидання дуги з щіткотримача найближчого до струмоприймача ТЕД на землю, зростання струму визначається тільки параметрами ТМ та живлячих ТП і швидкість його зростання досягає 600…800 А/мс [254], а усталене значення струму досягає 20000…30000 А. В таких випадках захист забезпечується ШВ ЕРС, які реагують безпосередньо на струм КЗ, як тільки він досягає уставки, і розриває кола між струмоприймачем і ТЕД. При цьому на ЕРС залишається незахищеною тільки невелика частина кола, яка складається з стумоприймача і самого ШВ. У випадку КЗ на цій ділянці спрацьовує захист ТП.

При внутрішньому КЗ, наприклад у випадку колового вогню на колекторах ТЕД в послідовному колі чи при перекиданні дуги на землю в колі між якорями ТЕД струм зростає повільніше, ніж при повному КЗ, і може навіть не досягти уставки ШВ. Характер ППр в цьому випадку і надійність роботи захисту значно залежить від взаємного розташування якорів і ОЗ ТЕД в послідовному колі. Особливо це стосується послідовного з’єднання ТЕД, для якого уставка ШВ має найбільшу кратність по відношенню до струму навантаження. Більш досконалий захист від неповних КЗ здійснюється за допомогою диференційних реле, уставки яких визначаються струмом небалансу (таблиця Д.1, додатку Д), що відповідають різниці струмів двох котушок увімкнених зі сторони високого і низького потенціалів силового кола ЕРС. Це дозволяє забезпечувати захист силового кола при будь-якому чергуванні якорів і ОЗ ТЕД, а також в усьому можливому діапазоні навантажень. Реле не реагує безпосередньо на виникнення кругового вогня по колектору ТЕД, але це завжди супроводжується перекидом дуги на корпус двигуна, що викликає спрацьовування реле.

Автоматичні ШВ на ЕРС застосовують для захисту обладнання силового кола від струмів КЗ, а також від колового вогню, що виникає на колекторі ТЕД, перекиданні дуги з струмоведучих частин на землю. Основною вимогою, яка висувається до ШВ, є найшвидше розірвання електричного кола, що

знаходиться під захистом цього ШВ, для уникнення динамічних та термічних пошкоджень елементів цього кола. Так, для уникнення колового вогню струм КЗ не може перевищувати 5…8 кратного значення струму двигуна при часовому режимі. При цьому тривалість струму вище граничного по комутації не повинна перевищувати 4…8 мс, а напруга на обмотці якоря не може бути більшою 2,5…3 кВ. [255].

Комутаційна здатність ШВ, як зазначалося вище, визначається, головним чином, розмірами та характеристиками дугогасної камери. Наприклад, вимикаюча здатність ШВ типу БВП-5 з врахуванням обмеження струму не перевищує 12…20 кА. Цей ШВ розроблений співробітника Тбіліського електровозобудівного заводу в 1961 р. на основі вимикача БВП-3А і дугогасної камери і котушки автоматичного вимикача АБ-2/4, які застосовуються на ТП [255, 256]. Цими автоматами обладнані електровози серій ВЛ8 (після 1961 р.), ВЛ10, ДЕ1 (перших випусків). Тому, моделюючи падіння напруги електричної дуги $u_{\text{Д}}(t)$ в дугогасній камері ШВ типу БВП-5, автор використовував рівняння (3.8). Уставки ШВ типу БВП-5 ЕРС постійного струму ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1, 2ЕЛ4 вказані в таблиці Д.1, додатку Д.

Вольт-амперна характеристика електричної дуги $u_{\text{дг}}(i_{\text{кз}})$ колового вогню по колектору ТЕД прийнята за рівнянням Герте-Айтона [257]:

$$u_{\text{дг}}\left(i_{\text{кз}}\right) = a' + b' l_{\text{щ}} + \frac{(c' + d' l_{\text{щ}})}{i_{\text{кз}}^{\text{n}}}, \qquad (4.71)$$

де $l_{\text{щ}}$ – довжина дуги: відстань між сусідніми щітками (таблиця Д.2 додатку Д); a', b', c', d', n – постійні, що залежать від матеріалу щіток та колекторних пластин і умов, в яких існує дуга. Для щіток марки ЕГ-61А [226, 227] та колекторної міді М 1, що застосовується для ТЕД, для дуги, що горить у повітрі між мідними електродами [257, 258], зазначені постійні склали: $a' = 19{,}24$ В; $b' = 31{,}6$ В/см; $c' = 15{,}85$ ВА; $d' = 28$ ВА/см; $n = 1$. Графічна залежність ВАХ при різних довжинах l' наведена в роботі [46].

4.6.2 Режим внутрішнього короткого замикання

У подальшому в цій роботі дослідимо режим внутрішнього КЗ в силовому колі електровоза ДЕ1, на «СП»-з'єднанні ТЕД, у режимі повного збудження ТЕД. Ділянка, на якій працює електровоз – двоколійна, вузлова схема живлення. Вважаємо, що закорочується якір ТЕД №1 з причини виникнення колового вогню на колекторі. Електричну дугу, що виникає при цьому, врахуємо за вольт-амперною характеристикою (4.71). Розрахункова схема заміщення міжпідстанційної ділянки зі схемою заміщення ЕРС представлена на рис. 4.86, а математична модель всієї системи

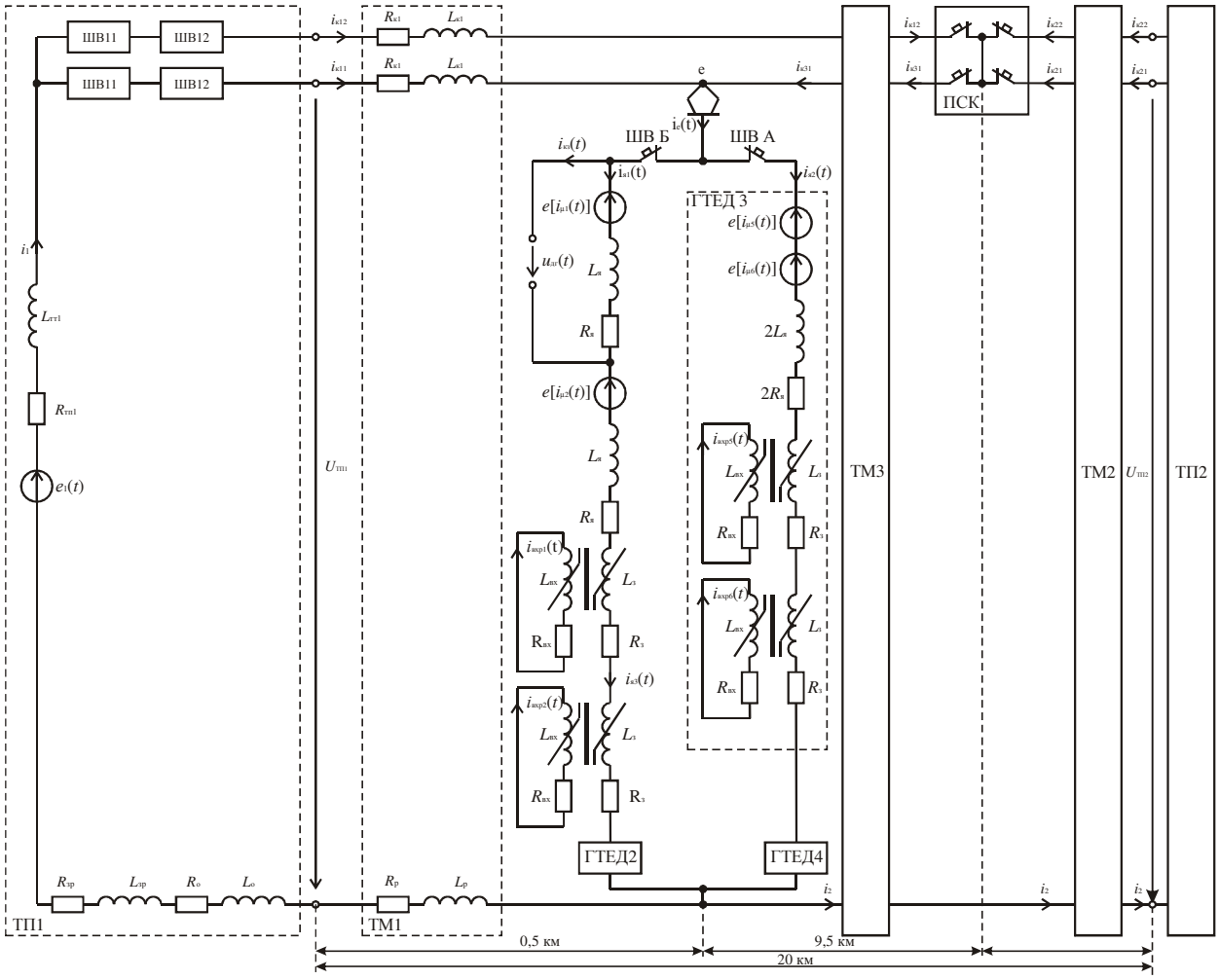


Рисунок 4.86 – Схема двоколійної ділянки системи електричної тяги в режимі внутрішнього КЗ в ТЕД №1 (наприклад, для восьмивісних електровозів)

формулюється рівняннями:

$$\left(R_{т1}+R_{пс1}+R_{зр1}+R_{р1}+R_{о1}\right)\cdot i_1+\left(L_{т1}+L_{зр1}+L_{о1}\right)\frac{di_1}{dt}+R_{іш1\text{-}1}\cdot i_{іш1\text{-}1}+L_{іш1\text{-}1}\frac{di_{іш1\text{-}1}}{dt}+$$
$$+R_{іш1\text{-}2}\cdot i_{іш1\text{-}2}+L_{іш1\text{-}2}\frac{di_{іш1\text{-}2}}{dt}+R_{к1}\cdot i_{к11}+L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}+u_{дг}(i_{кз})+$$
$$+\left(3R_{я}+4\left(R_{з}+R_{дп}+R_{ко}\right)\right)\cdot i_{я3}+3L_{я}\frac{di_{я3}}{dt}+2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right)=$$
$$=e_{пс1}(t)-C_{w}\omega\left(\Phi_2+\ldots+\Phi_4\right); \qquad (4.72)$$

$$\left(R_{т2}+R_{пс2}+R_{зр2}+R_{р2}+R_{о2}+R_{р3}\right)\cdot i_2+\left(L_{т2}+L_{зр2}+L_{о2}\right)\frac{di_2}{dt}+R_{іш2\text{-}1}\cdot i_{іш2\text{-}1}+$$
$$+L_{іш2\text{-}1}\frac{di_{іш2\text{-}1}}{dt}+R_{іш2\text{-}2}\cdot i_{іш2\text{-}2}+L_{іш2\text{-}2}\frac{di_{іш2\text{-}2}}{dt}+R_{к2}\cdot i_{к21}+L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}+$$
$$+u_{дг}(i_{кз})+\left(3R_{я}+4\left(R_{з}+R_{дп}+R_{ко}\right)\right)\cdot i_{я3}+3L_{я}\frac{di_{я3}}{dt}+2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right)=$$
$$=e_{пс2}(t)-C_{w}\omega\left(\Phi_2+\ldots+\Phi_4\right); \qquad (4.73)$$

$$\left(R_{к1}+R_{к3}\right)\cdot i_{к12}+\left(L_{к1}+L_{к3}\right)\frac{di_{к12}}{dt}+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}-R_{к1}\cdot i_{к11}-L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}=0; \qquad (4.74)$$

$$-R_{я}\cdot i_{я1}-L_{я}\frac{di_{я1}}{dt}+u_{дг}(i_{кз})=C_{w}\omega\Phi_1; \qquad (4.75)$$

$$u_{дг}(i_{кз})+\left(3R_{я}+4\left(R_{з}+R_{дп}+R_{ко}\right)\right)\cdot i_{я3}+3L_{я}\frac{di_{я3}}{dt}+2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right)-$$
$$-4\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+R_{з}\right)\cdot i_{я2}-4L_{я}\frac{di_{я3}}{dt}-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_5+\ldots+\Phi_8\right)=$$
$$=C_{w}\omega\left(\left(\Phi_5+\ldots+\Phi_8\right)-\left(\Phi_2+\ldots+\Phi_4\right)\right); \qquad (4.76)$$

$$R_{к2}\cdot i_{к22}+L_{к2}\frac{di_{к22}}{dt}-R_{к2}\cdot i_{к21}-L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}=0; \qquad (4.77)$$

$$i_1-i_{к11}-i_{к12}=0; \qquad (4.78)$$

$$i_2-i_{к21}-i_{к22}=0; \qquad (4.79)$$

$$i_{я3}-i_{я1}-i_{кз}=0; \qquad (4.80)$$

$$i_{я3}+i_{я2}-i_2-i_1=0; \qquad (4.81)$$

$$i_{к22}+i_{к21}+i_{к12}-i_{к31}=0. \qquad (4.82)$$

Розглядувану систему (4.72)-(4.82) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53), а також рівняннями електромагнітних процесів в ЕРС (4.11)-(4.13).

Результати чисельних розрахунків моделі приведені на рис. 4.87-4.94; проаналізуємо їх.

Як випливає із рис. 4.87, кр. 1, при КЗ тяговий струм $i_{я1}(t)$ закороченого якоря (рис. 4.86) миттєво, через 2,5 мс після початку КЗ, змінює свій знак на зворотній, тобто стає генераторним, і кидком, десь за 0,16-0,17 с, досягає дуже небезпечного значення 5600 А. Окрім цього, спостерігається і занадто висока, $18{,}5\cdot10^4$ А/с, швидкість зростання цього струму в початковий період перехідного процесу (до переходу через нуль), тривалість якого складає ~0,17 с. Великі значення $i_{я1}(t)$ та його похідної цілком закономірні, бо струм $i_{я1}(t)$ прямопропорційний різниці проти-е.р.с. $e_1(t)$ закороченого якоря та спаду напруги на дузі $u_{дг}(i_{кз})$ (рис. 4.87) і обернено пропорційний активному опору якоря $R_{я1}$. А як випливає із рис. 4.88, кр. 1, е.р.с. $e_1(t)$ досягає достатньо великого значення, 740 В, а опір $R_{я1}$ малий, рівний 0,026 Ом для «холодної» і 0,0347 Ом – «гарячої» обмотки якоря.

Хоча струм $i_{я1}(t)$ закороченого якоря і має знак обернений тяговому струму, але він, внаслідок особливостей силової схеми ДЕ1, не протікає через «свою» обмотку збудження. Тому ТЕД №1 не розмагнічується, а навіть навпаки, його магнітний потік $\Phi_1(t)$ зростає майже на 0,01 Вб (рис. 4.89, кр. 1), не дивлячись на демпферуючу дію вихрових струмів, які зростають до – 160 А з наступним спадом до нуля через 0,15 с після початку КЗ (рис. 4.90, кр. 1).

Струми в незакорочених якорях №5-8 майже не змінюються, а в якорях № 2-4 зростають, але незначно (рис. 4.87, кр. 2 і 3). І тому, хоча $i_{я1}(t)$ і зростає до $\sim10\cdot I_{ном}$, однак струм всього електровоза не досягає уставки його ШВ (2500 А), кидком за 0,035 с збільшується лише до 1450 А (рис. 4.91), і тому ШВ електровоза не спрацьовує, і останній продовжує бути увімкненим до обох ТП. Зауважимо, що якраз ця обставина і обумовлює особливість режиму

КЗ, а, отже, і отриманих перехідних величин у порівнянні з існуючими роботами і, зокрема, з [46].

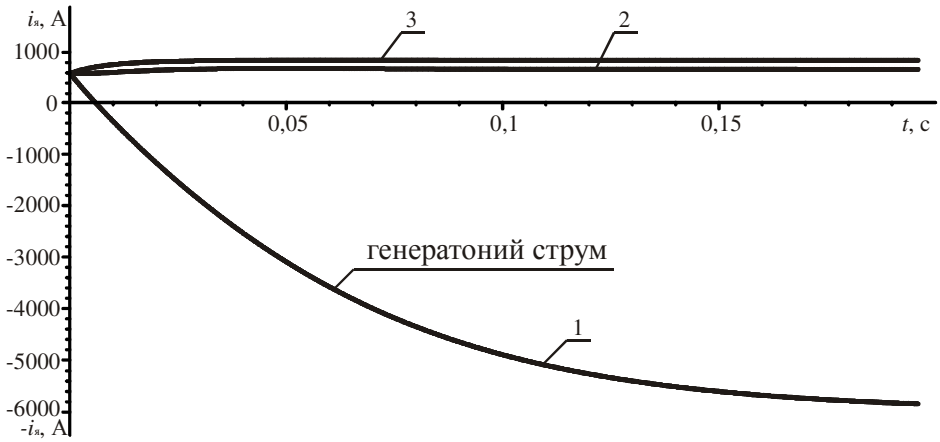


Рисунок 4.87 – Часові залежності зміни струмів якорів ТЕД в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС: 1 – $i_{я1}(t)$; 2 – $i_{я2}(t)$; 3 – $i_{я3}(t)$

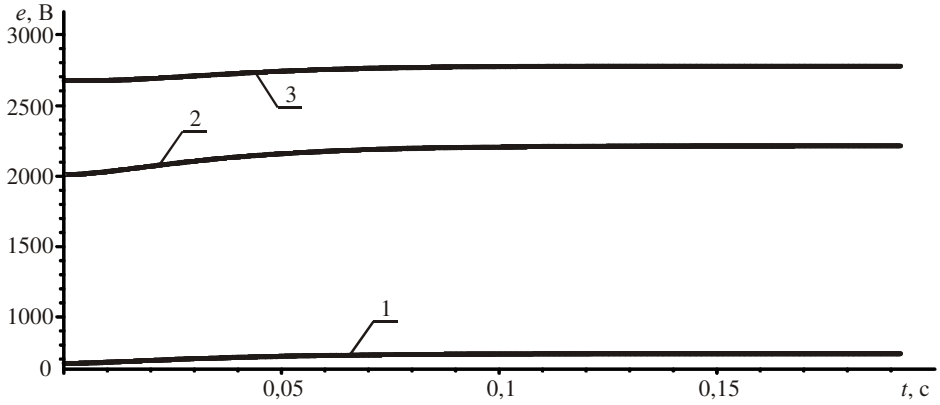


Рисунок 4.88 – Часові залежності зміни проти-е.р.с. якорів ТЕД в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС: 1 – $e_1(t)$; 2 – $e_2(t), e_3(t), e_4(t)$; 3 – $e_5(t), e_6(t), e_7(t), e_8(t)$

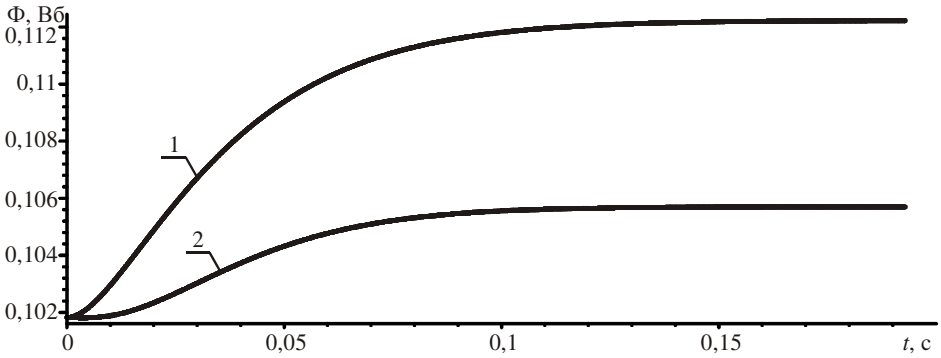


Рисунок 4.89– Часові залежності зміни магнітних потоків відповідних ТЕД в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС:1 – $\Phi_1(t), \Phi_2(t), \Phi_3(t), \Phi_4(t)$; 2 – $\Phi_5(t), \Phi_6(t), \Phi_7(t), \Phi_8(t)$

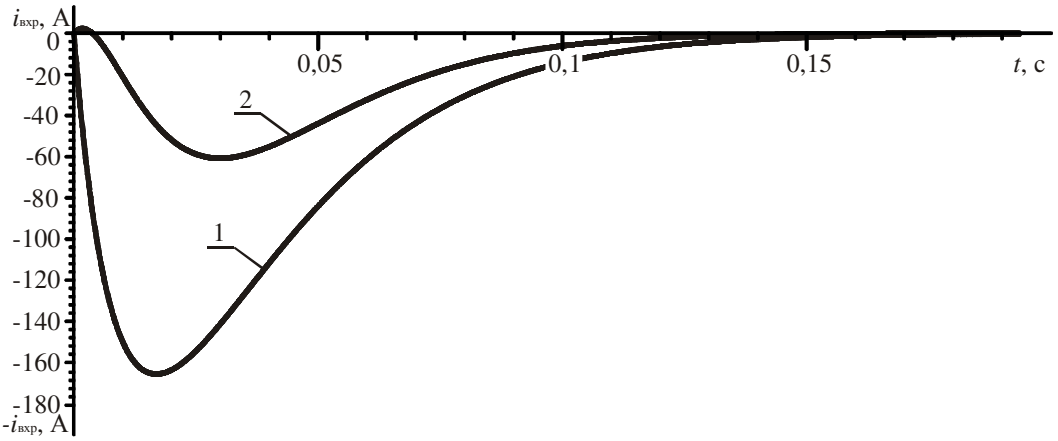


Рисунок 4.90 – Часові залежності зміни вихрових струмів остова ТЕД в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС: 1 – $i_{вхр1}(t), i_{вхр2}(t), i_{вхр3}(t), i_{вхр4}(t)$; 2 – $i_{вхр5}(t), i_{вхр6}(t), i_{вхр7}(t), i_{вхр8}(t)$

Напруги на ТП1 і ТП2, як і на струмоприймачі (рис. 4.92), в момент КЗ різко зменшуються, а потім експоненціально досягають нових усталених значень. Найбільш нестаціонарно змінюється напруга $u_1(t)$, тобто першої ТП, яка розташована найближче, на відстані 0,5 км, від ЕРС, в якому відбулося КЗ. Такий характер зміни напруг на тягових підстанціях обумовлює також різке, кидком, зростання фідерних і підстанційних струмів (рис. 4.93), однак до безпечних значень.

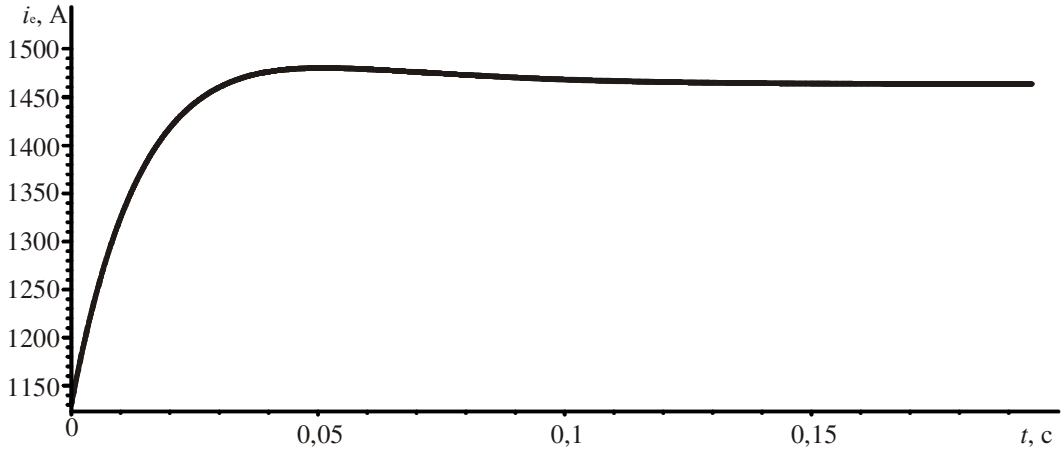


Рисунок 4.91 – Часова залежність зміни струму ЕРС в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС

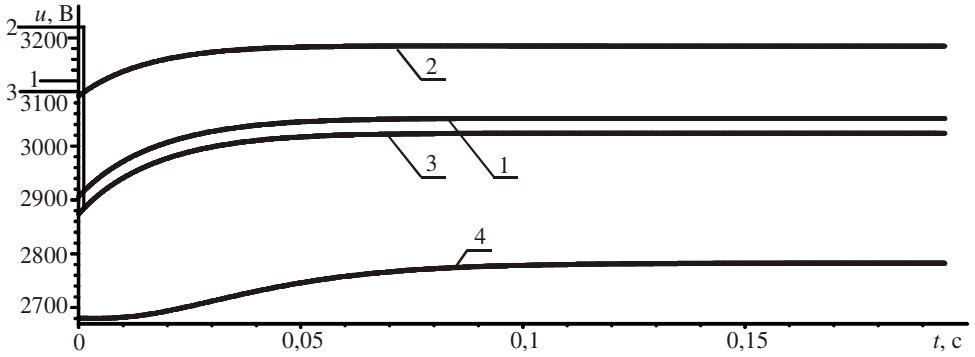


Рисунок 4.92 – Часові залежності зміни напруг фідерів ТП1 і ТП2 ЕРС, а також проти-е.р.с. одного ТЕД в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС: 1 – $u_1(t)$; 2 – $u_2(t)$; 3 – $u_e(t)$; 4 – $e_5(t), e_6(t), e_7(t), e_8(t)$

В результаті сумісної дії обох ТП і проти-е.р.с. закороченого якоря струм $i_{кз}$ у вітці – «закоротці» кидком, за 0,12 с, досягає великого значення, рівня 6300 А (рис. 4.94).

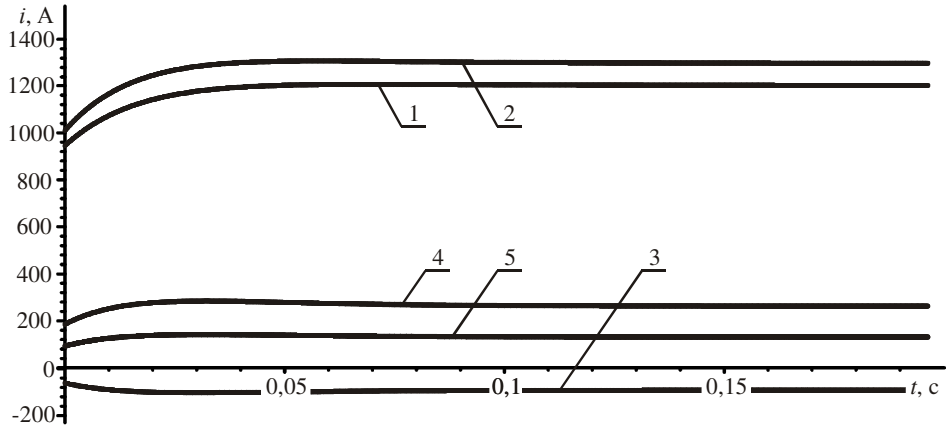


Рисунок 4.93 – Часові залежності зміни фідерних струмів ТП1 і ТП2 в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС: 1 – $i_1(t)$; 2 – $i_{к11}(t)$; 3 – $i_{к12}(t)$; 4 – $i_2(t)$; 5 – $i_{к21}(t), i_{к22}(t)$

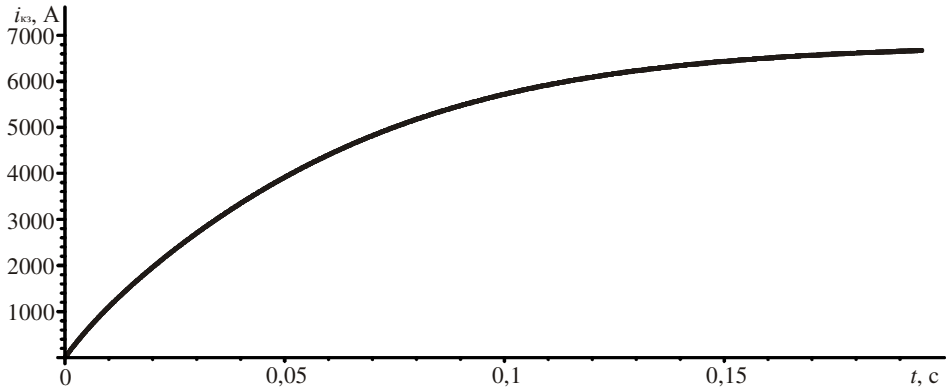


Рисунок 4.94 – Часова залежність зміни струму КЗ в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС

Отже, внутрішнє КЗ в силових колах ЕРС, у випадку якщо дуга не перекинеться на корпус ТЕД, є занадто небезпечним для якоря ТЕД, що закорочується, і ніяких неприємностей не створює для елементів СТЕП.

На основі схеми заміщення внутрішнього КЗ, представленій на рис. 4.86, і відповідній їй системі диференціальних рівнянь (4.38)-(4.48), проаналізуємо вплив послаблення збудження ТЕД на електромагнітний стан в СЕТ.

Коловий вогонь по колектору, шунтуючи якір ТЕД1, призводить до кидка за 0,04 с як струму $i_{я1}$ цього якоря від 565 А до 970 А (на ПЗ), так і всього електровозу $i_е$ до 1450 А (рис. 4.95, кр.1).

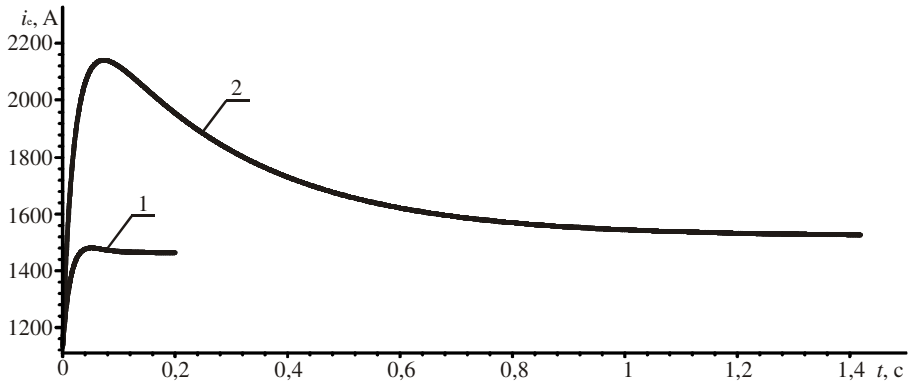


Рисунок 4.95 – Часові залежності зміни струмів електровозу в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС: 1 – ПП; 2 – ПЗ4

Дія послаблення збудження, зокрема розглядуваного тут ПЗ-4, проявляється подвійно. По-перше, виникнення паралельної до ОЗ вітки шунтування зменшує загальний опір силового кола ТЕД й тим самим впливає на значення перехідних струмів $i_{я1}$ і $i_е$. Тому у режимі КЗ ці струми кидком зростають до значень: перший – до 1260 А, а струм електровоза $i_е$ - до 2150 А (рис. 4.95, кр. 2), але все ж $i_е$ не досягає уставки і ШВ електровоза не вимикається. Другим фактором впливу ПЗ-4 на режим КЗ є те, що закон зміни струму збудження, внаслідок появи паралельного струму в шунті, визначає закон зменшення $\Phi(t)$ (після його зменшення від 0,102 до 0,06 Вб). Тобто, на відміну від режиму ПП, коли характер зміни $\Phi(t)$ лише демпферується вихровими струмами, на ПЗ-4 потік визначається і вихровими струмами з

$I_{\max\ вх} = 960\ A$, і параметрами контура «ОЗ - шунтувальна вітка». Зрозуміло, що $\Phi(t)$ шляхом наростання проти-е.р.с. ТЕД1 до 780 В впливає на основні перехідні величини в ЕРС і в СТЕП, що й проаналізуємо у подальшому.

Характер зміни напруг на струмоприймачі $U_{\text{е}}$ і на обох ТП (U_1, U_2), як на ПП, так і на ПЗ-4 однаковий: в момент КЗ вони кидком зменшуються відповідно до 2600, 2660 і 2950 В, а потім експоненціально зростають до нових усталених значень (рис. 4.96, кр. 2). Струми обох ТП в момент КЗ зростають кидком, найбільше значення якого – 1850 А, характерно для $i_1(t)$, тобто ТП, що розташована найближче (0,5 км) до ЕРС (рис. 4.97, кр. 3). Максимальні значення струмів інших фідерів не перевищують 300 А.

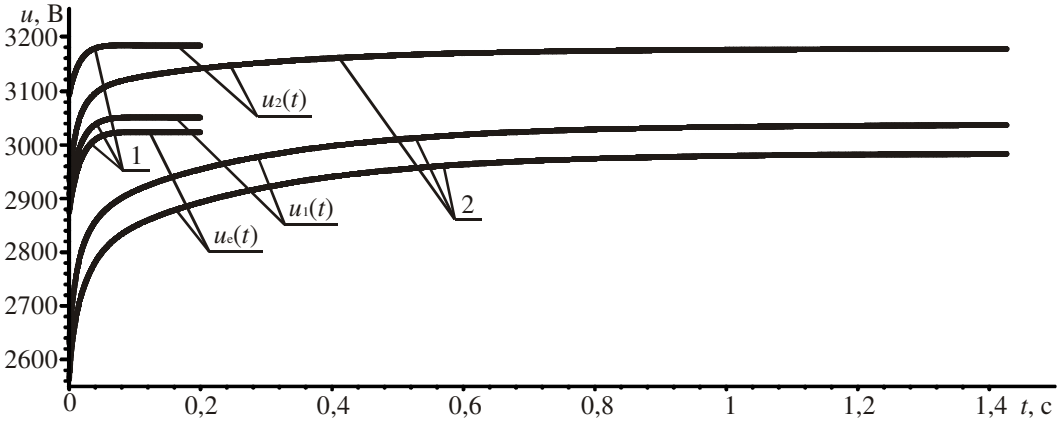


Рисунок 4.96 – Часові залежності зміни напруг фідерів ТП1, 2, а також напруги на струмоприймачі електровозу для умов рис. 4.95

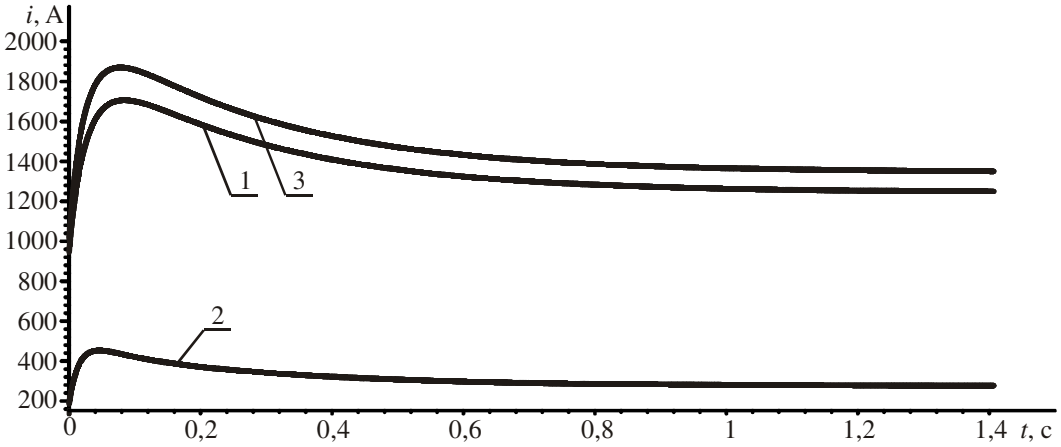


Рисунок 4.97 – Часові залежності зміни струмів ТП1 $i_1(t)$ (1), і ТП2, $i_2(t)$ (2), а також живлячого фідера ТП1 $i_{к11}(t)$ (3) в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС і послабленні збудження ПЗ4.

Із зазначеного вище можна зробити висновок, що у режимі ПЗ4 спостерігається значно більш нестаціонарний характер зміни всіх перехідних величин, але без досягнення струмами значень уставки. Виключення складає струм $i_{кз}$ в «закоротці» і для ПП і ПЗ4: він кидком зростає до 12080 А. Також для всіх режимів тривалість перехідного процесу КЗ складає 0,6…0,7 с.

Найбільш небезпечним за величиною струму в силовому тяговому колі ЕРС є «П»-з'єднання ТЕД, це пояснюється тим, що величина споживаного струму ЕРС кратна кількості паралельних віток.

З точки зору потенціального стану колектора цікавим є режим послаблення збудження. Тому далі розглянемо ці випадки.

Струм $i_5(t)$ (рис. 4.99) в закороченому якорі ТЕД5 під дією проти-е.р.с. $e_5(t)$ (рис. 4.98) отримує зворотний напрямок і внаслідок малого значення опору обмотки якоря ТЕД5 (і навіть протидії напруги на дузі) досягає дуже небезпечних значень при всіх ступенях збудження і особливо при ПЗ-3 і ПЗ-4 (28000 А). Одночасно, струм в ОЗ $i_{з5}(t)$ (закороченого) ТЕД5 різко зростає до 2100 А (рис. 4.100), однак магнітний потік $\Phi_5(t)$ (рис. 4.101) не встигає за таким збільшенням $i_{з5}(t)$.

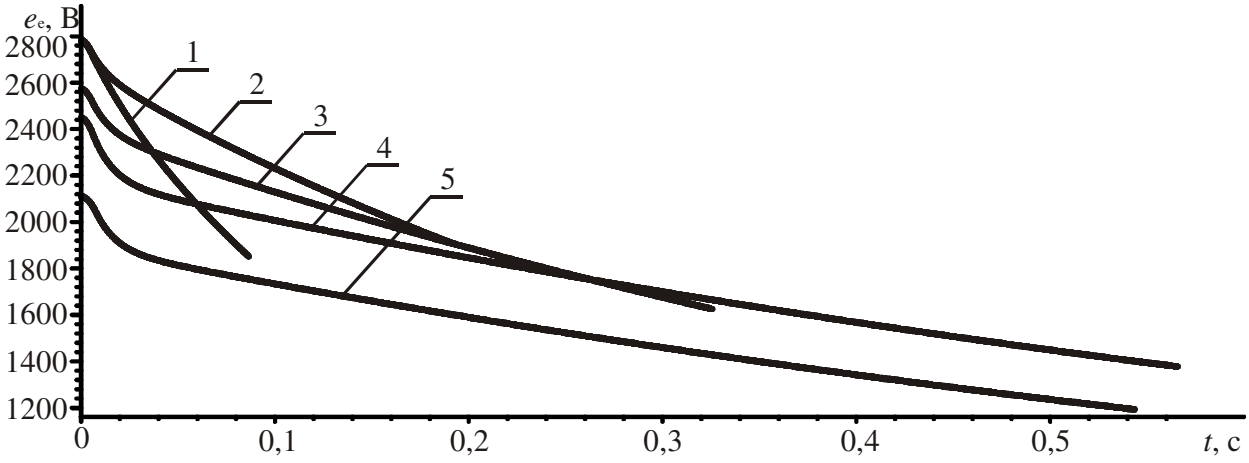


Рисунок 4.98 – Часові залежності зміни проти-е.р.с. закороченого ТЕД електровозу в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС: 1 – ПП; 2 – ПЗ-1; 3 – ПЗ-2; 4 – ПЗ-3; 5 – ПЗ-4

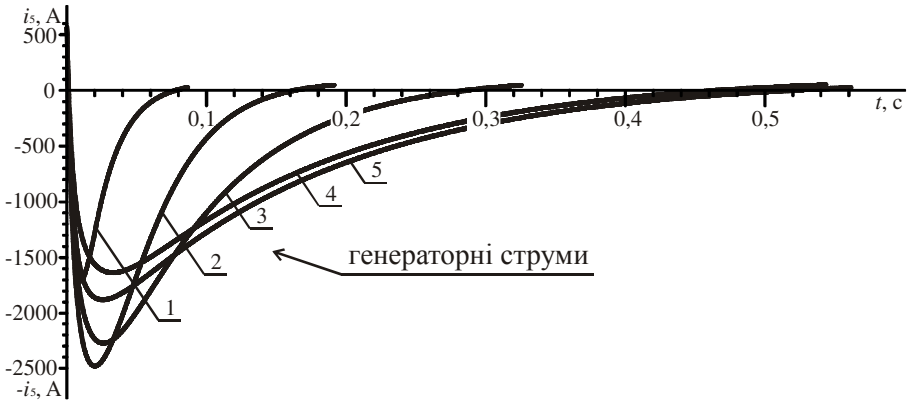


Рисунок 4.99 – Часові залежності зміни струму якоря закороченого ТЕД електровозу для умов рис. 4.98

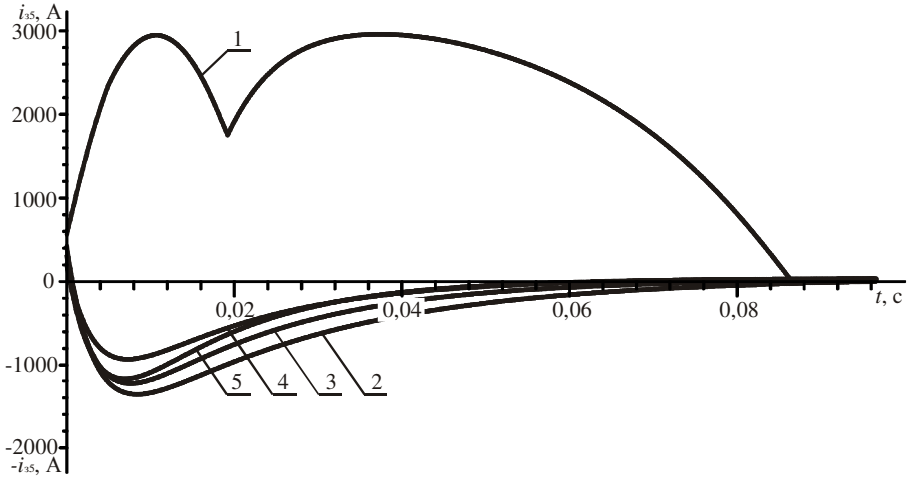


Рисунок 4.100 – Часові залежності зміни струму збудження закороченого ТЕД електровозу для умов рис. 4.98

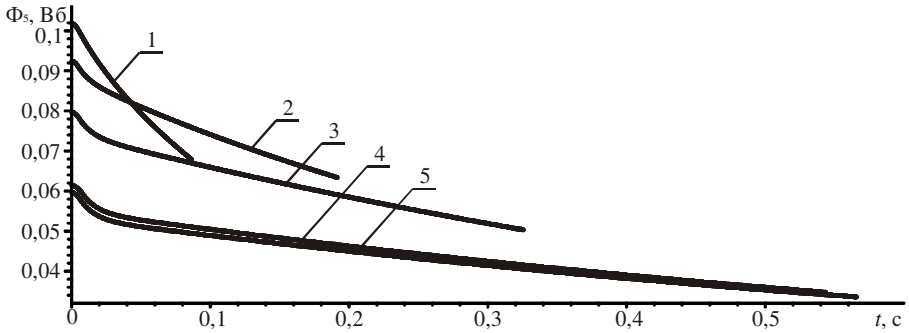


Рисунок 4.101 – Часові залежності зміни основного магнітного потоку закороченого ТЕД електровозу для умов рис. 4.98

Після кидка струм $i_{з5}(t)$ в ОЗ закороченого ТЕД5 на протязі 0,1 с зменшується до нуля і закономірно повільніше (за 0,5…0,1 с) знижується до нуля і $\Phi_5(t)$ (рис. 4.101), що призводить до такого ж експоненціального і за

терміном часу зменшення до нуля проти-е.р.с. $e_5(t)$ (рис. 4.98), що, у свою чергу, обумовлює таке ж спадання струму $i_5(t)$ в закороченому якорі (рис. 4.99) (створеного $e_5(t)$).

В якорі ТЕД1, що послідовно з'єднаний із закороченим якорем, струм не змінює знак, але його максимальне значення, 2100 А, хоча і менше $I_{\max 5}$ (рис. 4.103) однак достатньо велике у порівняні з $I_{\text{ном}} = 565\ A$ щоб вважати його небезпечним для нормальної роботи і цього ТЕД1.

Струм i_1 ТП1, що ближче розташована до ЕРС, кидком зростає до майже 2000 А, а потім також різко, за 0,01 с, зменшується до вирівнювального струму ~ 100 А (рис. 4.102). Таким же чином змінюється і струм $i_{к11}(t)$ першого фідера ТП1, але він встигає зрости до 2800 А. Дещо особливим є хід «поведінки» струмів ТП2 і її фідерів, зокрема $i_{к21}(t)$ і $i_{к22}(t)$, у тому, що через 0,02 с після початку КЗ вони змінюють знак на зворотній. Однак максимальні значення, і додатні, і від'ємні, цих струмів невеликі:

$$|I_{\max 2}| \le 880\ A, \quad |I_{\max 21}| = |I_{\max 22}| \le 440\ A.$$

Окрім цього, особливими у розглядуваних режимах є значні кидки напруг: на струмоприймачі до 2500 В (рис. 4.103), на ТП1 6400В (рис. 4.104) та на ТП2 – 5500 В (рис. 4.105). Імовірно, що це обумовлено накладанням на підстанційні значення напруг електрорушійної сили самоіндукції, яка виникає в тягових колах при «кидкових» змінах струмів в фідерах і силовому колі електровозу.

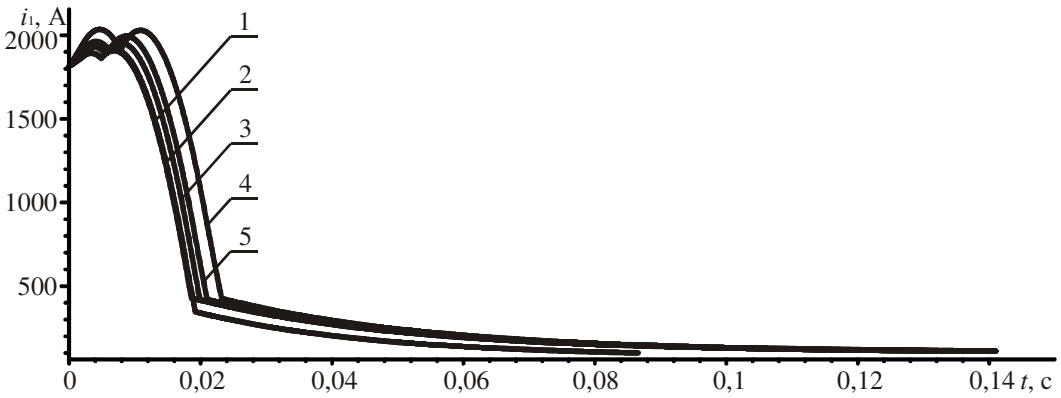


Рисунок 4.102 – Часові залежності зміни струму ТП1 для умов рис. 4.98

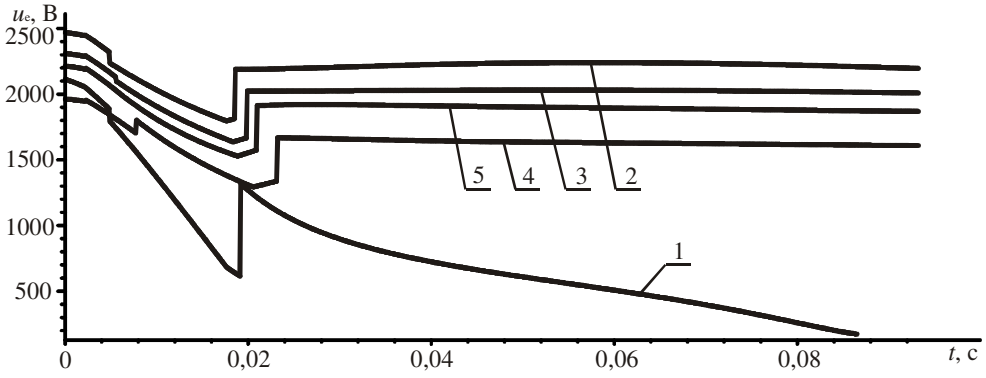


Рисунок 4.103 – Часові залежності напруги на струмоприймачі ЕРС для умов рис. 4.98

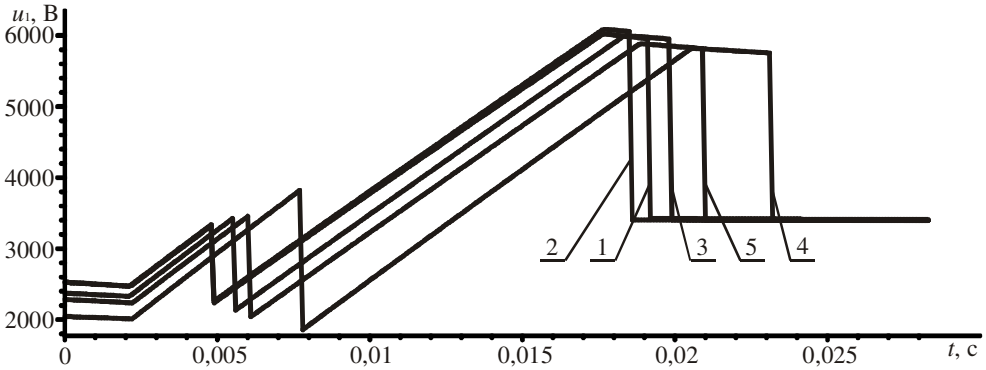


Рисунок 4.104 – Часові залежності напруги ТП1 для умов рис. 4.98

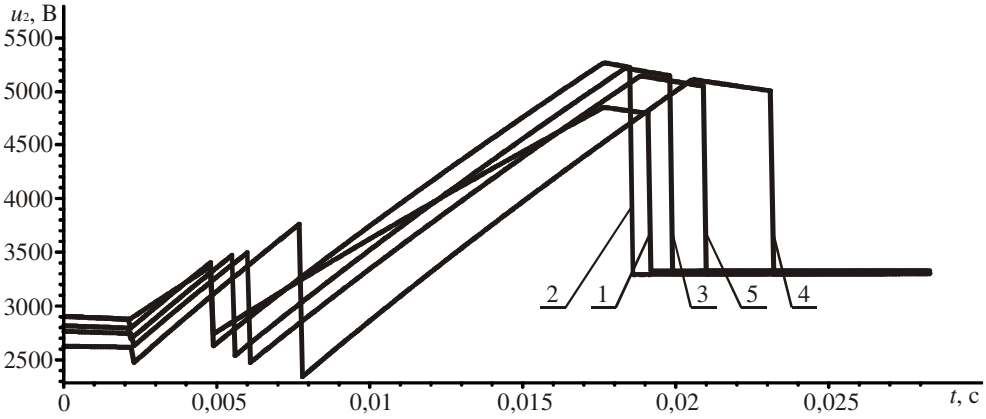


Рисунок 4.105 – Часові залежності напруги ТП2 для умов рис. 4.98

Безперечно, що неоднозначність зміни перехідних величин, що приведені на рис. 4.89-4.109 для режиму КЗ, в залежності від ступеня збудження ТЕД пояснюється впливом основного $\Phi(t)$, а він в режимах послаблення збудження, як уже зазначалось, визначається не лише демпферуючою дією вихрових струмів, але й струмом $i_{ш}(t)$ у вітці шунтування, характер часової зміни якого у закороченому ТЕД5 приведено на рис. 4.105.

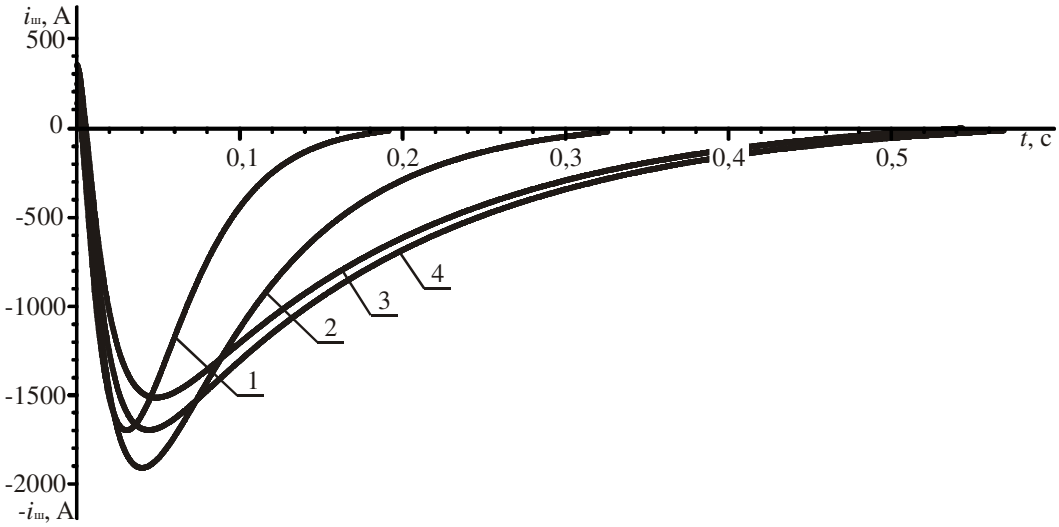


Рисунок 4.106 – Часові залежності зміни струму шунтуючої вітки закороченого ТЕД електровозу в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС: 1 – ПЗ-1; 2 – ПЗ-2; 3 – ПЗ-3; 4 – ПЗ-4

Узагальнюючи порівняльну характеристику режиму внутрішнього КЗ в досліджених електровозах при «С», «СП» та «П»- з'єднаннях ТЕД, навіть при повному збудженні, треба зауважити, що перехідні величини, які отримані при «П»-з'єднанні, внаслідок більшої напруги на двигуні (1500 В) і зменшення опору у вітці з двома ТЕД, суттєво відрізняються за характером зміни і максимальними значеннями від таких же величин у режимах «С» і «СП». Зазначене і є основною причиною того, що струм електровоза при «П»-з'єднанні різко, за термін 0,01 с, зростає до уставки ШВ 2500 А і останній вимикається, змушуючи струм i_e різко, за 0,013 с, зменшитись до нуля (рис. 4.107). Струм $i_2(t)$ ТП2 за характером на «П»-з'єднанні дещо інший (рис. 4.108): після вимикання ШВ електровоза в момент часу 0,02 с він кидком змінюється від 560 А до - 430 А, тобто змінює знак і потім експоненціально досягає нового, теж від'ємного, значення – 120 А. Після спрацьовування ШВ ЕРС кидки характерні і для фідерних струмів (рис. 4.109, 4.110), однак вони не досягають струму уставки.

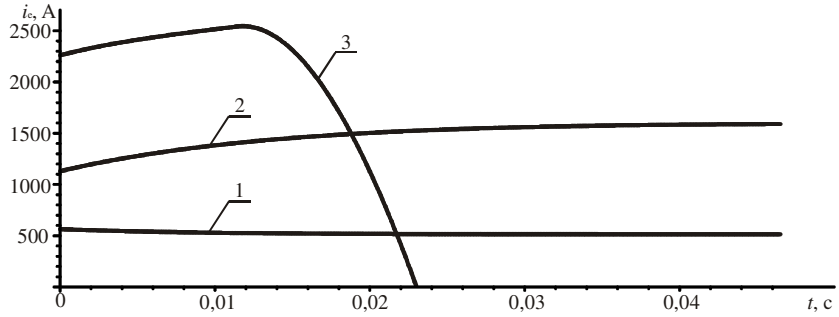


Рисунок 4.107 – Часові залежності зміни струму електровозу в режимі внутрішнього КЗ в ЕРС і різних схем з'єднання ТЕД: 1 – «С»-з'єднання; 2 – «СП»-з'єднання; 3 – «П»-з'єднання

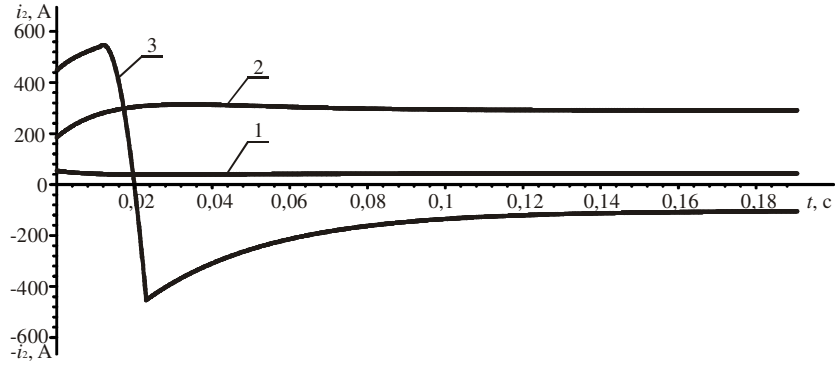


Рисунок 4.108 – Часові залежності зміни струму ТП2 для умов рис. 4.107

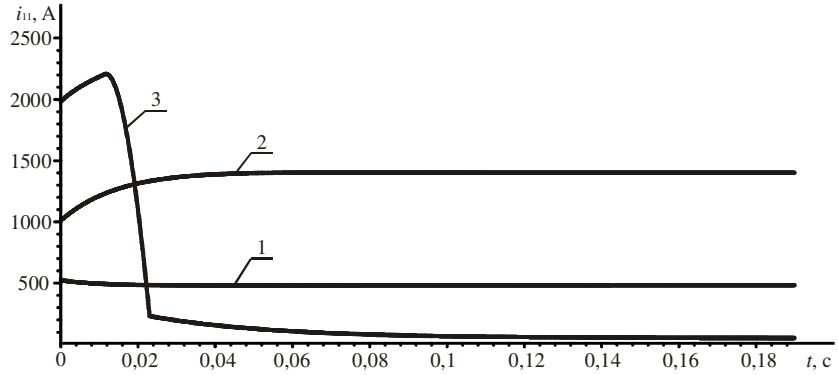


Рисунок 4.109 – Часові залежності зміни струму живлячого фідера ТП1 для умов рис. 4.107

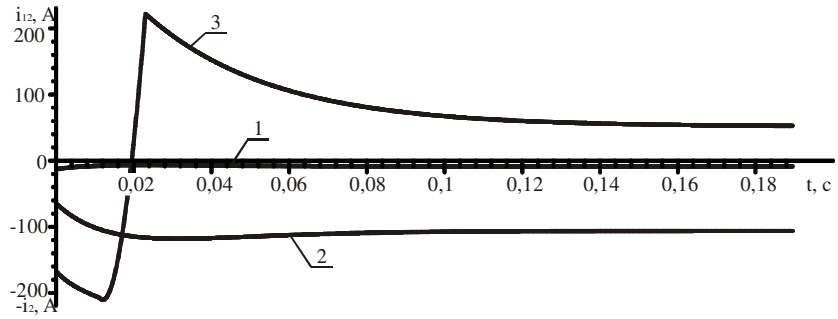


Рисунок 4.110 – Часові залежності зміни струму «сусіднього» фідера ТП1 для умов рис. 4.107

Насамкінець, звернемо увагу на занадто велике максимальне значення (27500 А) струму в «закоротці», а, отже, і в закороченому якорі в режимі «П»-з'єднання (рис. 4.115, кр. 3); після вимикання ШВ ЕРС цей струм за термін часу 0,3 с загасає до нуля.

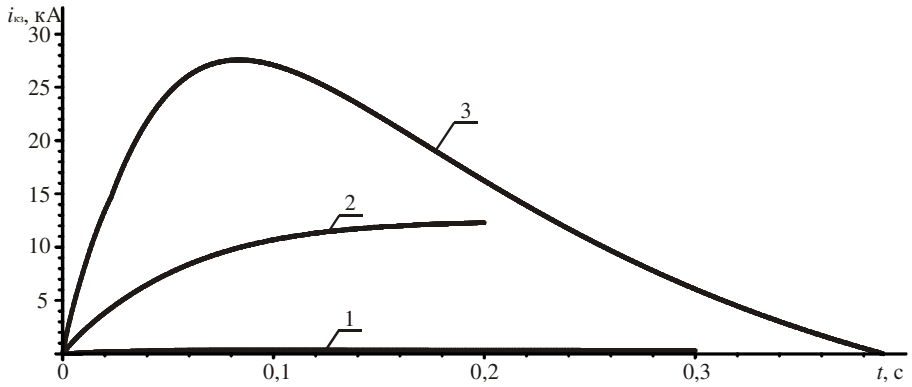


Рисунок 4.111 – Часові залежності зміни струму короткого замикання для умов рис. 4.107

Виконаємо оцінку різних початкових значень струму $I_{\text{поч}}$ на характер перебігу ППр в СЕТ. Як випливає із аналізу результатів розрахунків, значення початкового струму $I_{\text{поч}}$ не впливає ні на характер, ні на значення перехідних величин в аварійному режимі, спостерігається лише їх зміщення в область більших значень часу (рис. 4.112-4.116). Також для всіх значень $I_{\text{поч}}$ величина напруги на струмоприймачі перевищує сумарну проти-е.р.с. двигунів і тому генераторний режим двигунів не спостерігається (рис. 4.114).

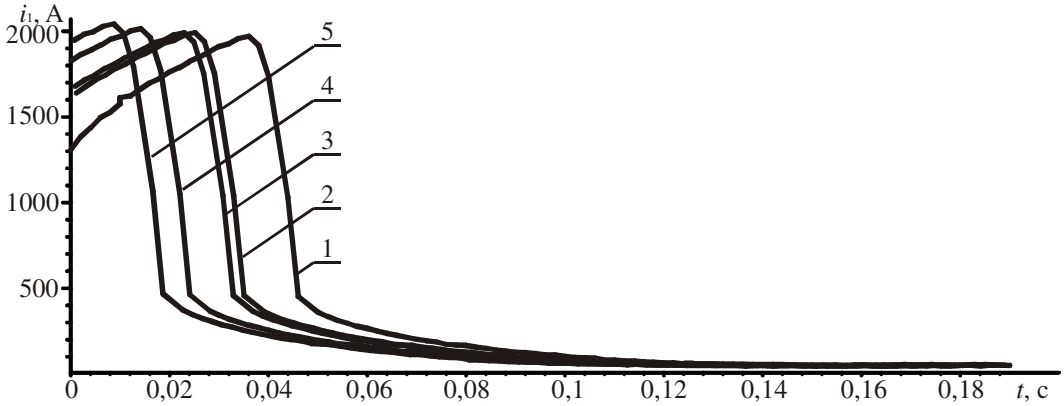


Рисунок 4.112 – Часові залежності зміни струму ТП1 при внутрішньому КЗ в одному з ТЕД ЕРС і різних початкових значеннях струму якоря $I_{\text{поч}}$ (А):

1 – 400; 2 – 500; 3 – 525; 4 – 565; 5 – 600

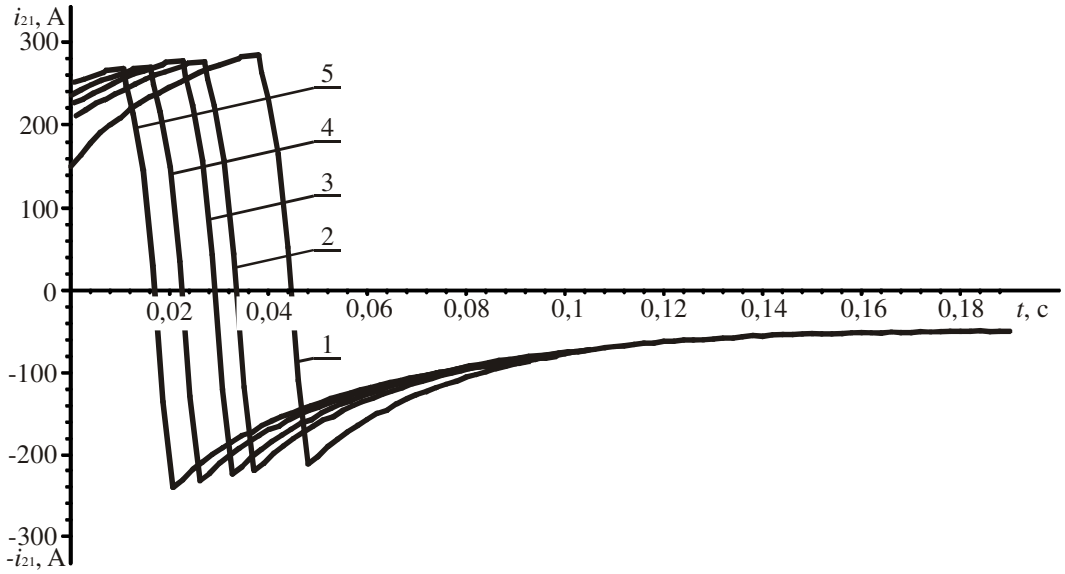


Рисунок 4.113 – Часові залежності зміни струму живлячого фідера ТП2 для умов рис. 4.112

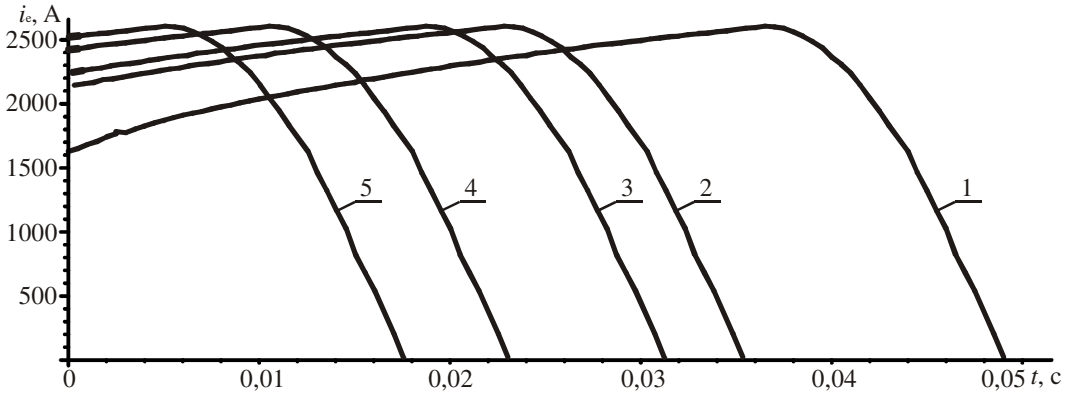


Рисунок 4.114 – Часові залежності зміни струму ЕРС для умов рис. 4.112

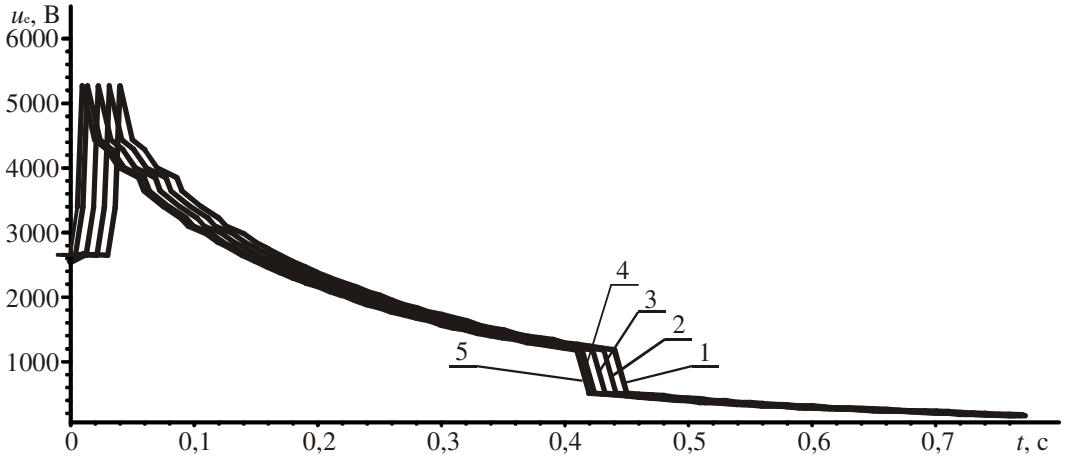


Рисунок 4.115 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі ЕРС для умов рис. 4.112

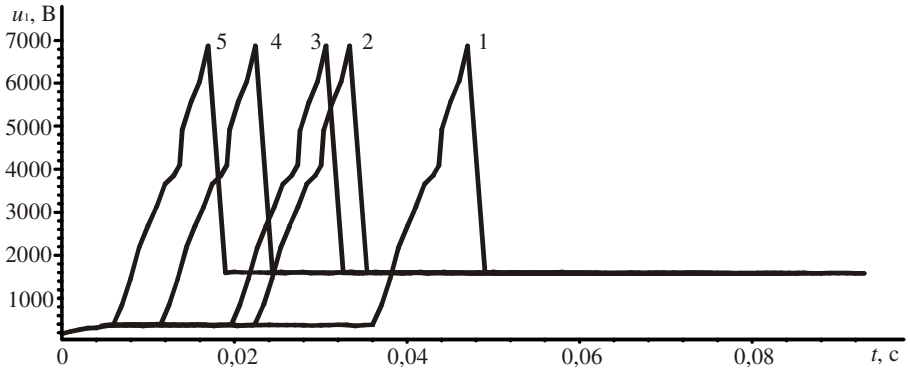


Рисунок 4.116 – Часові залежності зміни напруги на затискачах ТП1 для умов рис. 4.112

4.6.3 Режим зовнішнього короткого замикання в тяговому двигуні

Спочатку розглянемо перехідні величини для всіх електровозів (ДЕ1, 2ЕЛ4, ВЛ10, ВЛ8), для $I_{\text{поч}} = I_{\text{ном}}$, повного збудження, при розташуванні ЕРС на відстані 0,5 км від ТП1, тобто: $l_1 = 0{,}5\ км$, $l_2 = 10\ км$, $l_3 = 9{,}5\ км$ (за схемою рис. 4.117).

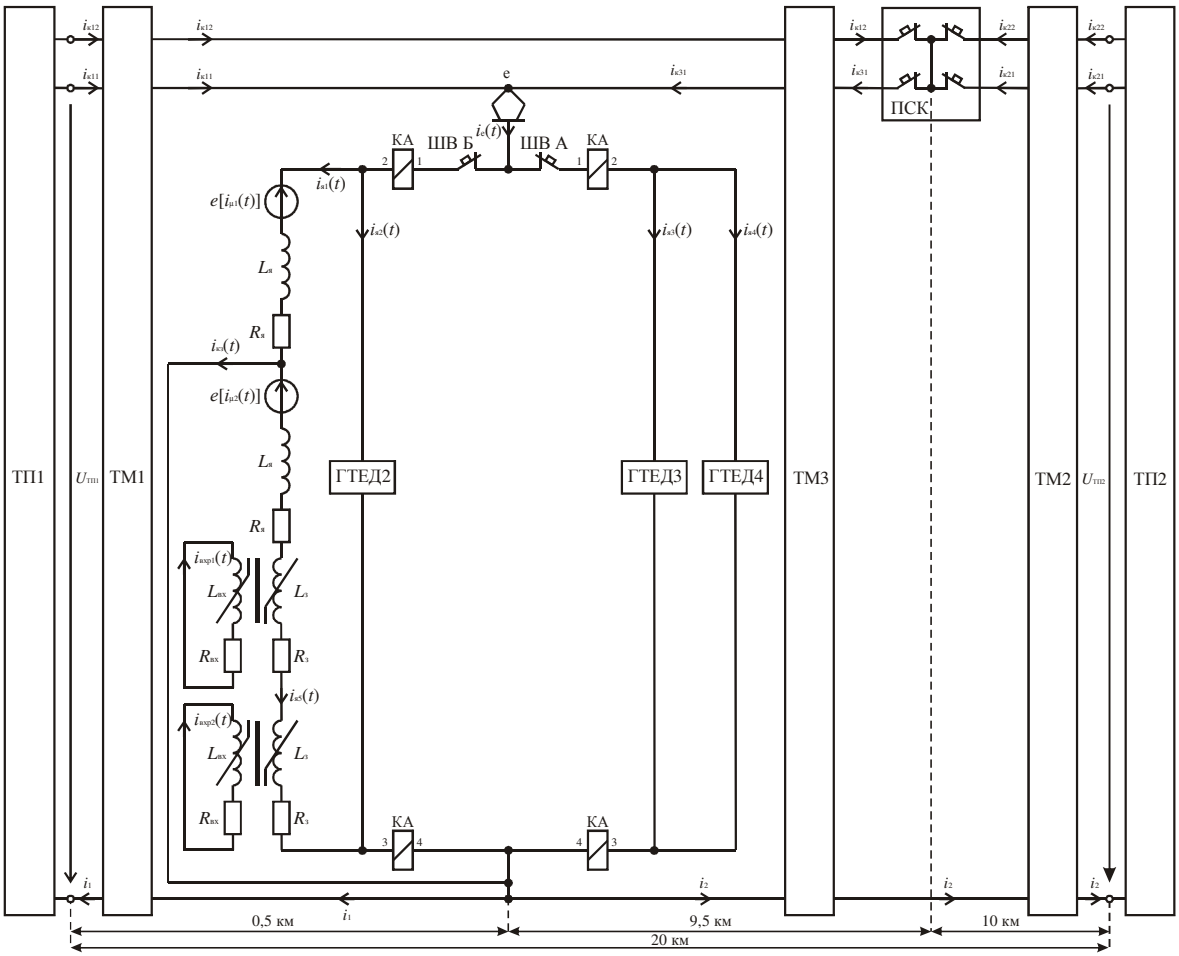


Рисунок 4.117 – Схема заміщення СЕТ в режимі зовнішнього КЗ ТЕД

Процеси в схемі заміщення рис. 4.117описуються системою рівнянь:

$$\left(R_{т1}+R_{пс1}+R_{зр1}+R_{р1}+R_{о1}\right)\cdot i_1+\left(L_{т1}+L_{зр1}+L_{о1}\right)\frac{di_1}{dt}+R_{ішl-1}\cdot i_{ішl-1}+L_{ішl-1}\frac{di_{ішl-1}}{dt}+$$

$$+R_{ішl-2}\cdot i_{ішl-2}+L_{ішl-2}\frac{di_{ішl-2}}{dt}+R_{к1}\cdot i_{к11}+L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}+\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}\right)\cdot i_{я1}+$$

$$+L_{я}\frac{di_{я1}}{dt}=e_{пс1}(t)-C_{w}\omega\Phi_1; \qquad (4.83)$$

$$\left(R_{к1}+R_{к3}\right)\cdot i_{к12}+\left(L_{к1}+L_{к3}\right)\frac{di_{к12}}{dt}+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}-R_{к1}\cdot i_{к11}-L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}=0; \qquad (4.84)$$

$$-\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+2R_{з}\right)\cdot i_{я5}-L_{я}\frac{di_{я5}}{dt}-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\Phi_2\right)=C_{w}\omega\Phi_2; \qquad (4.85)$$

$$\left(R_{т2}+R_{пс2}+R_{зр2}+R_{р2}+R_{о2}+R_{р3}\right)\cdot i_2+\left(L_{т2}+L_{зр2}+L_{о2}\right)\frac{di_2}{dt}+R_{ішl2-1}\cdot i_{ішl2-1}+$$

$$+L_{ішl2-1}\frac{di_{ішl2-1}}{dt}+R_{ішl2-2}\cdot i_{ішl2-2}+L_{ішl2-2}\frac{di_{ішl2-2}}{dt}+R_{к2}\cdot i_{к21}+L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}+R_{к3}\cdot i_{к31}+$$

$$+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}+\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}\right)\cdot i_{я1}+L_{я}\frac{di_{я1}}{dt}=e_{пс2}(t)-C_{w}\omega\Phi_1; \qquad (4.86)$$

$$\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}\right)\cdot i_{я1}+L_{я}\frac{di_{я1}}{dt}-4\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+R_{з}\right)\cdot i_{я2}-4L_{я}\frac{di_{я2}}{dt}-$$

$$-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_3+\Phi_4\right)=C_{w}\omega\left(\Phi_3+\Phi_4-\Phi_1\right); \qquad (4.87)$$

$$\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}\right)\cdot i_{я1}+L_{я}\frac{di_{я1}}{dt}-4\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+R_{з}\right)\cdot i_{я3}-4L_{я}\frac{di_{я3}}{dt}-$$

$$-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_5+\Phi_6\right)=C_{w}\omega\left(\Phi_5+\Phi_6-\Phi_1\right); \qquad (4.88)$$

$$\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}\right)\cdot i_{я1}+L_{я}\frac{di_{я1}}{dt}-4\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+R_{з}\right)\cdot i_{я4}-4L_{я}\frac{di_{я4}}{dt}-$$

$$-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_7+\Phi_8\right)=C_{w}\omega\left(\Phi_7+\Phi_8-\Phi_1\right); \qquad (4.89)$$

$$R_{к2}\cdot i_{к22}+L_{к2}\frac{di_{к22}}{dt}-R_{к2}\cdot i_{к21}-L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}=0; \qquad (4.90)$$

$$i_1-i_{к11}-i_{к12}=0; \qquad (4.91)$$

$$i_2-i_{к21}-i_{к22}=0; \qquad (4.92)$$

$$i_{я1}-i_{я5}-i_{кз}=0; \qquad (4.93)$$

$$i_{я1}+i_{я2}+i_{я3}+i_{я4}-i_2-i_1=0; \qquad (4.94)$$

$$i_{к22}+i_{к21}+i_{к12}-i_{к31}=0. \qquad (4.95)$$

Систему (4.83)-(4.95) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53), а також рівняннями електромагнітних процесів в ЕРС (4.11)-(4.13).

Проаналізуємо результати розрахунків моделі за перші 0,01 с після початку КЗ, як першого етапу цього режиму.

Як випливає із рис. 4.117, тяговий двигун №1 (що послідовно з'єднаний з закороченим ТЕД №2) працює в небезпечному режимі, оскільки знаходиться під повною напругою ТМ. Цим і обумовлено різке зростання струму $i_{я1}(t)$ цього ТЕД: в електровозах ДЕ1 і 2ЕЛ4 за 2…2,5 мс до уставки 1900 А і вище; в електровозі ВЛ10 уставка 3100 А не досягається (рис. 4.118).

На схемі рис. 4.117 обмотки диференційного реле КА12 увімкненні зі сторони високого потенціалу, а КА34 – зі сторони низького потенціалу.

Зовсім інакше змінюється струм $i_{я5}(t)$ в закороченому ТЕД №5. Протие.р.с. його якоря та е.р.с. самоіндукції ($\frac{d\psi_я + d\psi_з}{dt}$) обумовлюють зміну напрямку цього струму (рис. 4.119), який кидком за перші 0,01 с зростає до 1900, а в електровозі 2ЕЛ4 і найменше в ВЛ8 – до 200 А. Сума різко зростаючих струмів $i_{я1}(t)$ і $i_{я5}(t)$ (рис. 4.117) обумовлює кидки струму $i_{кз}$ в «закоротці», який досягає 5000 А в 2ЕЛ4, 4600 А – в ДЕ1 і лише 2200 А – в ВЛ8.

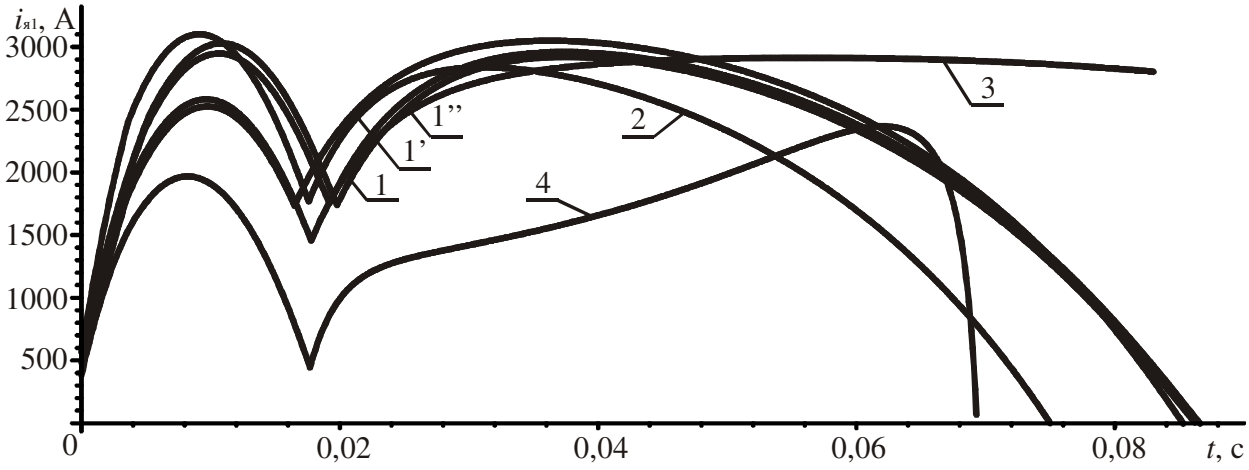


Рисунок 4.118 – Часові залежності струму якоря у паралельній вітці з КЗ для різних електровозів: 1 – ДЕ1 $I_я = I_{ном}$; 1' – ДЕ1 $I_я = 600\ A$; 1'' – ДЕ1 $I_я = 400\ A$; 2 – 2ЕЛ4 $I_я = I_{ном}$; 3 – ВЛ10 $I_я = I_{ном}$; 4 – ВЛ8 $I_я = I_{ном}$

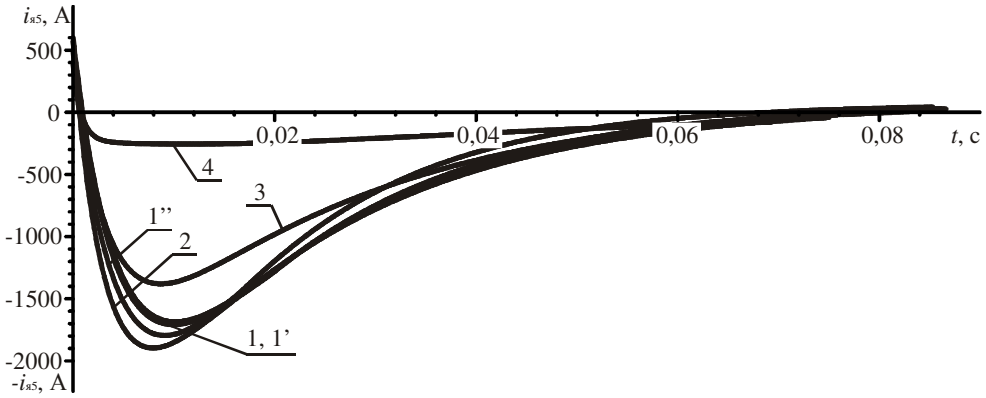


Рисунок 4.119 – Часові залежності струму якоря закороченого двигуна разом з ОЗ для умов рис. 4.118

У цей перший період після КЗ струми інших ТЕД теж змінюють свій знак на зворотний і починають живити своїми проти-е.р.с. ТЕД №1 (рис. 4.121). Фідерні і підстанційні струми у перші 0,01 с зростають з однаковою швидкістю для всіх електровозів. Однак, що зрозуміло (бо ЕРС знаходиться на $l_1 = 0{,}5\ км$ від ТП1), до найбільших значень збільшуються струми ТП1 (рис. 4.121 і 4.122). Все ж вони не досягають уставки і тому ШВ ТП1 не вимикається.

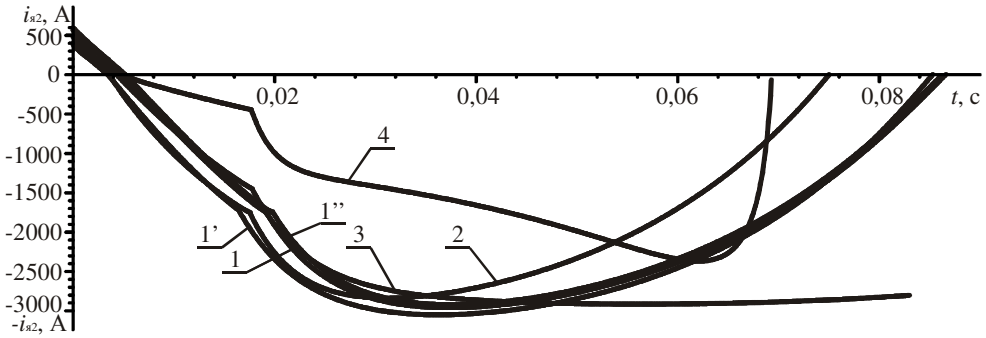


Рисунок 4.120 – Часові залежності струму якоря ГТЕД2 для умов рис. 4.118

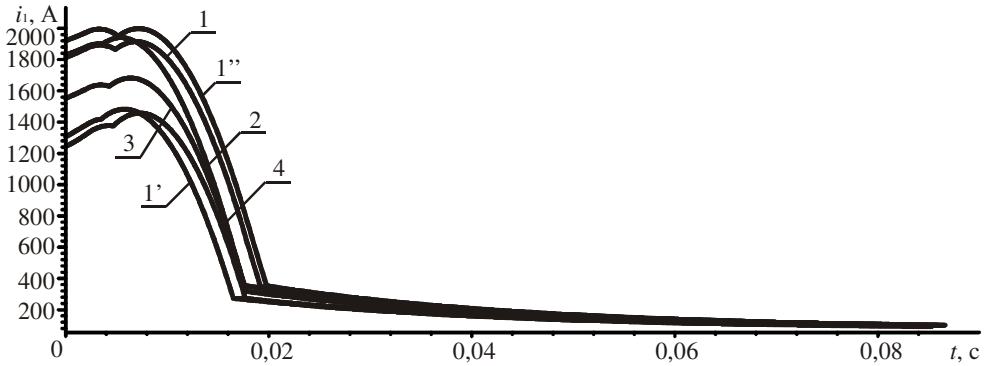


Рисунок 4.121 – Часові залежності струму ТП1 для умов рис. 4.118

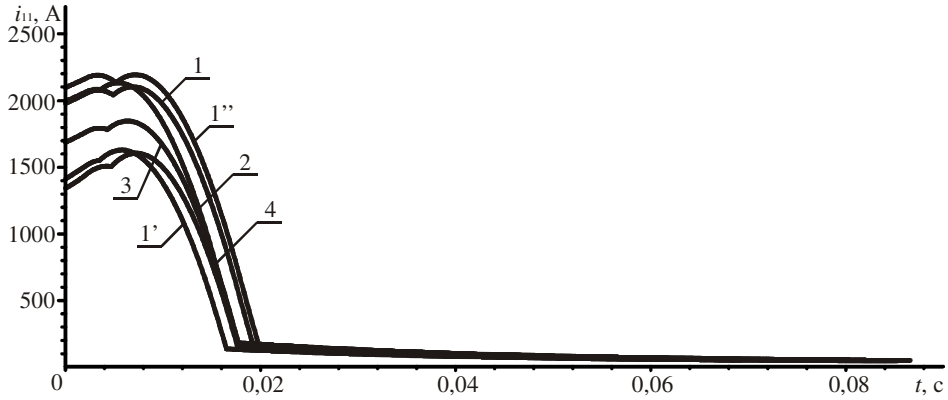


Рисунок 4.122 – Часові залежності струму живлячого фідера ТП1 для умов рис. 4.118

В напругах U_1 і U_2 ТП спостерігаються різкі коливання (з кидками до 6000 В і 4800 В), але які за усталеним значенням не перевищують $U_{\text{ном}}$ (рис. 4.123 і 4.124), що встановлюється після 0,02 с (рис. 4.118-4.120).

Подальше зростання струмів в усіх ТЕД окрім ТЕД №1 призводить до досягання уставки струму електровоза, ШВ останнього вимикається і вітки з ТЕД різко (за 0,07…0,084 с) знеструмлюються. Виключення складає електровоз ВЛ10, уставка ШВ якого 3100 А не досягається (рис. 4.118 і 4.120, кр. 4) і його ШВ не спрацьовує.

Окрім цього, «особливим» є контур з закороченим ТЕД-№5. Зворотний характер струму $i_{\text{я}5}(t)$ цього ТЕД розмагнічує магнітну систему двигуна, в результаті магнітний потік експоненціально спадає, а разом з ним зменшується і проти-е.р.с. якоря двигуна, що призводить також до експоненціального зменшення, за термін 0,08 с, струму $i_{\text{я}5}(t)$ до нуля (рис. 4.119).

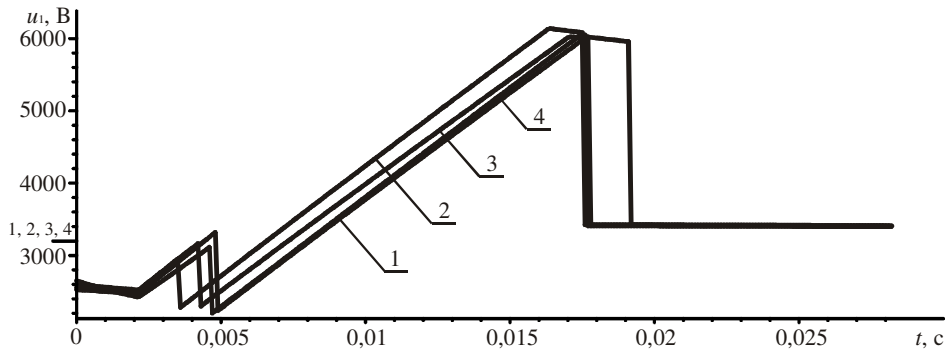


Рисунок 4.123 – Часові залежності напруги на затискачах ТП1 для умов рис. 4.118

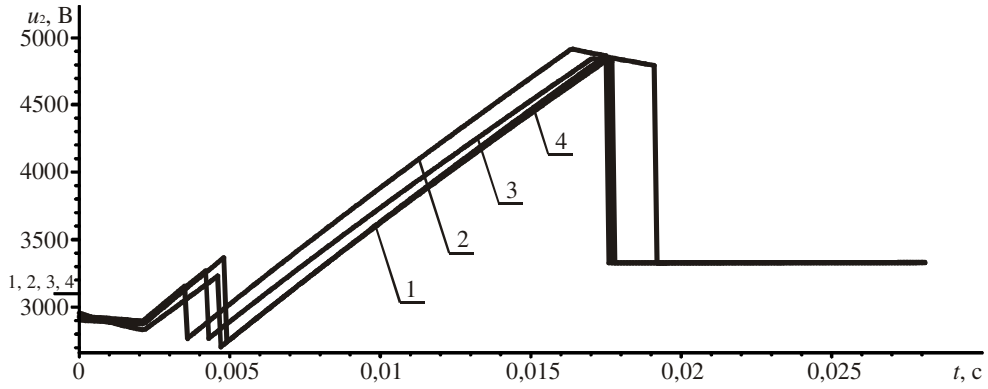


Рисунок 4.124 – Часові залежності напруги на затискачах ТП2 для умов рис. 4.118

Також зменшуються до зрівняльного, ~100 А, значення фідерного і підстанційного струмів (наприклад, для ТП1, рис. 4.121 і 4.122).

Вплив початкового усталеного значення струму ТЕД $I_{\text{поч}}$ досліджено лише для електровоза ДЕ1 для значень 400, 500, 520, 565 та 600 А. Найбільш загальний висновок полягає у тому, що зі збільшенням $I_{\text{поч}}$ характер перехідних величин не змінюється або змінюється мало, а їх абсолютні максимальні значення зростають.

Струм $i_{\text{я}1}(t)$ ТЕД №1 (що послідовно з'єднаний з закороченим) при $I_{\text{поч}} = 400$ А має максимальне значення 2500 А, а при 600 А – 3000 А (рис. 4.118 кр. 1, 1', 1"). Струм $i_{\text{я}5}(t)$ закороченого ТЕД не змінюється в усьому діапазоні $I_{\text{поч}} = 400...600$ А (рис. 4.119, кр. 1). Це ж саме характерно і для інших двигунів (рис. 4.120, кр. 1), а також напруги на струмоприймачі, яка спадає до нуля після вимикання ШВ (рис. 4.125). Струм всього електровоза підвищується при збільшенні $I_{\text{поч}}$ як за амплітудою, так і за терміном часу вимикання ШВ електровоза (рис. 4.126).

Вплив початкового усталеного значення струму тягового двигуна $I_{\text{поч}}$ на «підстанційні» і «тяговомережеві» процеси полягає лише у збільшенні максимальних значень відповідних перехідних величин при збільшенні $I_{\text{поч}}$ (рис. 4.121-4.126).

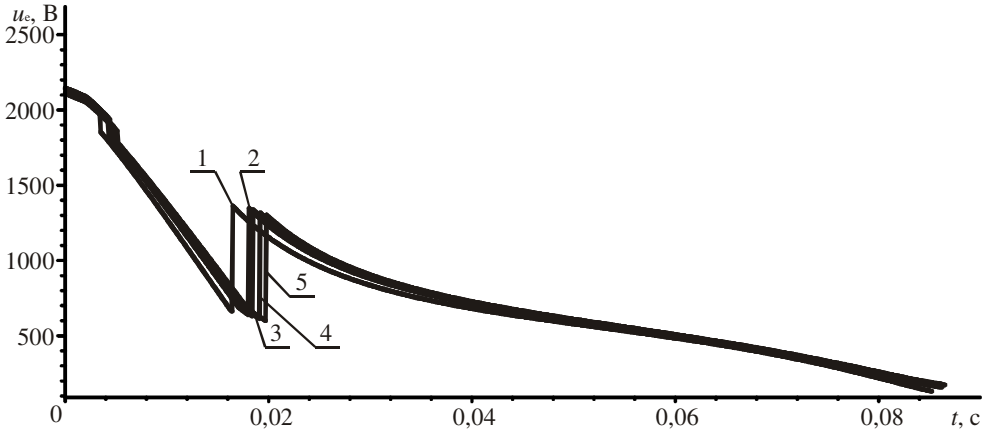


Рисунок 4.125 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі ЕРС для різних значень початкового струму якоря $I_{\text{поч}}$ (А): 1 – 400; 2 – 500; 3 – 525; 4 – 565; 5 – 600

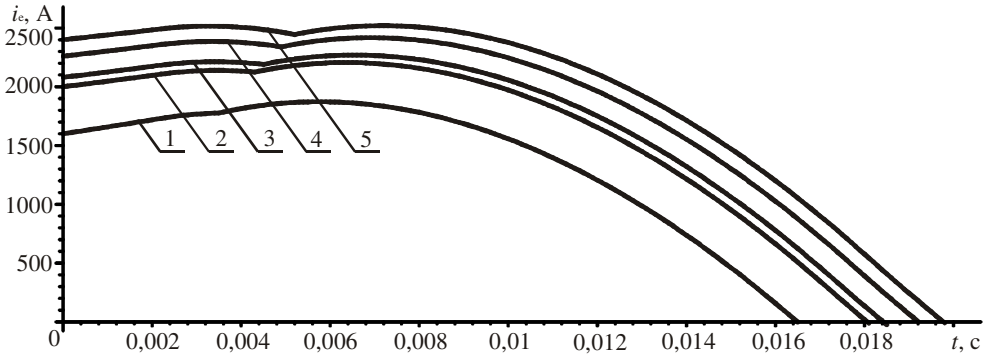


Рисунок 4.126 – Часові залежності зміни струму ЕРС для умов рис 4.125

Вплив послаблення збудження також досліджено лише для ТЕД електровозу ДЕ1 при $I_{\text{поч}} = I_{\text{ном}} = 565\ A$. Наявність вітки шунтування ОЗ тягових машин зменшує загальний опір тягового кола електровоза й тим самим впливає на значення струмів віток ТЕД. Крім цього, вітка з індуктивним шунтом обумовлює перерозподіл струмів у вітці шунтування $i_{\text{ш}}$ (рис. 4.127) і в ОЗ $i_{\text{з}}$ (рис. 4.128). Струм $i_{\text{з}}(t)$ та вихрові струми $i_{\text{вхр}}$ (рис. 4.129) визначають закон зміни потоку $\Phi(t)$, а останній обумовлює характер зміни проти-е.р.с. двигунів, а, отже, і всіх перехідних величин, зокрема: ступінь послаблення збудження ТЕД №1 (що послідовно з'єднаний з закороченим) (рис. 4.117) майже не впливає на амплітуду струму $i_{\text{я1}}(t)$, але обумовлює різну тривалість часу перехідного процесу до вимикання ШВ електровоза, точніше збільшен-

ня цього часу (рис. 4.130) : при ПП вона становить 0,082 с, при ПЗ-1-0,19 с, ПЗ-2-0,33 с і ПЗ-3 та ПЗ-4-0,54 с.

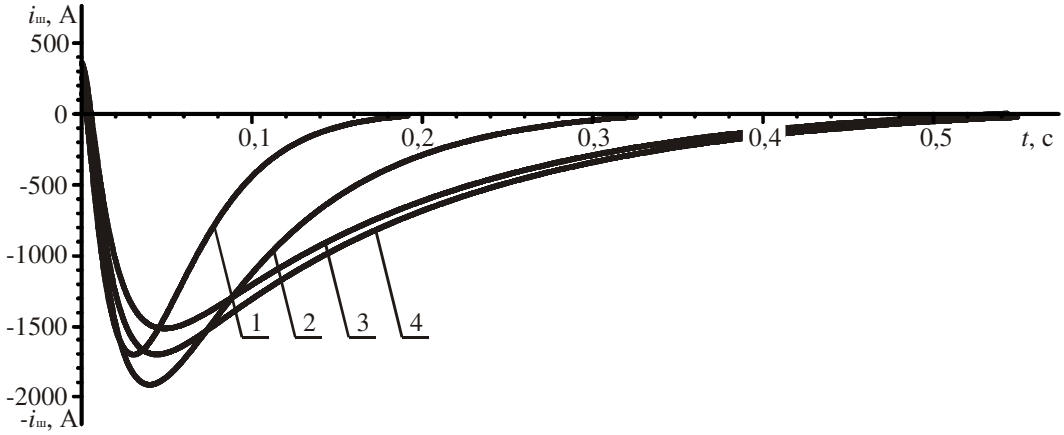


Рисунок 4.127 – Часові залежності зміни струму шунтуючої вітки в тяговому колі ЕРС для різних ступенів ПЗ: 1 – ПЗ-1; 2 – ПЗ-2; 3 – ПЗ-3; 4 – ПЗ-4

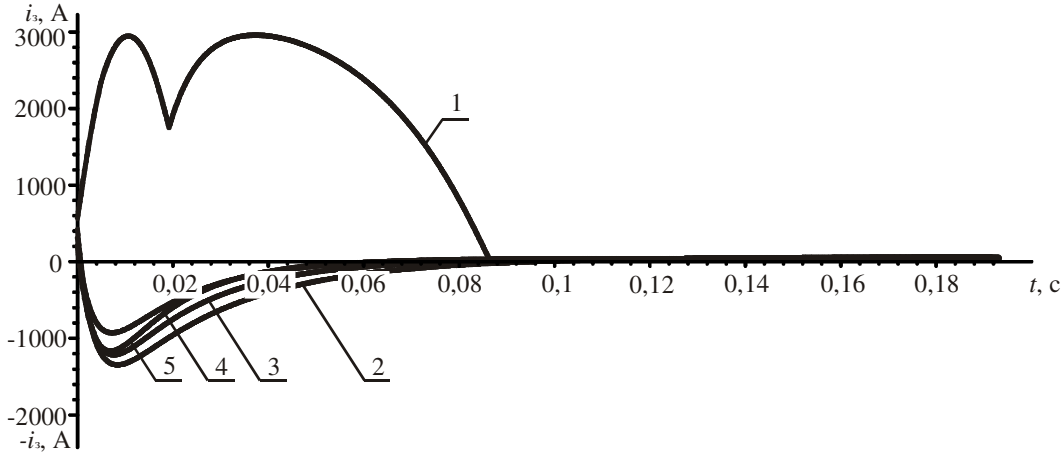


Рисунок 4.128 – Часові залежності зміни струму ОЗ в тяговому колі ЕРС для різних ступенів ПЗ: 1 – ПП; 2 – ПЗ-1; 3 – ПЗ-2; 4 – ПЗ-3; 5 – ПЗ-4

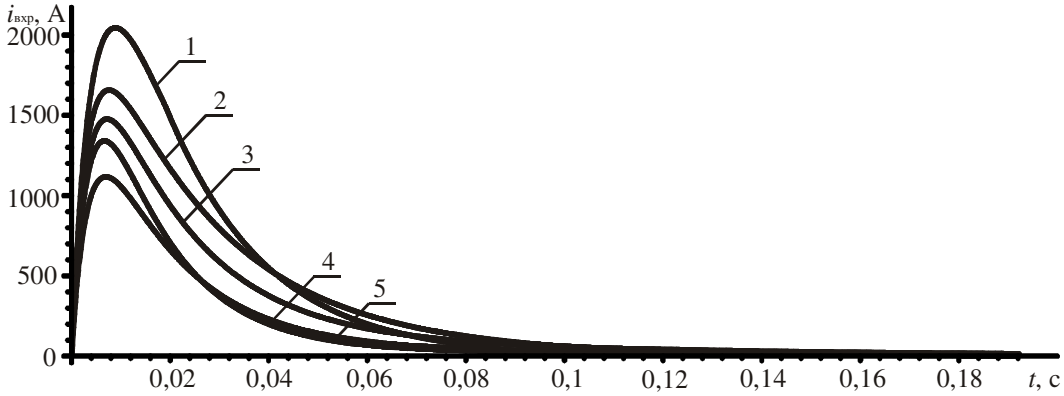


Рисунок 4.129 – Часові залежності зміни вихрових струмів в остові ТЕД для умов рис. 4.128

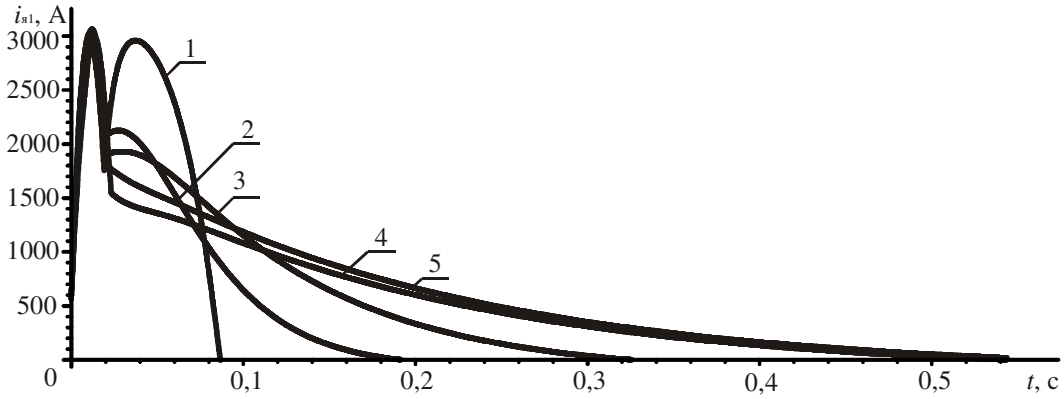


Рисунок 4.130 – Часові залежності зміни струму якоря паралельної вітки групи ТЕД, де відбулося КЗ для умов рис. 4.128

Як випливає із рис. 4.131 та таблиці 4.2, чіткої закономірності збільшення максимального значення струму $i_{я5}(t)$ закороченого ТЕД при збільшенні ступеня ПЗ не спостерігається. В той же час швидкість зростання цього струму $i'_{я5}(t)$ та термін часу перехідного процесу $i_{я5}(t)$ до його вимикання чітко змінюються від ПП до ПЗ-4.

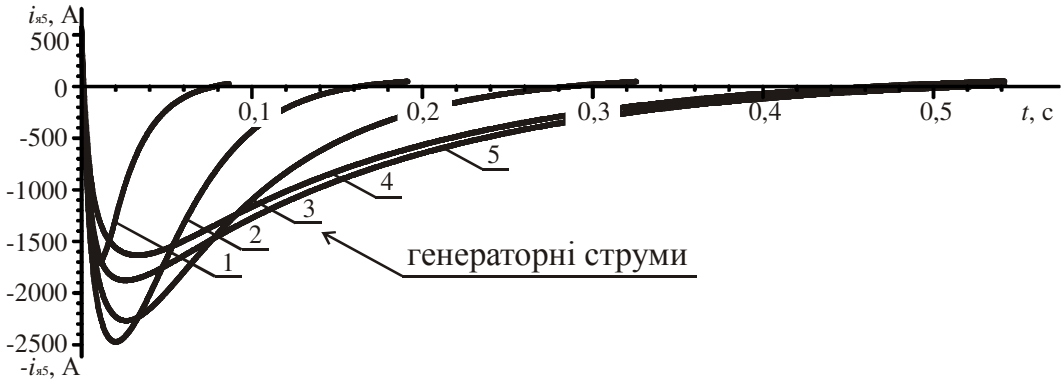


Рисунок 4.131 – Часові залежності зміни струму якоря закороченого ТЕД разом з ОЗ для умов рис. 4.128

Приведені дані свідчать, що найбільший кидок струму закороченого якоря, 2500 А, спостерігається не на ПЗ-4, а на ПЗ-1. На останній ступені ПЗ спостерігається найбільш «затягнутий», за 0,53 с, перехідний процес.

Характер фідерних і підстанційних струмів, а також напруг на ТП не змінюється (див. рис. 4.125-4.130). Лише на 100…250 А зростають амплітуди

струмів та напруг, максимальні значення напруг в діапазоні ПП-ПЗ-4 складають 450…500 В.

Таблиця 4.2

Показники перехідного струму закороченого ТЕД при різному ступені послаблення збудження

Вид послаблення збудження	Швидкість зростання струму, $i'_{я5}(t)$, 10^5, А/с	Термін часу перехідного процесу, с	Максимальне значення струму, А
ПП	1,7	0,08	1700
ПЗ-1	1,25	0,17	2500
ПЗ-2	0,75	0,3	2250
ПЗ-3	0,23	0,48	1620
ПЗ-4	0,63	0,53	1900

4.6.4 Коротке замикання при пробої дахового ізолятора струмоприймача електровоза

Розглядається випадок, який відносно часто трапляється у практиці експлуатації електровозів – перекриття одного із дахових ізоляторів, на яких змонтовано струмоприймач. В цьому випадку, як випливає із схеми рис. 4.136, «закорочується» весь електровоз.

Насамперед, із попереднього якісного аналізу часових залежностей отриманих перехідних величин випливає, що для всіх досліджених електровозів (ДЕ1, 2ЕЛ4, ВЛ10 і ВЛ8), не дивлячись на їх різні потужності в часовому режимі (відповідно 6280; 6200; 5460 і 4200 Вт (таблиця Д.1. додаток Д)) і також на різні $I_{\text{ном}}$ ТЕД (відповідно 565; 570; 480 і 380 А), характер «поведінки» і чисельні значення усіх перехідних величин, за виключенням струму якоря і струму в «закоротці», однакові; ці розрахунки виконано при розташуванні ЕРС на відстані $l_1 = 9{,}5\ км$ від ТП1. Вплив зміни розташування потягу (електровоза), тобто для $l_1 = \text{var}$ (0,5; 5; 9,5 км) досліджено лише для електровоза ДЕ1. Схема заміщення СЕТ в цьому представлена на рис. 4.132, а математична модель процесів, що протікають в цьому режимі являє собою таку

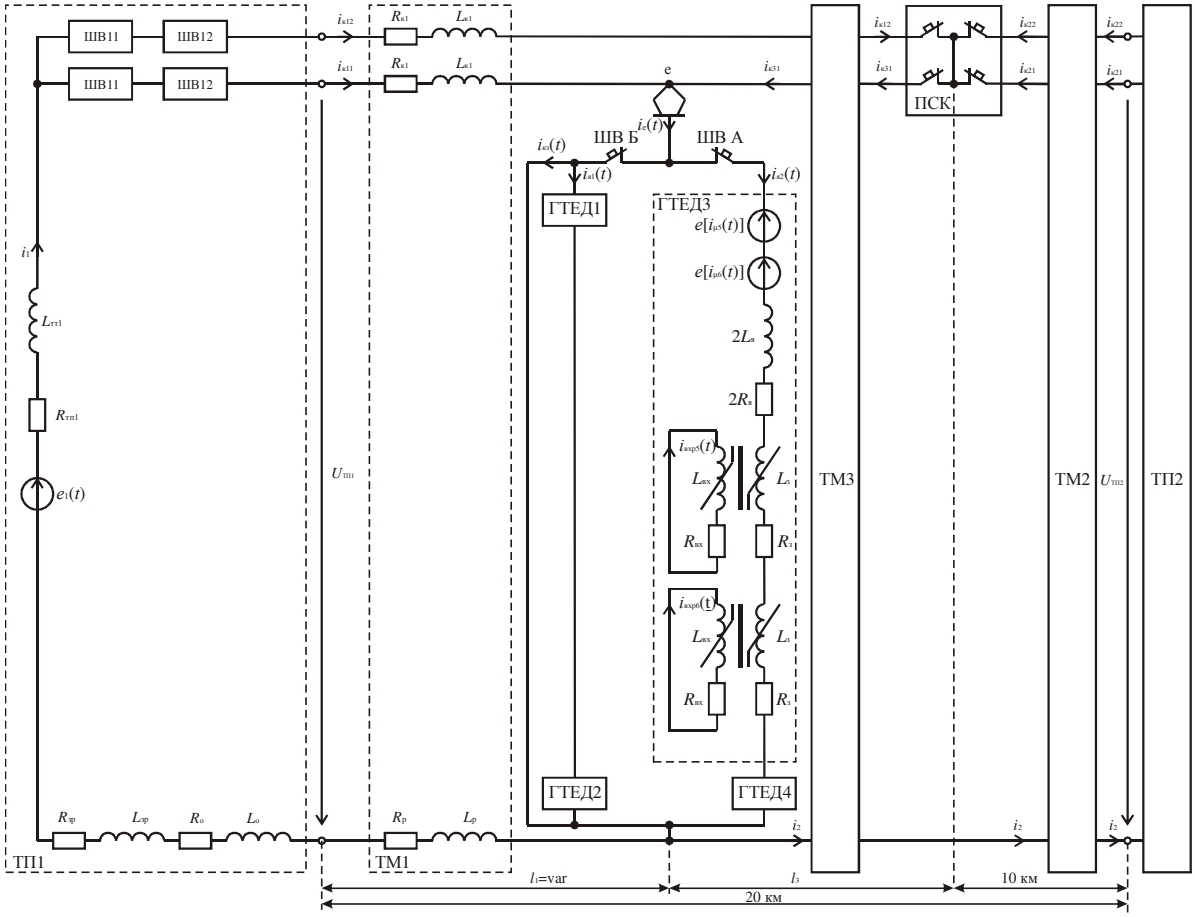


Рисунок 4.132 – Схема двоколійної ділянки системи електричної тяги в режимі зовнішнього КЗ ЕРС (перекриття дахового ізолятора)

систему рівнянь:

$$\left(R_{т1}+R_{пс1}+R_{зр1}+R_{р1}+R_{о1}\right)\cdot i_1+\left(L_{т1}+L_{зр1}+L_{о1}\right)\frac{di_1}{dt}+R_{ішl1\text{-}1}\cdot i_{ішl1\text{-}1}+L_{ішl1\text{-}1}\frac{di_{ішl1\text{-}1}}{dt}+$$

$$+R_{ішl1\text{-}2}\cdot i_{ішl1\text{-}2}+L_{ішl1\text{-}2}\frac{di_{ішl1\text{-}2}}{dt}+R_{к1}\cdot i_{к11}+L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}=e_{пс1}\left(t\right); \quad (4.96)$$

$$\left(R_{т2}+R_{пс2}+R_{зр2}+R_{р2}+R_{о2}+R_{р3}\right)\cdot i_2+\left(L_{т2}+L_{зр2}+L_{о2}\right)\frac{di_2}{dt}+R_{ішl2\text{-}1}\cdot i_{ішl2\text{-}1}+$$

$$+L_{ішl2\text{-}1}\frac{di_{ішl2\text{-}1}}{dt}+R_{ішl2\text{-}2}\cdot i_{ішl2\text{-}2}+L_{ішl2\text{-}2}\frac{di_{ішl2\text{-}2}}{dt}+R_{к2}\cdot i_{к21}+L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}+$$

$$=e_{пс2}\left(t\right); \quad (4.97)$$

$$\left(R_{к1}+R_{к3}\right)\cdot i_{к12}+\left(L_{к1}+L_{к3}\right)\frac{di_{к12}}{dt}+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}-R_{к1}\cdot i_{к11}-L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}=0; \quad (4.98)$$

$$-4\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+R_{з}\right)\cdot i_{я1}-4L_{я}\frac{di_{я1}}{dt}-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+...+\Phi_4\right)=$$

$$=C_{w}\omega\left(\Phi_1+...+\Phi_4\right); \quad (4.99)$$

$$-4\left(R_{\text{я}}+R_{\text{дп}}+R_{\text{ко}}+R_{\text{з}}\right)\cdot i_{\text{я}2}-4L_{\text{я}}\frac{di_{\text{я}2}}{dt}-2p\sigma_{\text{з}}\omega_{\text{з}}\frac{d}{dt}\left(\Phi_5+...+\Phi_8\right)=$$

$$=C_{\text{w}}\omega\left(\Phi_5+...+\Phi_8\right); \quad (4.100)$$

$$R_{\text{к}2}\cdot i_{\text{к}22}+L_{\text{к}2}\frac{di_{\text{к}22}}{dt}-R_{\text{к}2}\cdot i_{\text{к}21}-L_{\text{к}2}\frac{di_{\text{к}21}}{dt}=0; \quad (4.101)$$

$$i_1-i_{\text{к}11}-i_{\text{к}12}=0; \quad (4.102)$$

$$i_2-i_{\text{к}21}-i_{\text{к}22}=0; \quad (4.103)$$

$$i_{\text{я}1}+i_{\text{я}2}+i_{\text{кз}}-i_2-i_1=0; \quad (4.104)$$

$$i_{\text{к}22}+i_{\text{к}21}+i_{\text{к}12}-i_{\text{к}31}=0. \quad (4.105)$$

Систему рівнянь (4.96)-(4.105) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53), а також рівняннями електромагнітних процесів в ЕРС (4.11)-(4.13).

Загалом «ліквідація» розглядуваного аварійного режиму в ЕРС складається з декількох етапів, представлених в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Опис етапів «ліквідації» КЗ в залежності від координати ЕРС відносно ТП1

№ етапу	Відстань l_1, км (рис. 4.132)	
	0,5; 5,0	9,5
1	Струм ШВ ТП1 досягає уставки $I_{11}=I_{11УСТ}$ + власний термін часу вимикання ШВ	Струм ШВ ПСК досягає уставки $I_{31}=I_{31УСТ}$ +власний термін часу вимикання ШВ ПСК
2	Вимикання ШВ ТП1. Горить дуга, результат вимикання $I_{11}=0$	Вимикання ШВ ПСК. Горить дуга, результат вимикання $I_{31}=0$
3	Струм ШВ ПСК досягає уставки $I_{31}=I_{31УСТ}$ + власний термін часу вимикання ШВ	Струм ШВ ТП1 досягає уставки $I_{11}=I_{11УСТ}$ + власний термін часу вимикання ШВ
4	Вимикання ШВ ПСК. Горить дуга результат вимикання $I_{31}=0$	Вимикання ШВ ТП1. Горить дуга, результат вимикання $I_{11}=0$
5	Паралельні вітки ЕРС працюють на точку КЗ	Паралельні вітки ЕРС працюють на точку КЗ

В перший момент КЗ з максимальною швидкістю ($4{,}6\cdot10^5$ А/с у електровозів ДЕ1 і 2ЕЛ4 і $3{,}1\cdot10^5$ А/с – у ВЛ8) починає зростати струм короткого замикання (у «закоротці»), досягаючи за термін часу 0,02 с значення 9200 А у

перших двох електровозів і 6200 А - у ВЛ8 (рис. 4.133). Одночасно і закономірно струм у вітці з закороченими тяговими двигунами, змінивши напрямок, теж різко, хоча і з меншою швидкістю ($1{,}03\cdot10^5$А/с), зростає (рис. 4.134), досягаючи через 0,02 с 2050 А в електровозі 2ЕЛ4, 1900 А – ДЕ1, 1570 А – ВЛ10 і 400 А - ВЛ8.

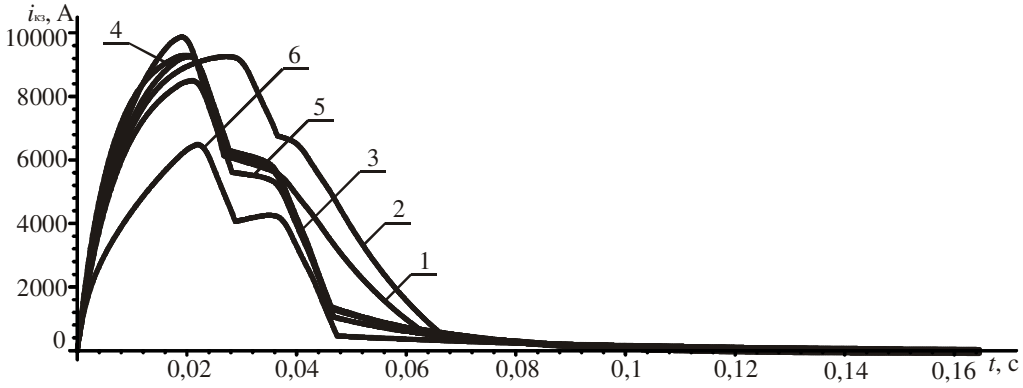


Рисунок 4.133 – Часові залежності зміни струму короткого замикання в режимі зовнішнього КЗ в ЕРС на електровозах різних серій і різній відстані (км) до ТП1: 1 – ДЕ1 - 0,5; 2 – ДЕ1 - 5,0; 3 – ДЕ1 - 9,5; 4 – 2ЕЛ4; 5 – ВЛ10; 6 – ВЛ8

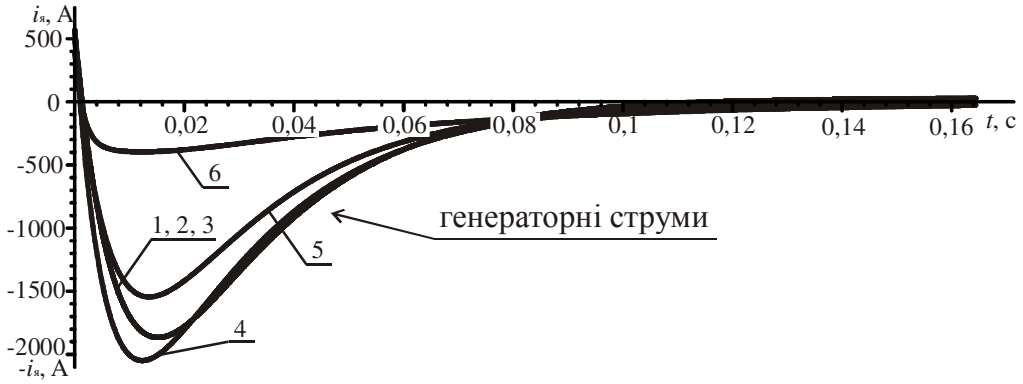


Рисунок 4.134 – Часові залежності зміни струму якоря ТЕД ЕРС для умов рис. 4.133

При зміні координати потягу, точніше зі збільшенням l_1 від 0,5 до 9,5 км, збільшується активний і індуктивний опори ТМ між ТП1 і електровозом і тому максимальне значення струму КЗ (в закоротці) зменшується від 10000 А при $l_1 = 0{,}5\,км$ до 9200 А (рис. 4.133, кр 1) при 5,0 і 9,5 км (рис. 4.133, кр 2 та

3). Форма $i_{кз}(t)$ та тривалість перехідного процесу при цьому не змінюються. Зміна відстані l_1 мало впливає на струм якоря (рис. 4.134).

За цей же інтервал часу 0,02 с зі швидкістю $2 \cdot 10^5$А/с збільшується струм i_{31} фідера ПСК. Він зростає до уставки (у всіх електровозів) і через 0,028…0,029 с (для всіх електровозів) ШВ ПСК вимикається (рис. 4.135). Потім, через 0,02 с після спрацьовування ШВ ПСК, як результат зростання (зі швидкістю $2{,}85 \cdot 10^5$А/с і $0{,}8 \cdot 10^5$А/с) до уставки струмів електровоза i_e (рис. 4.136) і ШВ11 першого фідера ТП1 (рис. 4.136 і 4.137); тобто, електровоз відмикається від ТП і струми в його силових тягових колах обумовлюються лише проти-е.р.с. якорів ТЕД. Рух поїзда (електровоза), тобто зміна відстані l_1 не впливає на факт спрацьовування ШВ ПСК (рис. 4.135), ШВ електровоза (рис. 4.140) і ШВ 11 фідера 1 ТП1 (рис. 4.137): при будь-якій відстані (0,5…9,5 км) зазначені ШВ вимикаються, зі збільшенням l_1 зростає лише термін вимикання внаслідок зміщення самих кривих струмів «праворуч» по вісі часу.

В той же час зворотний характер струму ТЕД (рис. 4.134) обумовлює, за термін часу 0,11 с (окрім ВЛ8), повне розмагнічування їх магнітних систем (рис. 4.138). Тим самим за той же час експоненціально спадає до нуля проти-е.р.с. якорів, що й призводить до загасання до нуля струмів в вітках з ТЕД (рис. 4.134). Часові залежності характеру зміни основного магнітного потоку (рис. 4.138), вихрових струмів, проти-е.р.с. якорів ТЕД, і струмів в вітках ТЕД (рис. 4.134) свідчать про суттєву «затягнутість» протікання перехідних аварійних процесів в силових тягових колах електровозу ВЛ8 у порівнянні з іншими електровозами: $T_{\text{ППр}} \approx 0{,}3...0{,}4\,c$, у той час як для інших електровозів $T_{\text{ППр}} \approx 0{,}11...0{,}12\,c$. Це свідчить, в основному, про конструктивно-параметричні особливості нелінійних магнітних кіл тягових двигунів.

Розглянуті вище процеси, що протікають в електровозі при його повному КЗ, істотно, впливають на ТП і кола ТМ. Про це свідчить, насамперед, різко нестаціонарний характер зміни напруг на ТП (рис. 4.139 і 4.140) з кидками відповідно до 6700 і 7200 В і теж різким зниженням до $U_{\text{ном}}$ (3400 і 3300

В) через 0,045 і 0,029 с після початку КЗ. Зміна величини l_1 не зменшує динаміки зміни напруг на ТП. Особливість полягає лише в зміні амплітуд напруг: величина U_1 зі збільшенням l_1 зменшується (рис. 4.139), а величина U_2 - збільшується (рис. 4.140). Істотно, такий динамічний і тривалий характер зміни напруги на виході ТП не проходить «безслідно» для систем АЛСН електровозів і рейкових кіл СЦБ і зв'язку. Тобто, постає задача оцінки ступеня електромагнітної сумісності підсистем електротяги в перехідних аварійних режимах.

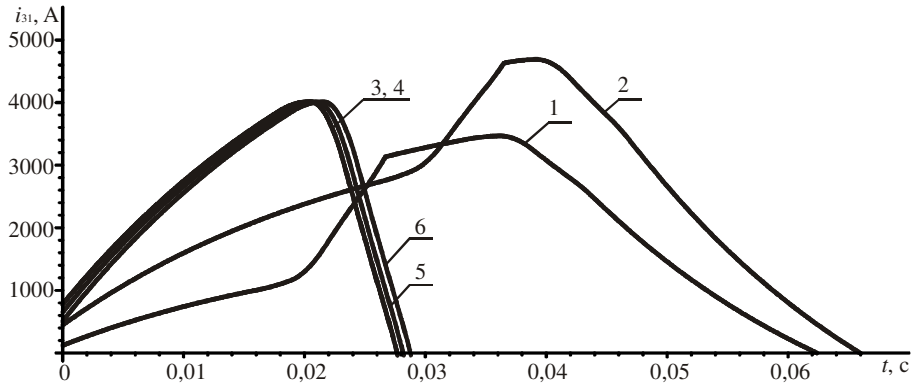


Рисунок 4.135 – Часові залежності зміни струму збудження ТЕД ЕРС для умов рис. 4.133

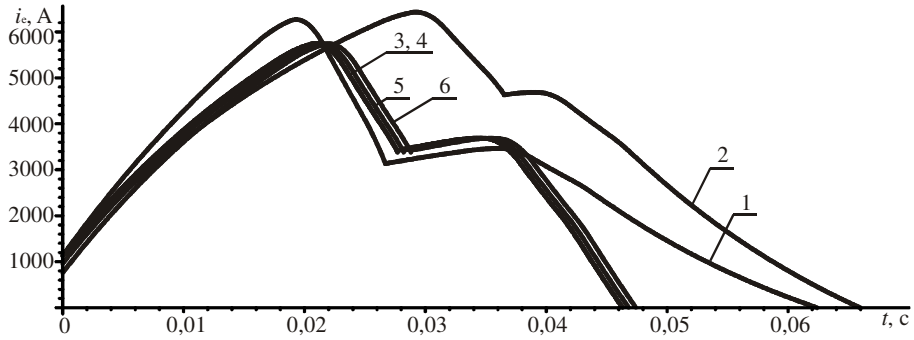


Рисунок 4.136 – Часові залежності зміни струму електровозу для умов рис. 4.133

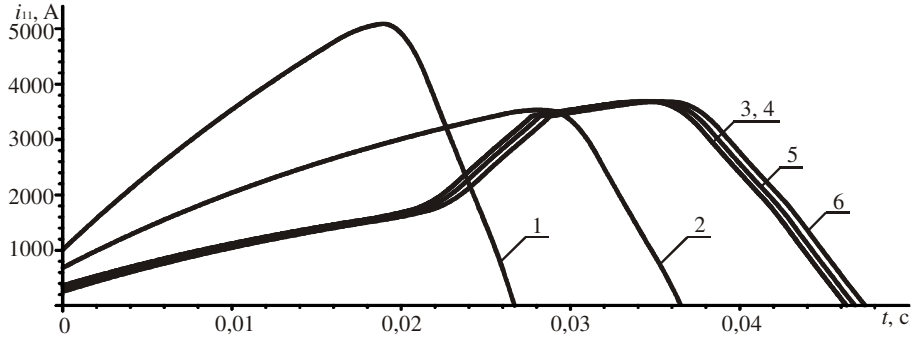


Рисунок 4.137 – Часові залежності зміни струму живлячого фідера для умов рис. 4.133

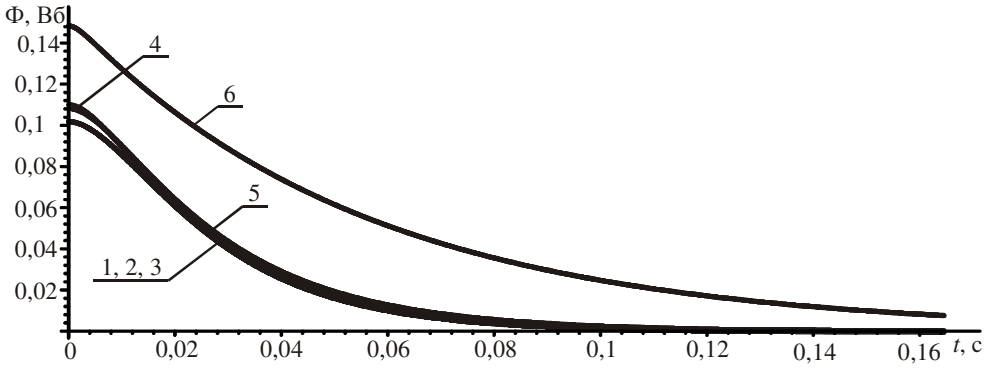


Рисунок 4.138 – Часові залежності зміни основного магнітного потоку ТЕД ЕРС для умов рис. 4.133

Значення амплітуд фідерних струмів $i_{к12}(t)$, $i_{к21}(t)$ та $i_{к22}(t)$ (рис. 4.132) не викликає небезпеки в розглянутому режимі КЗ, бо вони не перевищують 1400 А. інша річ – це підстанційні струми $i_1(t)$ та $i_2(t)$ (рис. 4.141 і 4.142), їх максимуми досягають відповідно 3100 і 2700 А. Суттєвими є також швидкості зростання цих струмів в початковий (0,02 с) період КЗ: $1{,}5\cdot10^5$А/с і $1{,}35\cdot10^5$А/с.

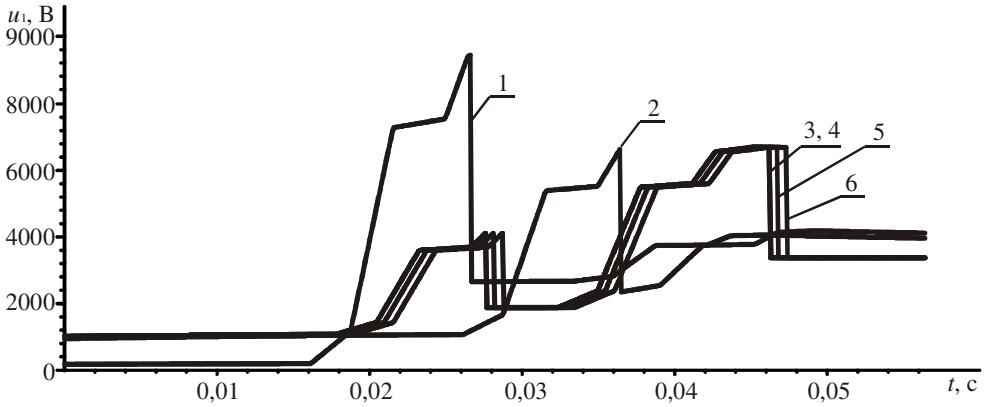


Рисунок 4.139 – Часові залежності зміни фідерної напруги ТП1 для умов рис. 4.133

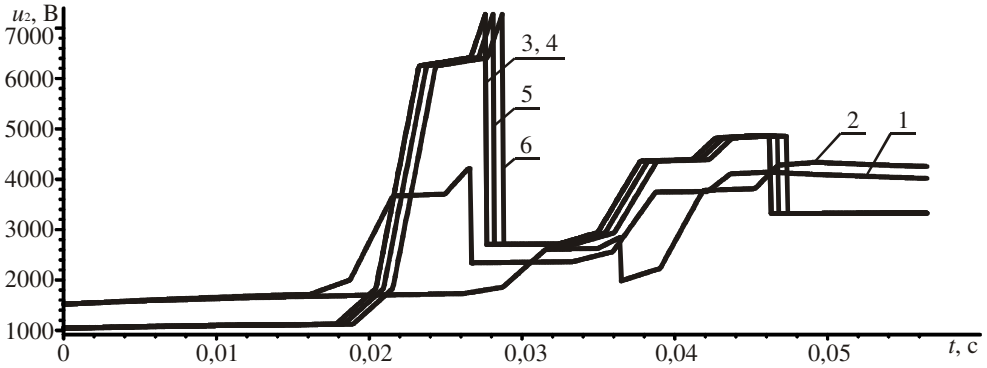


Рисунок 4.140 – Часові залежності зміни фідерної напруги ТП2 для умов рис. 4.133

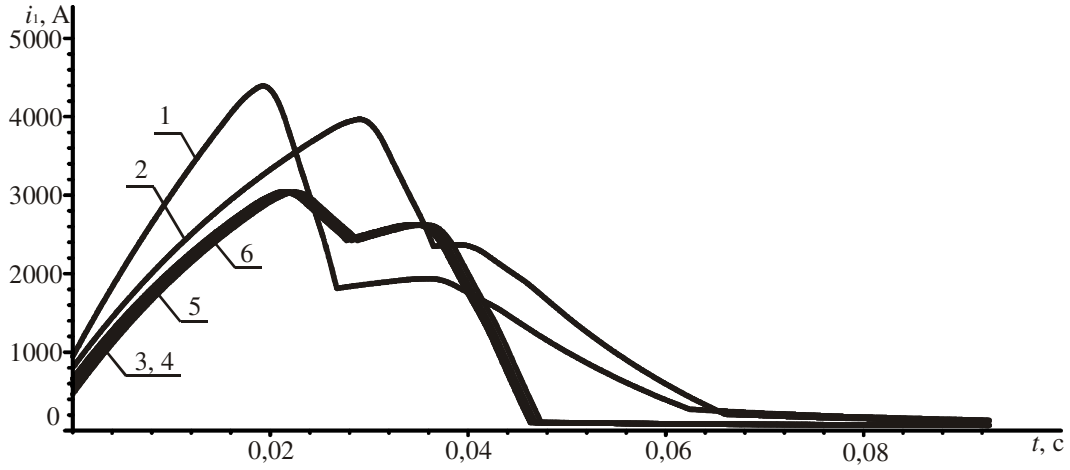


Рисунок 4.141 – Часові залежності зміни струму ТП1 для умов рис. 4.133

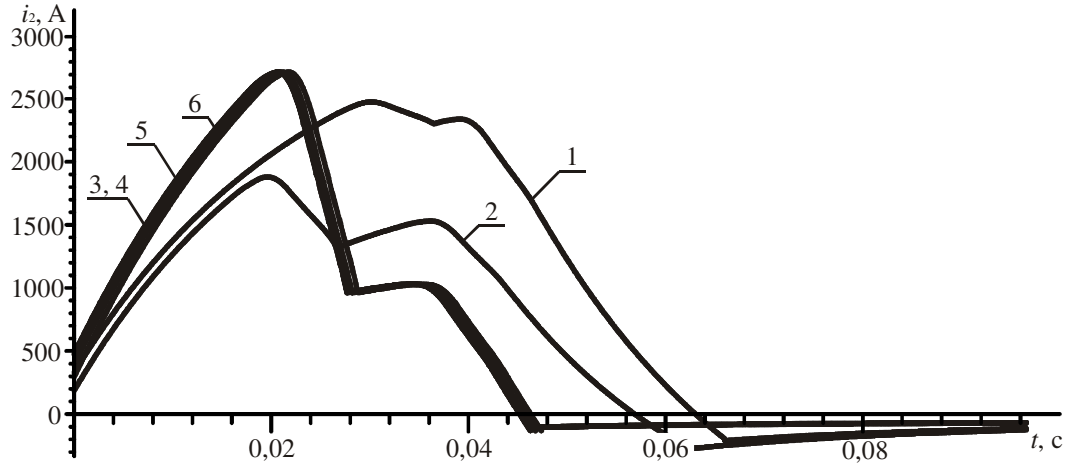


Рисунок 4.142 – Часові залежності зміни струму ТП2 для умов рис. 4.133

Розглянемо випадок перекриття дахового ізолятора ЕРС1, у випадку коли на фідерній зоні знаходиться ще один електровоз. З'єднання ТЕД обох ЕРС прийнято «СП», струм номінальний, швидкість ЕРС1, ЕРС2 визначаємо за електромеханічними характеристиками. Відстань від ТП2 до ЕРС2 змінюємо за величинами 5, 7, 9 км (якщо відстань не вказана, то без ЕРС2). Цей режим зовнішнього КЗ ТЕД розглянемо для електровозів ДЕ1, один з яких рухається (рис. 4.143, відстань ЕРС2 відносно ТП2 $l = \text{var}$ і складає 5; 7 і 9 км). До цього додамо, що на всіх наступних рисунках крива 1 являє собою відповідну перехідну величину при відсутності в зоні другого електровозу.

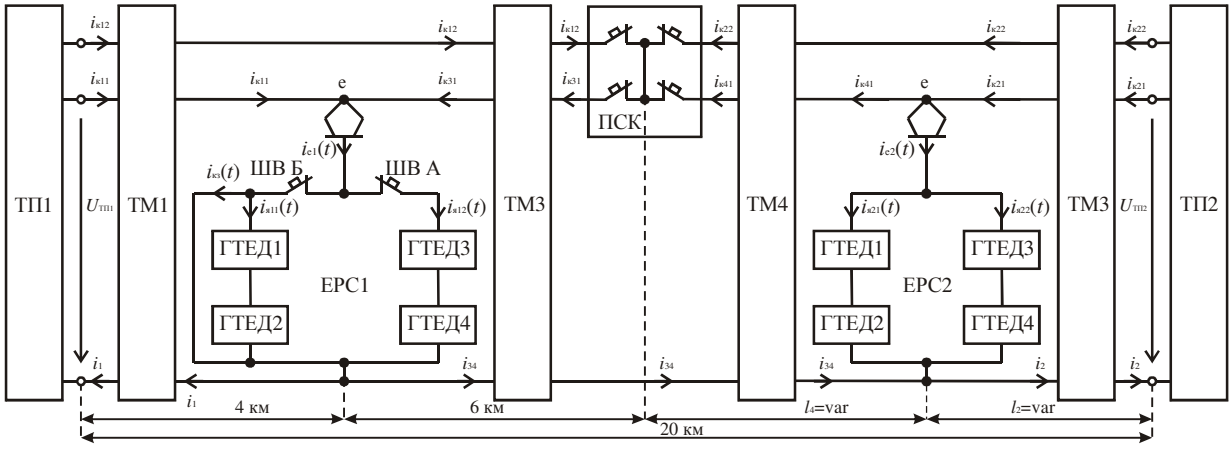


Рисунок 4.143 – Схема заміщення СЕТ в режимі перекриття дахового ізолятора при наявності двох ЕРС на фідерній зоні

Математична модель описується рівняннями:

$$\left(R_{т1}+R_{пс1}+R_{зр1}+R_{р1}+R_{о1}\right)\cdot i_1+\left(L_{т1}+L_{зр1}+L_{о1}\right)\frac{di_1}{dt}+R_{іш1\text{-}1}\cdot i_{іш1\text{-}1}+$$

$$+L_{іш1\text{-}1}\frac{di_{іш1\text{-}1}}{dt}+R_{іш1\text{-}2}\cdot i_{іш1\text{-}2}+L_{іш1\text{-}2}\frac{di_{іш1\text{-}2}}{dt}+R_{к1}\cdot i_{к11}+L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}=e_{пс1}(t); \qquad (4.106)$$

$$\left(R_{т2}+R_{пс2}+R_{зр2}+R_{р2}+R_{о2}+R_{р3}\right)\cdot i_2+\left(L_{т2}+L_{зр2}+L_{о2}\right)\frac{di_2}{dt}+R_{іш2\text{-}1}\cdot i_{іш2\text{-}1}+$$

$$+L_{іш2\text{-}1}\frac{di_{іш2\text{-}1}}{dt}+R_{іш2\text{-}2}\cdot i_{іш2\text{-}2}+L_{іш2\text{-}2}\frac{di_{іш2\text{-}2}}{dt}+R_{к2}\cdot i_{к21}+L_{к2}\frac{di_{к21}}{dt}+R_{к3}\cdot i_{к31}+$$

$$+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}+R_{к4}\cdot i_{к41}+L_{к4}\frac{di_{к41}}{dt}+\left(R_{р3}+R_{р4}\right)\cdot i_{34}=e_{пс2}(t); \qquad (4.107)$$

$$\left(R_{к1}+R_{к3}\right)\cdot i_{к12}+\left(L_{к1}+L_{к3}\right)\frac{di_{к12}}{dt}+R_{к3}\cdot i_{к31}+L_{к3}\frac{di_{к31}}{dt}-$$

$$-R_{к1}\cdot i_{к11}-L_{к1}\frac{di_{к11}}{dt}=0; \qquad (4.108)$$

$$-4\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+R_{з}\right)\cdot i_{я11}-4L_{я}\frac{di_{я11}}{dt}-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_{11}+...+\Phi_{14}\right)=$$

$$=C_{w}\omega\left(\Phi_{11}+...+\Phi_{14}\right); \qquad (4.109)$$

$$-4\left(R_{я}+R_{дп}+R_{ко}+R_{з}\right)\cdot i_{я12}-4L_{я}\frac{di_{я12}}{dt}-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_{15}+...+\Phi_{18}\right)=$$

$$=C_{w}\omega\left(\Phi_{15}+...+\Phi_{18}\right); \qquad (4.110)$$

$$-4\left(R_{\text{я}}+R_{\text{дп}}+R_{\text{ко}}+R_{\text{з}}\right)\cdot i_{\text{я}21}-4L_{\text{я}}\frac{di_{\text{я}21}}{dt}-2p\sigma_{\text{з}}\omega_{\text{з}}\frac{d}{dt}\left(\Phi_{21}+...+\Phi_{24}\right)+$$

$$+R_{\text{к}4}\cdot i_{\text{к}41}+L_{\text{к}4}\frac{di_{\text{к}41}}{dt}+R_{\text{к}3}\cdot i_{\text{к}31}+L_{\text{к}3}\frac{di_{\text{к}31}}{dt}=C_{\text{w}}\omega\left(\Phi_{21}+...+\Phi_{24}\right);\qquad(4.111)$$

$$-4\left(R_{\text{я}}+R_{\text{дп}}+R_{\text{ко}}+R_{\text{з}}\right)\cdot i_{\text{я}22}-4L_{\text{я}}\frac{di_{\text{я}22}}{dt}-2p\sigma_{\text{з}}\omega_{\text{з}}\frac{d}{dt}\left(\Phi_{25}+...+\Phi_{28}\right)+$$

$$+R_{\text{к}4}\cdot i_{\text{к}41}+L_{\text{к}4}\frac{di_{\text{к}41}}{dt}+R_{\text{к}3}\cdot i_{\text{к}31}+L_{\text{к}3}\frac{di_{\text{к}31}}{dt}=C_{\text{w}}\omega\left(\Phi_{25}+...+\Phi_{28}\right);\qquad(4.112)$$

$$R_{\text{к}2}\cdot i_{\text{к}22}+L_{\text{к}2}\frac{di_{\text{к}22}}{dt}-R_{\text{к}4}\cdot i_{\text{к}41}-L_{\text{к}4}\frac{di_{\text{к}41}}{dt}-R_{\text{к}2}\cdot i_{\text{к}21}-L_{\text{к}2}\frac{di_{\text{к}21}}{dt}=0;\qquad(4.113)$$

$$i_1-i_{\text{к}11}-i_{\text{к}12}=0;\qquad(4.114)$$

$$i_2-i_{\text{к}21}-i_{\text{к}22}=0;\qquad(4.115)$$

$$i_{21}-i_{\text{я}21}-i_{\text{я}22}-i_{41}=0;\qquad(4.116)$$

$$i_{\text{я}11}+i_{\text{я}12}+i_{\text{кз}}-i_{34}-i_1=0;\qquad(4.117)$$

$$i_{\text{к}22}+i_{\text{к}41}+i_{\text{к}12}-i_{\text{к}31}=0.\qquad(4.118)$$

В системі позначено: $\Phi_{11}...\Phi_{18}$, $\Phi_{21}...\Phi_{28}$ – основні магнітні потоки тягових двигунів відповідно ЕРС1 і ЕРС2; $i_{\text{я}11}$, $i_{\text{я}12}$, $i_{\text{я}21}$, $i_{\text{я}22}$ – струми якорів відповідно ЕРС1 і ЕРС2.

Розглядувану систему (4.106)-(4.118) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53), а також рівняннями електромагнітних процесів в ЕРС (4.11)-(4.13).

Згідно з рис. 4.143, перекриття дахового ізолятора першого електровоза (далі ЕРС1 або електровоза №1) призводить до закорочування всього ЕРС1. В цьому режимі, незалежно від наявності чи відсутності на фідерній зоні другого поїзда, тобто ЕРС2, і відстані l_2 його розташування (рис. 4.143), струм $i_{\text{к}11}$ фідера 1 ТП1 і струм $i_{\text{е}1}$ електровоза №1 обмежуються лише невеликими значеннями активного і індуктивного опорів ТМ, що відповідають її довжині $l_1=4\,км$ (рис. 4.143). І тому ці струми швидко, перший за 3 мс, а другий – за 0,028 с, досягають уставок відповідно 1900 А і 3000 А і ШВ11 фідера 1 через 0,032 с (при відсутності поки що електровоза №2) (рис. 4.144), а потім ШВ електровоза №1 через 0,062 с (рис. 4.145) вимикаються. Одноча-

сно з ШВ електровоза спрацьовує і ШВ ПСК, оскільки струм $i_2(t)$ теж досягає уставки 3000 А (рис. 4.146).

Наявність другого електровозу на фідерній зоні зміщує, як випливає із рис. 4.148-4.150, перехідні криві «вліво», тобто в область менших термінів спрацьовування ШВ. Такий самий вплив чинить відстань l_2. Отже, чим ближче електровоз №2 знаходиться до точки КЗ (до електровозу №1), тим раніше, приблизно на 0,01 -0,012 с, спрацьовують швидкодіючі вимикачі. Крім цього, зазначені фактори (певно, за рахунок дії проти-е.р.с ТЕД електровоза №2) обумовлюють збільшення на 600…700 А максимум перехідного струму першого електровозу (рис. 4.145), який досягає 6600 А.

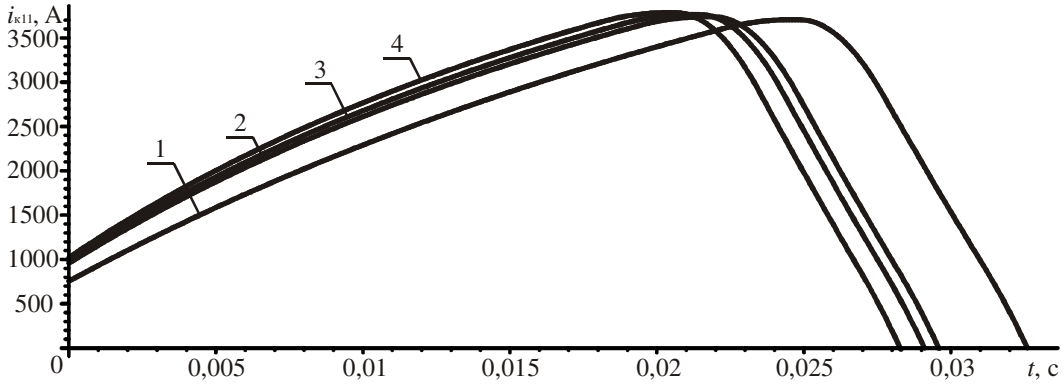


Рисунок 4.144 – Часові залежності струму живлячого фідера ТП1 в режимі короткого замикання на ЕРС при різній відстані від ЕРС2 до ТП2 l: 1 – ЕРС2 відсутній; 2 – 5 км; 3 – 7 км; 4 – 9 км

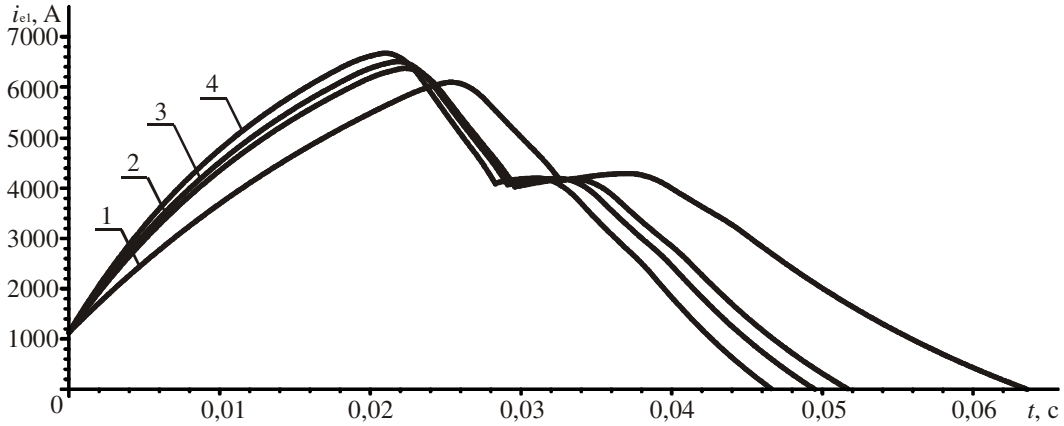


Рисунок 4.145 – Часові залежності струму ЕРС1 для умов рис. 4.144

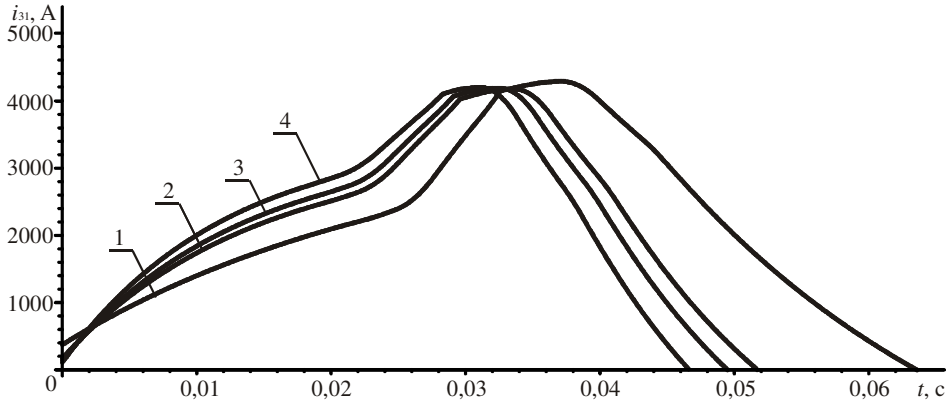


Рисунок 4.146 – Часові залежності струму фідера ПСК для умов рис. 4.144

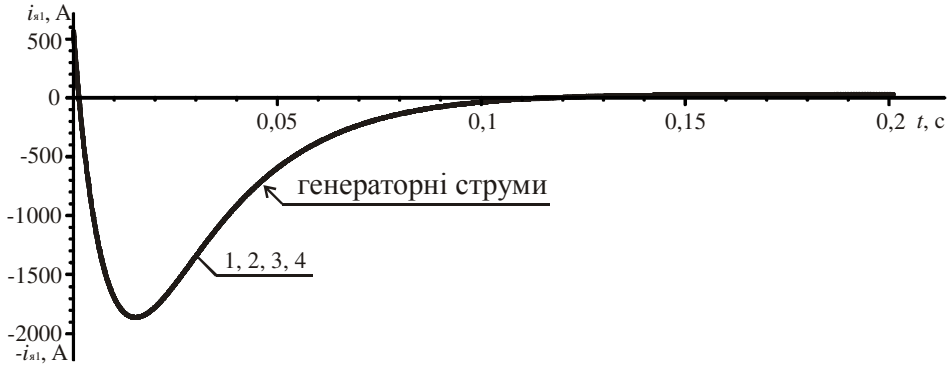


Рисунок 4.147 – Часові залежності струму якоря ЕРС1 для умов рис. 4.144

Істотно, що в момент КЗ струми ТЕД закороченого електровоза №1 миттєво, зі швидкістю $1{,}19 \cdot 10^5 \, A/c$, стають генераторними, досягаючи 1900 А (рис. 4.147), і через «закоротку» (рис. 4.148) зі струмом ~ 10000 А живлять точку КЗ. Одночасно, зворотний характер струмів двигунів електровоза №1 розмагнічує їх магнітні системи, в результаті зменшуються проти-е.р.с., тому після вимикання ШВ електровоза струми двигунів спадають до нуля за 0,12 с (рис. 4.147). Наявність електровоза №2 ніяк не впливає ні на струми, ні на магнітні потоки (рис. 4.149) закороченого електровозу.

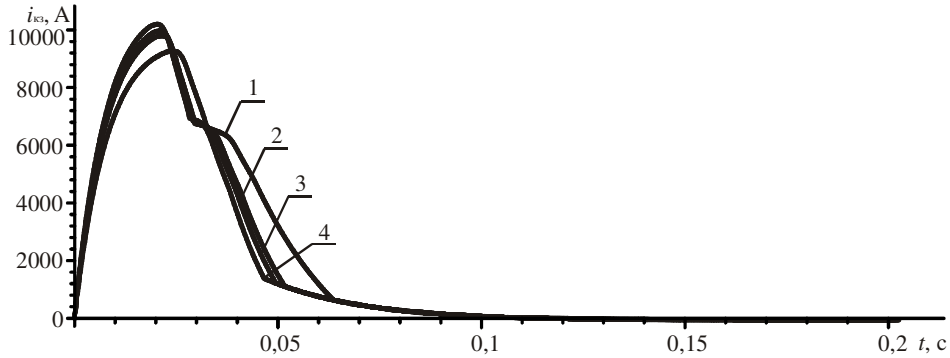


Рисунок 4.148 – Часові залежності струму КЗ для умов рис. 4.144

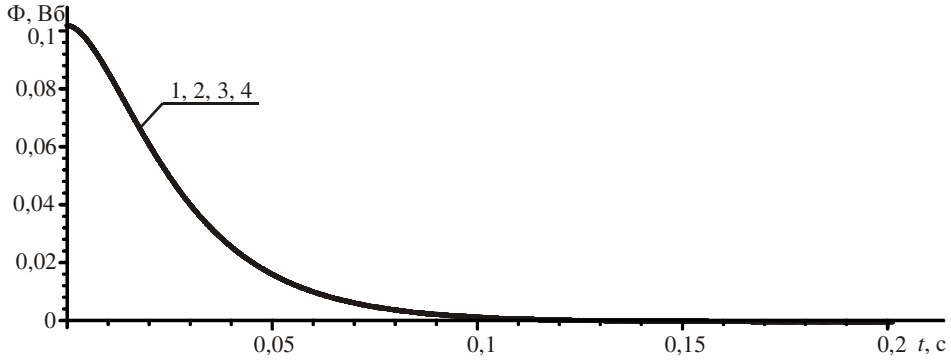


Рисунок 4.149 – Часові залежності основного магнітного потоку ТЕД ЕРС1 і ЕРС2 для умов рис. 4.144

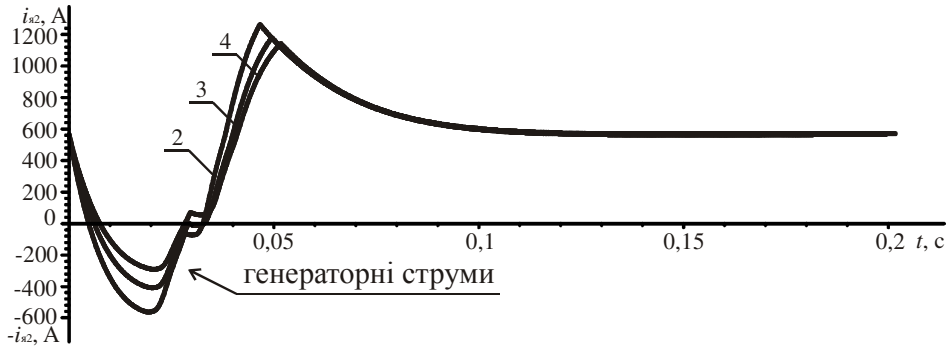


Рисунок 4.150 – Часові залежності струму якоря ЕРС2 для умов рис. 4.144

Повне закорочування електровозу №1 схематично (рис. 4.143) являє собою режим КЗ в ТМ і тому закономірно, що тягові двигуни електровозу №2 (рис. 4.150) і, отже, весь електровоз (рис. 4.151) переходять в генераторний режим і своїми проти-е.р.с. живлять не лише точку КЗ (точку дотику струмоприймача електровоза №1 з контактним проводом), але ще й обумовлюють зворотний характер струму $i_{к12}(t)$ фідера 2 ТП1 (рис. 4.152). Збільшення максимального значення генераторних струмів зі зростанням відстані l_2 (рис. 4.150-4.152) від 5 до 9 км (відносно ТП2) зменшується відстань між електровозами, тобто електровоз №2 буде розташовуватись ближче до точки КЗ, тим самим зменшується опір ТМ між електровозами, що й обумовлює підвищення I_{max} зазначених струмів. Тривалість генераторного режиму електровозу №2 складає 0,028 с, що чітко відповідає терміну часу зростання струму i_{e1} першого електровозу (рис. 4.145). З цього моменту часу 0,028 с, тобто з моменту зменшення струму i_{e1} (рис. 4.145) і струму $i_{31}(t)$ (рис. 4.146)

тягові двигуни електровозу №2 (рис. 4.150 і 4.151) переходять в двигунний режим і їх струми зростають до моменту (відповідно 0,047 і 0,052 с) вимикання ШВ електровоза №1 і ШВ ПСК. Після цього наступає усталений режим, в якому струм $i_{e2} = 1200\ A$ і не залежить від l_2 (рис. 4.151). На відміну від цього нове усталене значення фідерного струму $i_{к12}(t)$ збільшується зі зростанням l_2 (рис. 4.152) за рахунок зменшення опору ТМ.

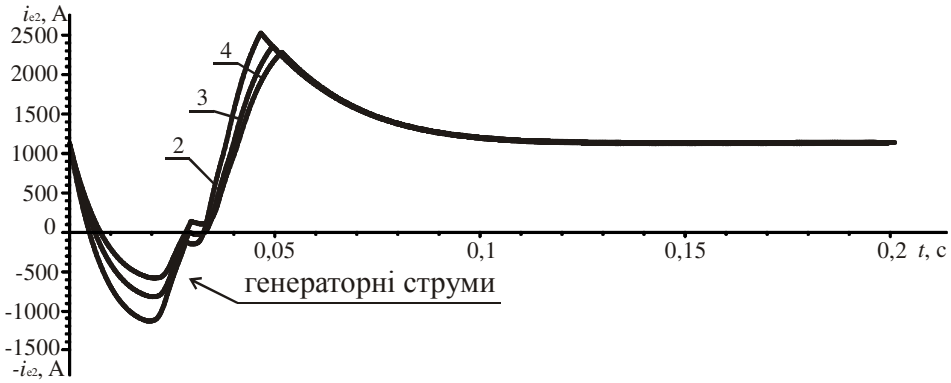


Рисунок 4.151 – Часові залежності струму ЕРС2 для умов рис. 4.144

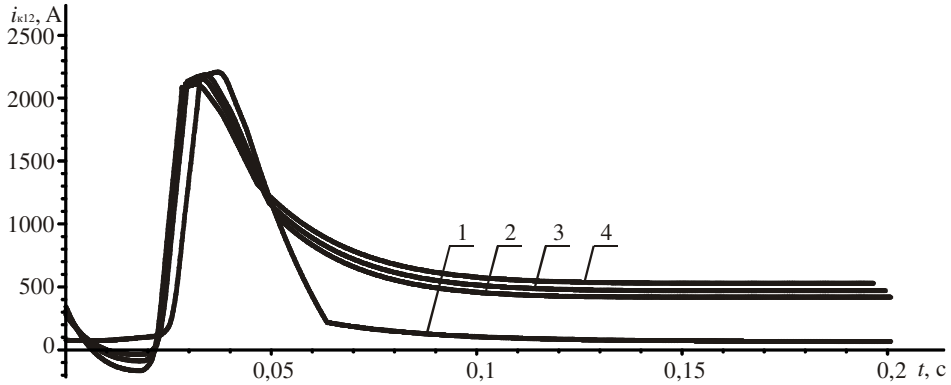


Рисунок 4.152 – Часові залежності струму другого фідера ТП1 для умов рис. 4.144

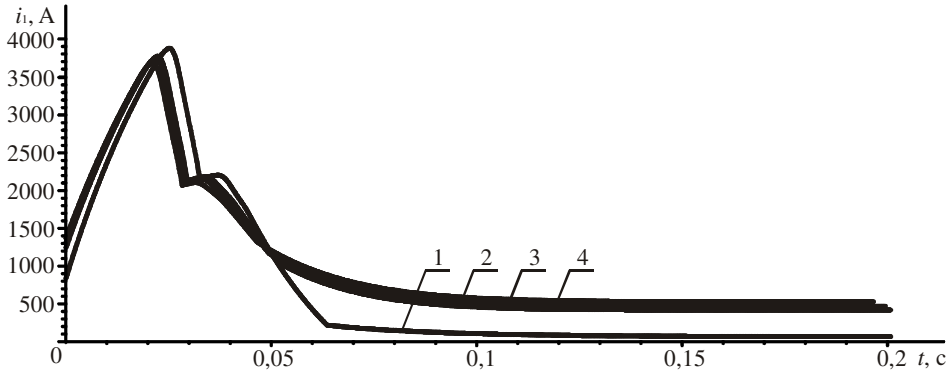


Рисунок 4.153 – Часові залежності струму ТП1 для умов рис. 4.144

Найбільший вплив наявності і точки розташування (тобто відстані l_2) виявляється на струморозподіленні в фідерах ТП (рис. 4.154-4.160). Особливо це стосується ТП2, оскільки ЕРС2 розташовується близько біля неї.

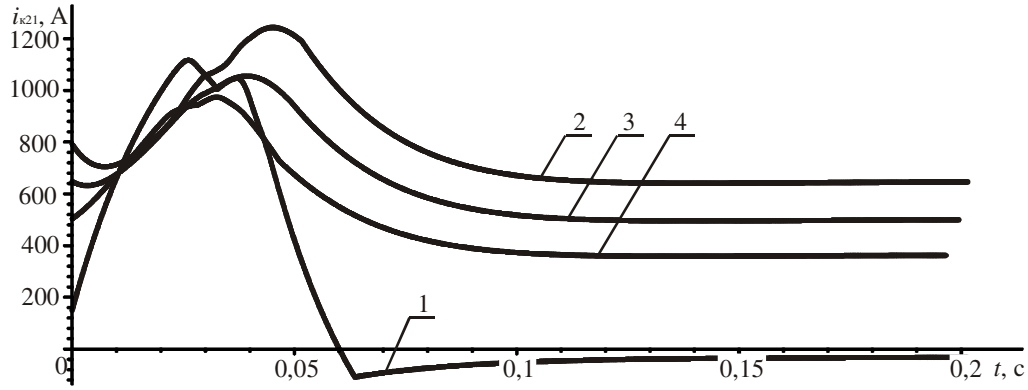


Рисунок 4.154 – Часові залежності струму живлячого фідера ТП2 для умов рис. 4.144

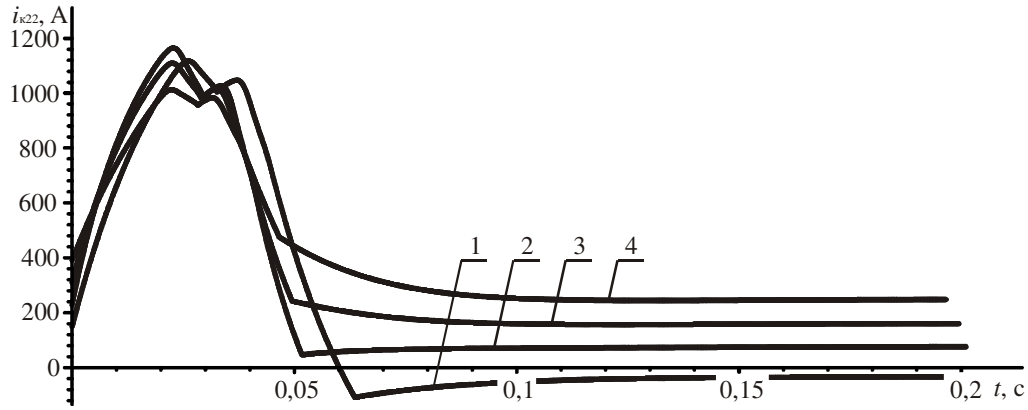


Рисунок 4.155 – Часові залежності струму другого фідера ТП2 для умов рис. 4.144

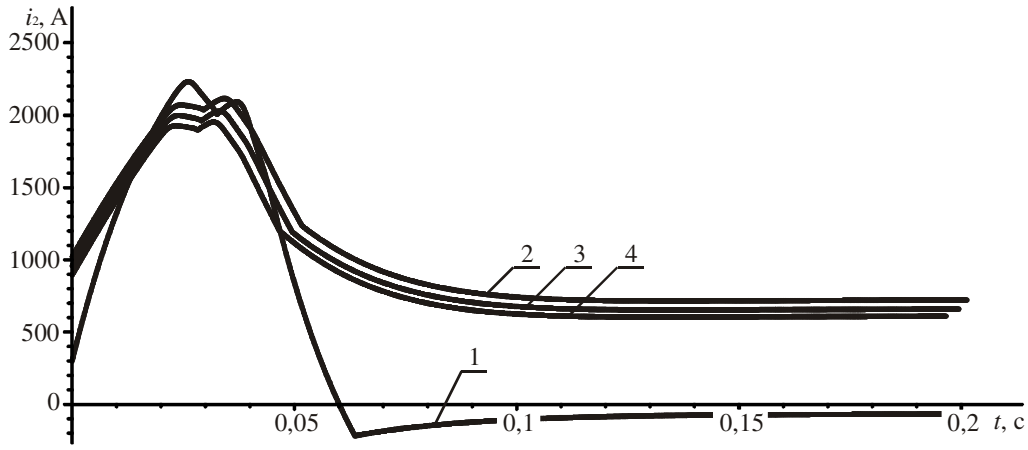


Рисунок 4.156 – Часові залежності струму ТП2, для умов рис. 4.144

Збільшення максимальних значень та характер зміни фідерних струмів $i_{к11}(t)$ (рис. 4.144) та $i_{к12}(t)$ (рис. 4.152) однозначно впливають на підстанційний струм $i_1(t)$ ТП1 та його прямопропорційну залежність від l_2, досягаючи в максимумі ~3900 А (рис. 4.153).

Найбільший вплив наявності електровоза №2 та величини відстані l_2 помітний на фідерних та підстанційному струмах ТП2 (рис. 4.154-4.156). За характером і термінами часу зміни фідерні струми $i_{к21}(t)$ та $i_{к22}(t)$ (рис. 4.154 і 4.155) і підстанційний $i_2(t)$ (рис. 4.156) аналогічні підстанційному $i_1(t)$ ТП1 (рис. 4.153): за термін часу 0,028 с вони зростають до максимуму, потім експоненціально зменшуються до усталеного значення після вимикання ШВ електровоза і ШВ ПСК. Істотно, що усталені значення залежать від l_2 (рис. 4.154-4.156). Крім цього, треба підкреслити, що наявність електровоза №2 не дозволяє змінювати напрямок фідерних струмів, як це спостерігається при відсутності електровоза №2 (рис. 4.154-4.156, кр. 1).

Комутаційні процеси, що описані вище, обумовлюють різко динамічні в діапазоні 0…0,05 с зміни напруг на струмоприймачі електровоза №2 (рис. 4.157) і підстанційні напруги (рис. 4.158 і 4.159). І якщо наявність електровоза №2 майже не впливає на напругу ТП1 U_1, та ТП2 U_2 цей вплив помітний (рис. 4.159): по-перше, менший діапазон стрибкоподібної зміни, від 3400 до 2250 В і далі до 3000 В. По-друге, нове усталене значення складає не 3400 В (як на ТП1), а 3200 В.

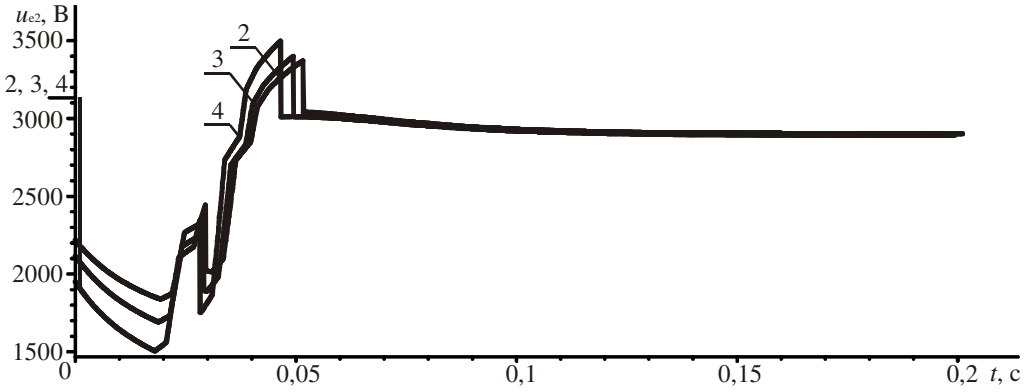


Рисунок 4.157 – Часові залежності напруги на струмоприймачі ЕРС2, для умов рис. 4.144

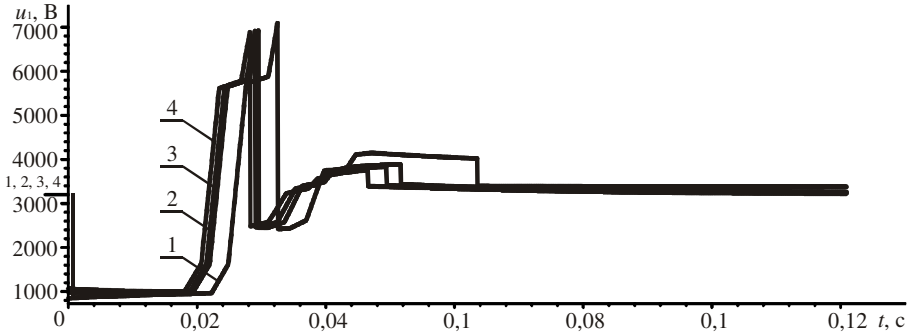


Рисунок 4.158 – Часові залежності напруги на затискачах ТП1, для умов рис. 4.144

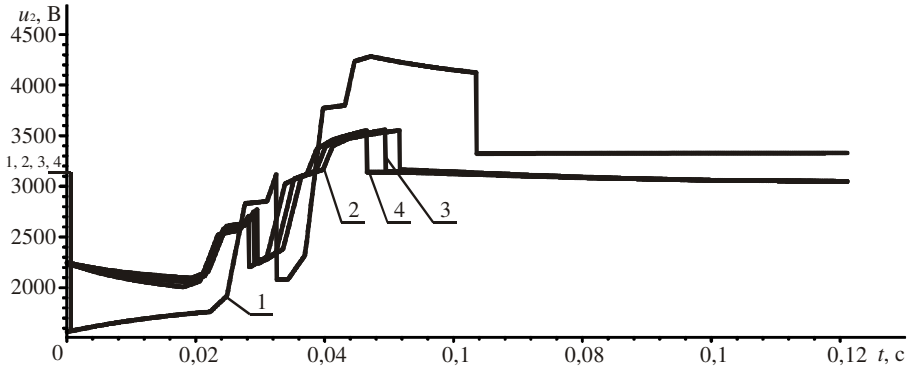


Рисунок 4.159 – Часові залежності напруги на затискачах ТП2, для умов рис. 4.144

4.7 Метод «залишкової напруги» селективного визначення електротягової підсистеми з коротким замиканням

Одним з важливих і ще не вирішених до тепер практичних завдань «боротьби» з КЗ у системі електротяги постійного струму є завдання встановлення, у який з підсистем, у ТМ чи в ЕРС, у цей момент відбулося КЗ. Нижче пропонується й теоретично, результатами математичного моделювання, обґрунтовується ознака (показник), на базі якої може бути розроблена інформаційна система, за допомогою якої може бути вирішене поставлене завдання.

4.7.1. Одностороннє живлення, коротке замикання в тяговій мережі

Розрахункова схема наведена на рис. 4.160, на якому напруга $U_{\text{ТМ}}$ є рівень напруги в ТМ з боку колії фідерної зони. При увімкненому ШВ ТП ця

напруга є фідерною напругою U_{Φ}, тобто $U_{\Phi} = U_{\text{ТМ}}$, і нехай вони дорівнюють номінальному значенню 3,3 кВ. У напрузі $U_{\text{ТМ}}^{\text{Н}}$ тут і далі у всіх величинах верхній індекс означає номінальне значення відповідної величини до моменту КЗ. Електровоз на схемі (рис. 160) рухається на ходовій позиції «П»-з'єднання ТЕД, початковий струм якоря $I_{я1} = I_{я2} = I_{я3} = I_{я4} = 565\ A$.

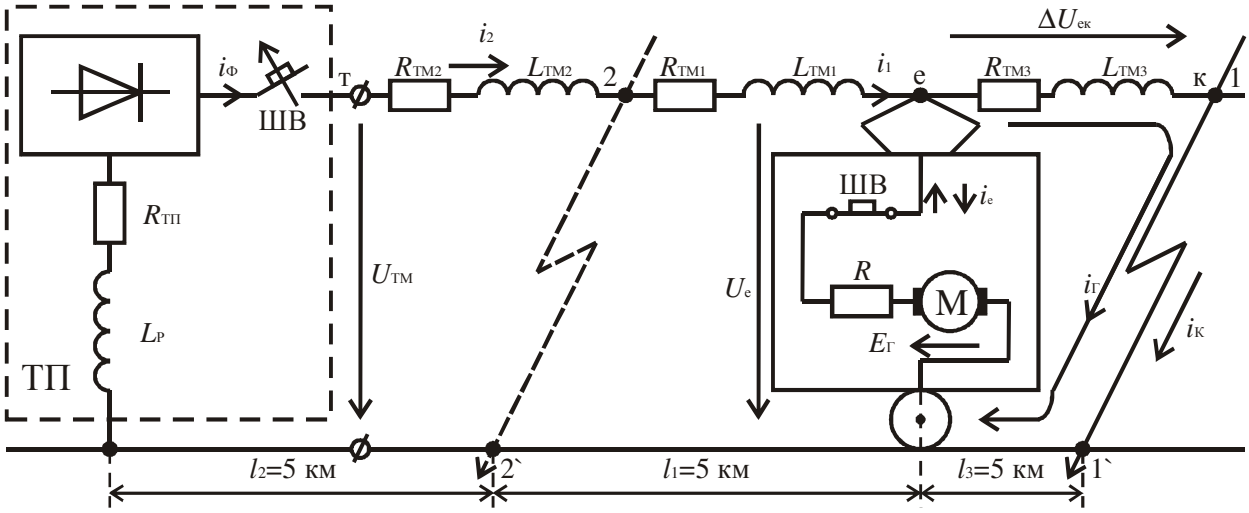


Рисунок 4.160 – Схема КЗ в ТМ при односторонньому живленні

Математична модель цього режиму на «СП»-з'єднанні являє собою систему рівнянь:

$$\left(R_{\text{т1}} + R_{\text{пс1}} + R_{\text{зр1}} + R_{\text{р1}} + R_{\text{о1}} + R_{\text{ТМ1}} + R_{\text{ТМ2}}\right) \cdot i_{\text{ф}} + \left(L_{\text{т1}} + L_{\text{зр1}} + L_{\text{р1}} + L_{\text{о1}} + L_{\text{ТМ1}} + L_{\text{ТМ2}}\right) \times$$

$$\times \frac{di_{\text{ф}}}{dt} + R_{\text{іш1-1}} \cdot i_{\text{іш1-1}} + L_{\text{іш1-1}} \frac{di_{\text{іш1-1}}}{dt} + R_{\text{іш1-2}} \cdot i_{\text{іш1-2}} + L_{\text{іш1-2}} \frac{di_{\text{іш1-2}}}{dt} = e_{\text{пс}}(t); \qquad (4.119)$$

$$\left(R_{\text{ТМ3}} + R_{\text{р3}}\right) \cdot i_{\text{к}} + L_{\text{ТМ3}} \frac{di_{\text{к}}}{dt} - 2\left(R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{з}}\right) \cdot i_{\text{я1}} - 2L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я1}}}{dt} -$$

$$-2p\sigma_{\text{з}}\omega_{\text{з}} \frac{d}{dt}\left(\Phi_1 + \Phi_2\right) = C_{\text{w}}\omega\left(\Phi_1 + \Phi_2\right); \qquad (4.120)$$

$$\left(R_{\text{ТМ3}} + R_{\text{р3}}\right) \cdot i_{\text{к}} + L_{\text{ТМ3}} \frac{di_{\text{к}}}{dt} - 2\left(R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{з}}\right) \cdot i_{\text{я2}} - 2L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я2}}}{dt} -$$

$$-2p\sigma_{\text{з}}\omega_{\text{з}} \frac{d}{dt}\left(\Phi_3 + \Phi_4\right) = C_{\text{w}}\omega\left(\Phi_3 + \Phi_4\right); \qquad (4.121)$$

$$\left(R_{\text{ТМ3}} + R_{\text{р3}}\right) \cdot i_{\text{к}} + L_{\text{ТМ3}} \frac{di_{\text{к}}}{dt} - 2\left(R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{з}}\right) \cdot i_{\text{я3}} - 2L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я3}}}{dt} -$$

$$-2p\sigma_{\text{з}}\omega_{\text{з}} \frac{d}{dt}\left(\Phi_5 + \Phi_6\right) = C_{\text{w}}\omega\left(\Phi_5 + \Phi_6\right); \qquad (4.122)$$

$$\left(R_{\text{ТМЗ}}+R_{\text{рз}}\right)\cdot i_{\text{к}}+L_{\text{ТМЗ}}\frac{di_{\text{к}}}{dt}-2\left(R_{\text{я}}+R_{\text{дп}}+R_{\text{ко}}+R_{\text{з}}\right)\cdot i_{\text{я4}}-2L_{\text{я}}\frac{di_{\text{я4}}}{dt}-$$

$$-2p\sigma_{\text{з}}\omega_{\text{з}}\frac{d}{dt}\left(\Phi_7+\Phi_8\right)=C_{\text{w}}\omega\left(\Phi_7+\Phi_8\right); \qquad (4.123)$$

$$i_{\text{ф}}+i_{\text{я1}}+i_{\text{я2}}+i_{\text{я3}}+i_{\text{я4}}-i_{\text{к}}=0. \qquad (4.124)$$

Розглядувану систему (4.119)-(4.124) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53) і рівняннями ЕРС (4.11)-(4.13).

Результати чисельних розрахунків представлено на рис. 4.161.

При виникненні КЗ «за ЕРС», тобто в точках 1-1`, ЕРС як навантаження шунтується, обумовлюючи протікання, з поступовим зростанням, струму КЗ $i_{\text{к}}$ (рис. 4.161, а); різко збільшується й фідерний струм $i_{\text{ф}}$. В результаті падіння $\Delta U_{\text{ек}}$ зростає і напруга на ЕРС з початкового $U_{\text{e}}^{\text{Н}}$, рівного 3,0 кВ, знижується до якогось $U_{\text{e}}^{\text{К}}$ (в усталеному режимі КЗ); плавно знижується й струм i_{e} ЕРС (рис. 4.161, а). При досягненні фідерним струмом i_{Φ} своєї уставки вимикається ШВ ТП, у результаті відбувається повне зняття живлення напруги від ТП. Струм ЕРС i_{e} (і фідерний струм i_{Φ}) різко знижується, що спричиняє зменшення струму збудження й магнітного потоку Φ тягових двигунів ЕРС. Однак зменшення основного $\Phi(t)$ відбувається повільно внаслідок протидії вихрових струмів магнітопроводів двигунів. За термін часу перехідного процесу швидкість руху ЕРС, а значить і частота обертання якорів тягових двигунів практично не змінюється. Внаслідок цього протягом деякого терміну часу проти-е.р.с. двигунів перевищує напругу $U_{\text{e}}^{\text{К}}$, а, у свою чергу, $U_{\text{e}}^{\text{К}}$ стає більше $\Delta U_{\text{ек}}$. В результаті проти-е.р.с. стає «генераторною» е.р.с. $E_{\text{г}}$, обумовлюючи протікання струму $i_{\text{г}}$ по ТМ і ЕРС, який спочатку збільшується до максимуму, а потім повільно, як і струм $i_{\text{к}}$, зменшується до нуля, підтримуючи спадання Φ й $E_{\text{г}}$ (рис. 4.161, а) [251].

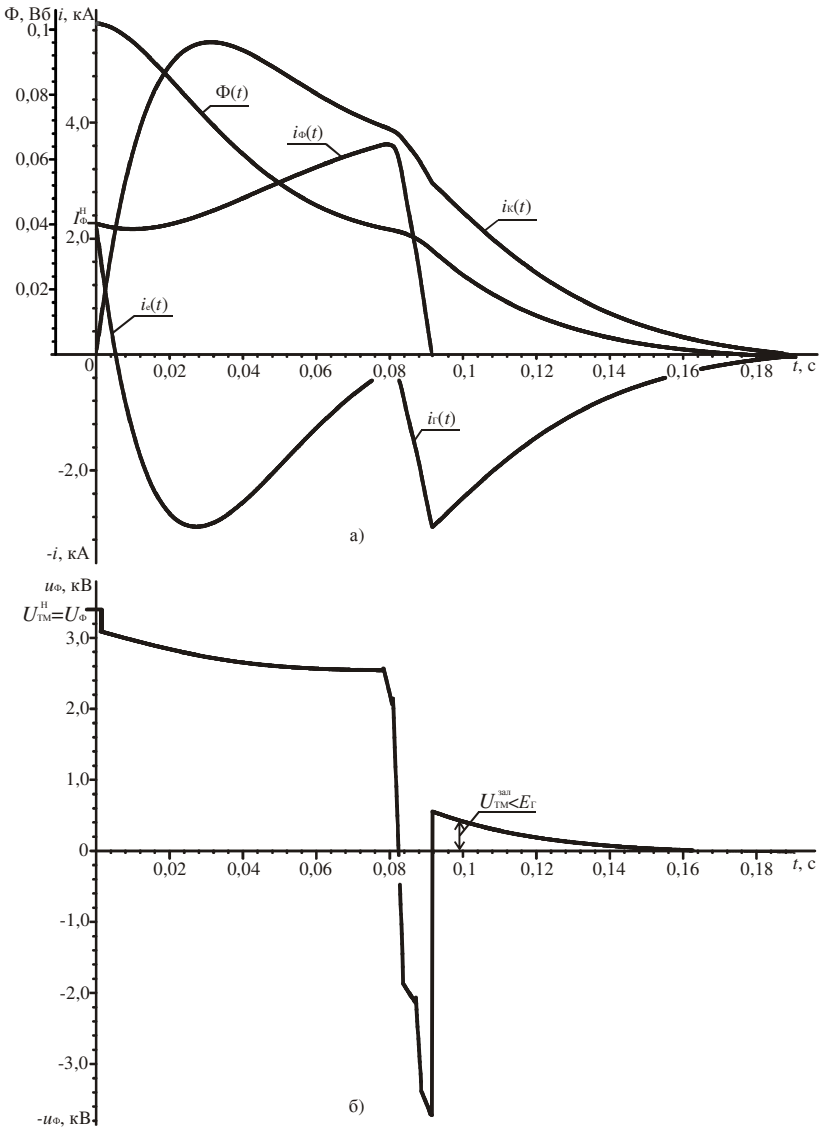
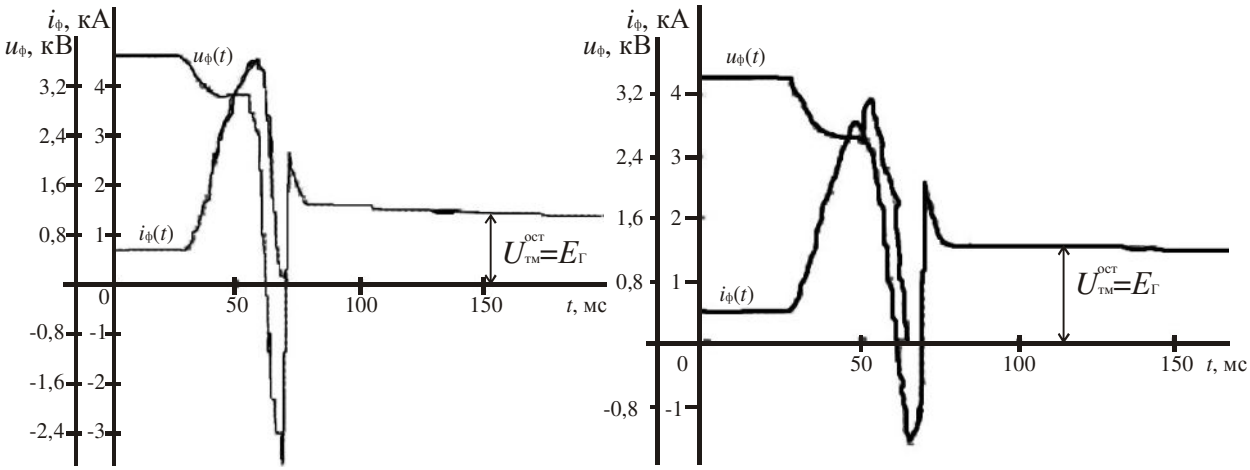


Рисунок 4.161 – Часові залежності перехідних електричних величин при КЗ в ТМ з одностороннім живленням

Одночасно, після повного вимикання ШВ ТП фідерний струм i_{Φ} різко знижується до нуля (рис. 4.161, а) й тим самим зменшується до нуля напруга $\Delta U_{\text{ек}}$ на ділянці тягової мережі. В результаті вихідна напруга $U_{\text{ТМ}}$, яка до КЗ дорівнювала ~3,4 кВ, різко зменшившись разом з i_{Φ}, після досягнення $i_{\Phi}=0$ починає різко зростати. Зробивши невеликий кидок (збільшення за рахунок е.р.с. індуктивності кола, що розривається), $U_{\text{ТМ}}$ зменшується на короткий термін часу до значення $U_{\text{ТМ}}^{\text{зал}}$, яка триває 0,5…2,5 с; назвемо цю напругу «залишковою напругою». Вона обумовлена і тому дорівнює ще діючій генераторній е.р.с. $E_{\text{г}}$ двигунів ЕРС, рівній $E_{\text{г}}=C_{\text{е}}\omega\Phi$, і яка обов'язково ме-

нше $U_{\text{ТМ}}^{\text{Н}}$ внаслідок зменшення Ф ($U_{\text{ТМ}}^{\text{зал}} \le 0{,}5E_{\Gamma}$). З часом $\Phi(t)$ загасає, $E_{\text{г}}$ зменшується і $U_{\text{ТМ}}^{\text{зал}}$ спадає до нуля (рис. 4.161, б) [220, 259].

Підтвердженням наведеної на рис. 4.161, б розрахункової зміни напруги $U_{\text{ТМ}}$ є осцилограми на рис. 4.162 [33].



а) б)

Рисунок 4.162 – Осцилограми процесів вимикання КЗ в ТМ ШВ на різних ТП [33]

При КЗ в точках 2-2`, тобто перед ЕРС (рис. 4.160), напруга $U_{\text{ТМ}}$ після вимикання ШВ ТП спадає до нуля, тому що ЕРС зашунтований і генераторна е.р.с. двигунів не може підтримувати $U_{\text{ТМ}}$.

4.7.2 Одностороннє живлення, коротке замикання на електровозі

В момент КЗ в ЕРС за його ШВ (рис. 4.163) відбувається кидок струму $i_{\text{е}}$ ЕРС і змінюється i_{Φ} (рис. 4.164). В результаті ШВ ЕРС вимикається по причині досягнення струму уставки або спрацьовування диференційного реле, а ШВ ТП – не спрацьовує. Наприклад, для ШВ електровоза ДЕ1 уставка становить 2500 А, а для ШВ ТП мінімальна величина уставки дорівнює 3300 А.Різке збільшення струму фідера i_{Φ} обумовлює таке ж збільшення спадання напруги $U_{\text{те}}$ на ділянці «те» ТМ (рис. 4.163), що, у свою чергу, обумовлює

також швидке зменшення на невелику величину живлячої напруги $U_{\text{ТМ}}$ (рис. 4.164) відповідно до рівняння:

$$U_{\text{ТМ}} = U_{\text{те}} + U_{\text{е}}$$

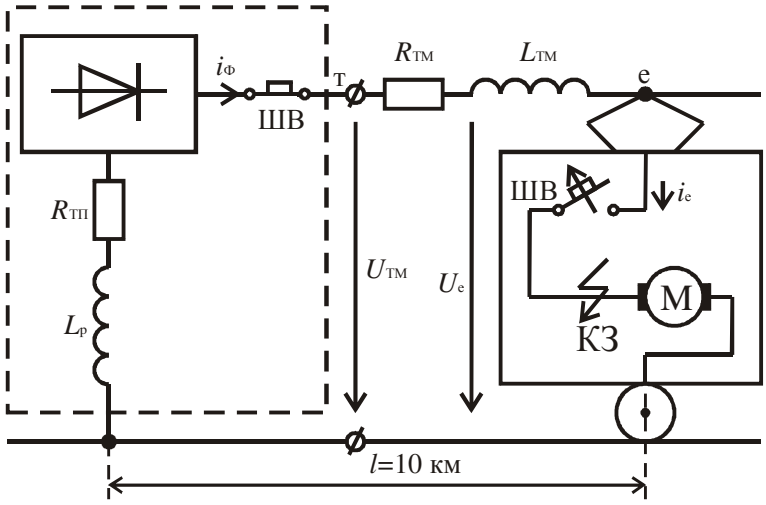


Рисунок 4.163 – Схема КЗ в ЕРС при односторонньому живлені ТМ

Моделювання режиму внутрішнього КЗ в ЕРС на якорі одного з ТЕД виконували для умов, коли електровоз серії ДЕ1 в початковий момент часу рухався на ходовій позиції «П»-з'єднання, початковий струм якоря складав $I_{\text{я1}} = I_{\text{я2}} = I_{\text{я3}} = I_{\text{я4}} = 565\ A$; результати представлені на рис. 4.164.

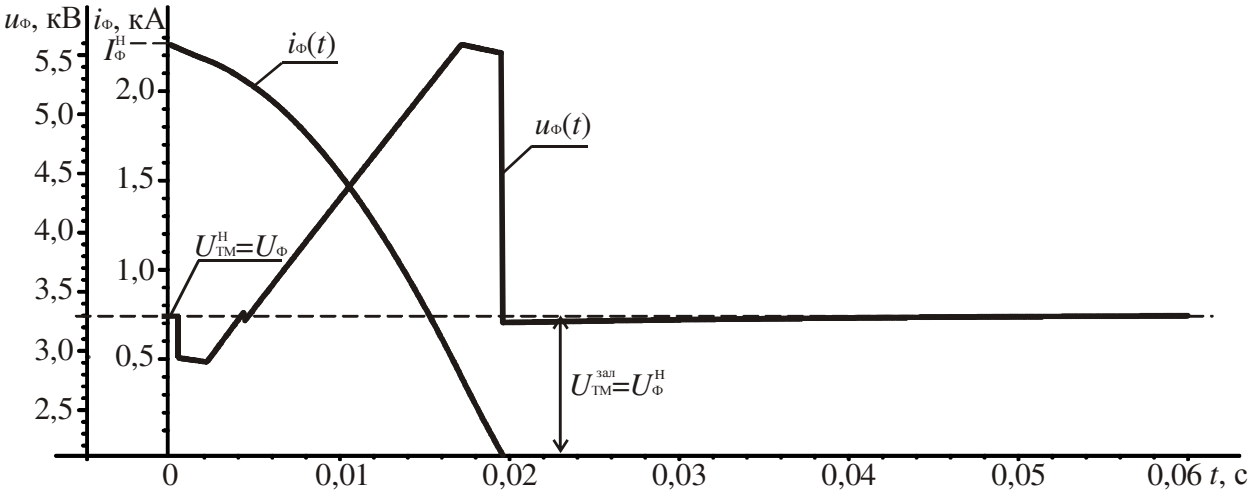


Рисунок 4.164 – Часові залежності перехідних електричних величин при КЗ в ЕРС з одностороннім живленням фідерної зони

Після повного розриву кола шляхом вимикання ШВ ЕРС і зниження i_{Φ} до нуля напруга $U_{\text{ТМ}}$ після невеликого кидка відновлюється до колишнього

(до КЗ) рівня, рівного початковому $U_{\Phi} = U_{\text{ТМ}}^{\text{Н}} \approx 3{,}3\ кВ$ (рис. 4.164), про що свідчить й експериментально отримані осцилограми (рис. 3.41; 4.165; 4.166), тобто «залишкова напруга»: $U_{\text{ТМ}}^{\text{зал}} = U_{\Phi}^{\text{Н}} = U_{\text{ТМ}}^{\text{К}}$.

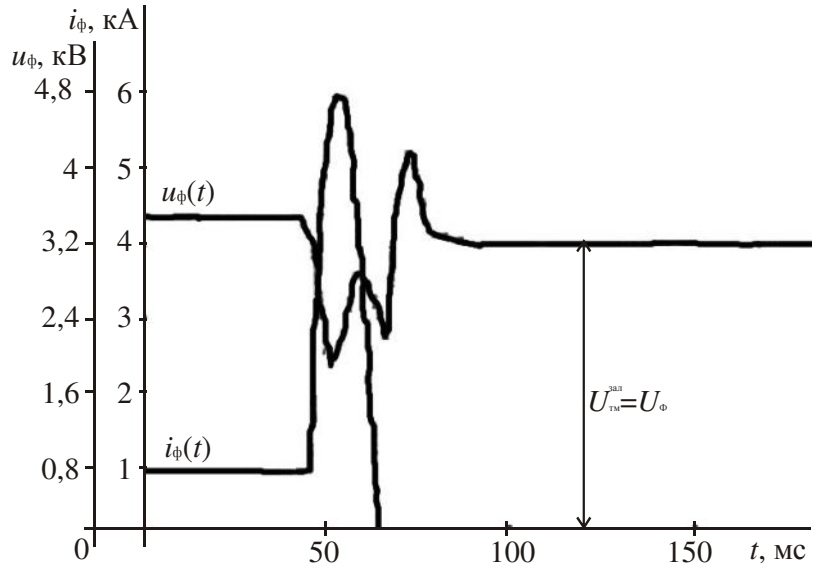


Рисунок 4.165 – Осцилограми процесів вимикання КЗ в ЕРС ШВ на ТП [33]

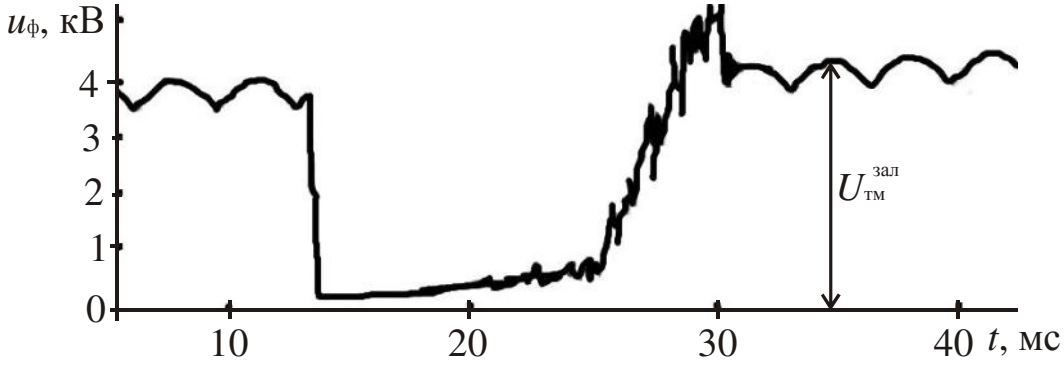


Рисунок 4.166 – Осцилограми вимикання усталеного струму КЗ при $L_{\Sigma} = 0{,}4\ мГн$ вимикачем Ge Rapid 4207 2×453 (за даними [72])

4.7.3 Двостороннє живлення, коротке замикання в тяговій мережі

Насамперед зауважимо, що КЗ у ТМ при наявності ЕРС на фідерній зоні є найбільш важким режимом для вимикання ШВ ТП. При цьому характер зміни перехідних величин у системі електричної тяги залежить від місця розташування ЕРС на міжпідстанційній зоні, тобто від відстаней l_1 і l_2 (рис. 4.167).

Нехай $l_1 < l_2$, тобто ЕРС розташований на невеликій відстані від ТП1, а КЗ відбулося у точці 1-1` (рис. 4.167).

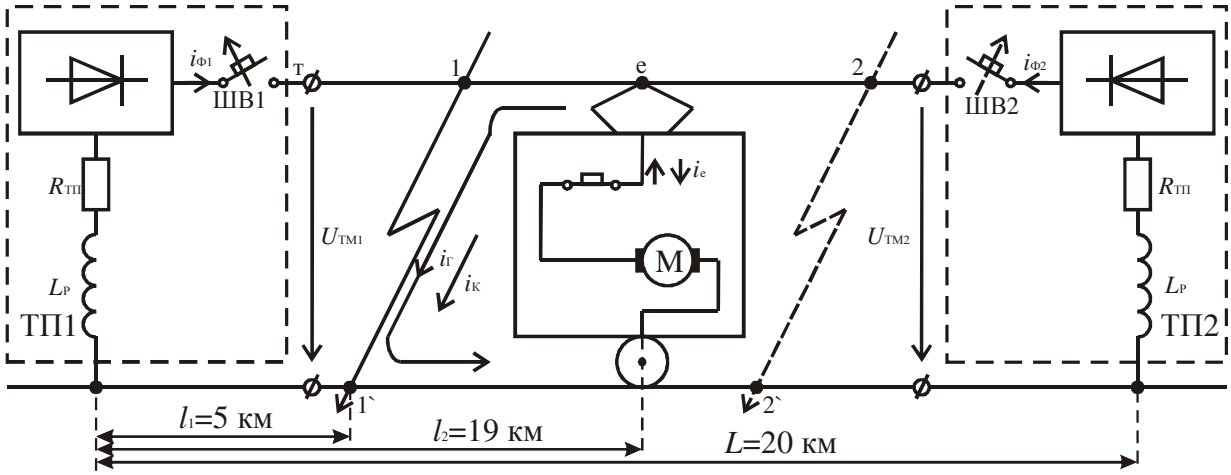


Рисунок 4.167 – Схеми КЗ в ТМ при її двосторонньому живлені

Математична модель розглядуваного режиму являє собою систему рівнянь (4.7)-(4.13), а електровоз ДЕ1 по фідерній зоні в початковий момент виникнення КЗ рухався за тих же умов, що і у п. 4.7.1; результати розрахунку представлені на рис. 4.168.

У результаті фідерний струм $i_{Ф1}$ ТП1 різко, майже лінійно, зростає й швидко досягає своєї уставки, тим самим обумовлюючи вимикання ШВ1. Внаслідок цього виникає перехідний процес перерозподілу навантаження (струму) з фідера ТП1, що вимикається, на фідер ТП2, струм $i_{Ф2}$ (рис. 4.168, а) якого, хоча повільніше, ніж $i_{Ф1}$ (рис. 4.168, а), але зростає з моменту КЗ. Якщо в результаті такого перерозподілу буде досягнуте значення струму уставки фідера ТП2, то відбудеться вимикання його ШВ2. Практика показує, що, як правило, це відбувається, тобто фідерна зона в розглянутому режимі вимикається із двох боків. В результаті ЕРС переходить у генераторний режим, напруга $U_{ТМ1}$ спадає до нуля (рис. 4.168, б), а $U_{ТМ2}$ після деякого зменшення і наступного зростання кидком поступово зменшується і на короткий час встановлюється стає менше $E_Г$, тобто $U_{ТМ2}^{зал} < E_Г$ (рис. 4.168, б). Через час 0,5…2,5 с, коли енергії електровозу вивільниться через точку КЗ, $U_{ТМ2}$ спаде до 0 ($U_{ТМ2}^{зал} = 0$).

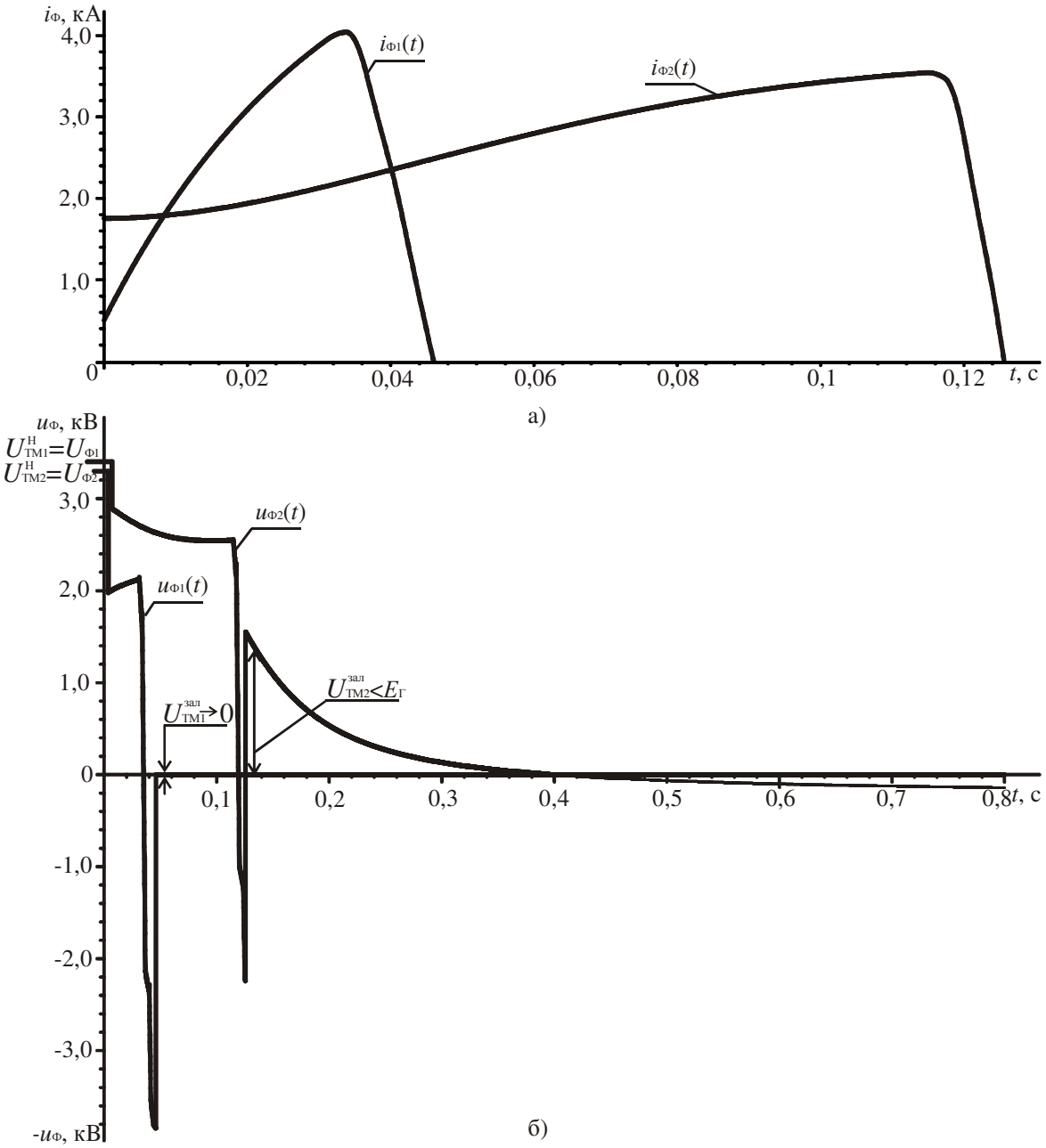


Рисунок 4.168 – Часові залежності перехідних електричних величин при КЗ в ТМ з двостороннім живленням фідерної зони

Якщо струм КЗ $i_К$, а значить і фідерний $i_{Ф2}$, недостатній для вимикання ШВ2 і він не вимикається, тоді струм $i_е$ ЕРС знову стає тяговим, зростаючи до величини, обумовленої напругою на струмоприймачі, а $U_{ТМ2}$ після невеликого зменшення потім зростає до величини $U^{зал}_{ТМ2}=U^Н_Ф-\Delta U_{ТМ}$. Розглядувані вище результати математичного моделювання підтверджують також осцилограми на рис. 4.169

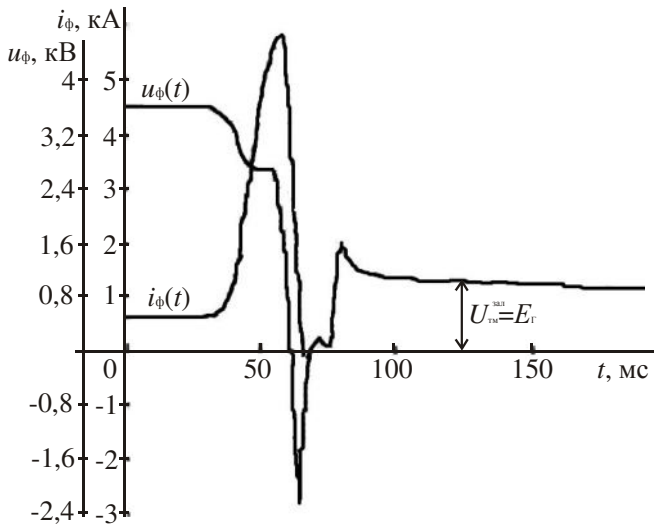


Рисунок 4.169 – Осцилограми процесів вимикання КЗ в ТМ ШВ на ТП [33]

В ситуації, коли $l_1 > l_2$, тобто ЕРС розташований на невеликій відстані від ТП2, а КЗ відбувається в точках 2-2` (рис. 4.167), використовуючи ті ж міркування, що й у випадку коли $l_1 < l_2$, одержимо, що $U_{\text{ТМ2}}^{\text{зал}} = 0$, а $U_{\text{ТМ1}}^{\text{зал}} < E_{\text{Г}}$.

4.7.4 Двостороннє живлення, коротке замикання на електровозі

Також як і у випадку одностороннього живлення, при двосторонньому (рис. 4.170) в момент КЗ струм ЕРС різко зростає $i_{\text{е}}$, його величина досягає струму уставки ШВ ЕРС і останній вимикається (ШВ ЕРС може вимикатися по причині спрацьовування диференціального реле), а ШВ ТП залишаються увімкненими з тих же міркувань, що наведено в п. **4.7.2.** В результаті, як і у випадку одностороннього живлення, $U_{\text{ТМ1}}^{\text{зал}} = U_{\text{Ф1}}$ і $U_{\text{ТМ2}}^{\text{зал}} = U_{\text{Ф2}}$ (рис. 4.171, 4.172). Результати математичного моделювання (рис. 4.171) підтверджуються осцилограмами (рис. 4.172).

У випадку, коли ЕРС розташований, наприклад, поблизу ТП1, тоді при КЗ різко зростають фідерний струм $i_{\text{Ф1}}$ ТП1 і струм $i_{\text{е}}$ ЕРС. При досягненні уставок ШВ ТП1 і ЕРС останні вимикаються. В результаті напруга $U_{\text{ТМ1}}$ в момент КЗ спочатку різко знижується на невелику величину, а потім швидко зростає й після невеликого кидка стає рівним $U_{\text{ТМ2}}$, яке після такої ж зміни, як й $U_{\text{ТМ1}}$, стає рівним $U_{\text{Ф2}}^{\text{Н}} = 3{,}3\ кВ$ (рис. 4.171, 4.172).

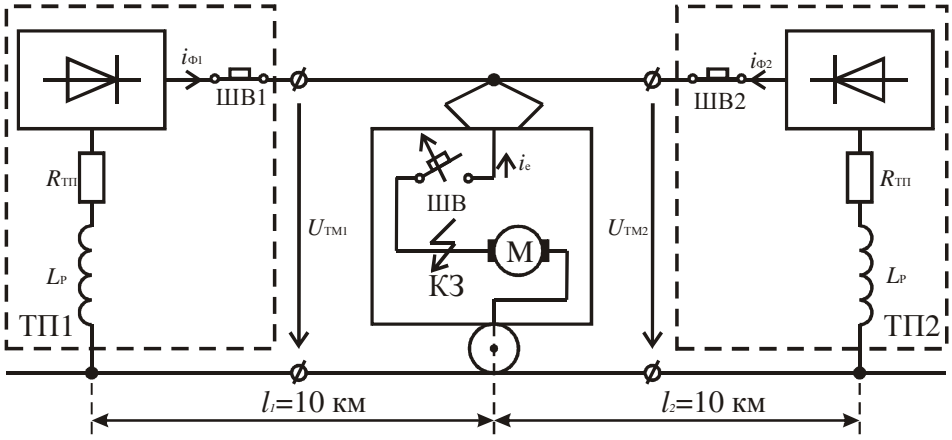


Рисунок 4.170 – Схема виникнення КЗ в ЕРС при двосторонньому живлені ТМ

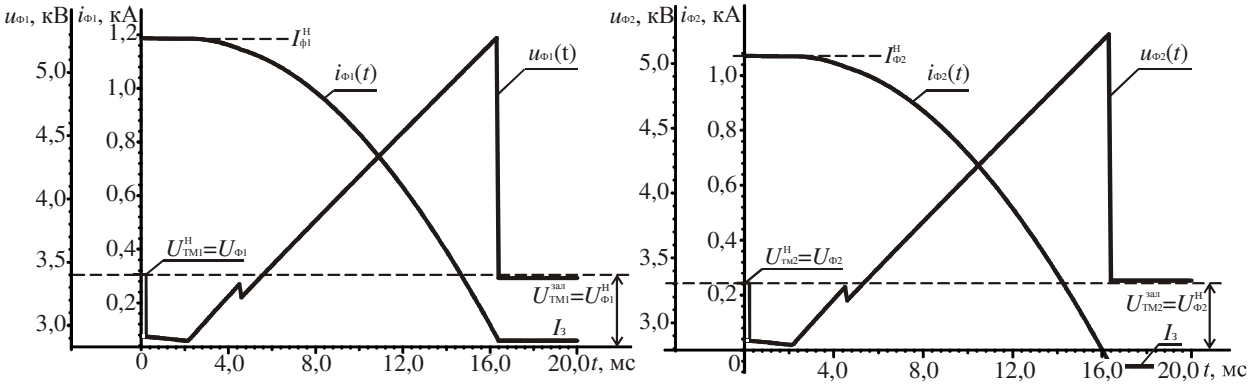


Рисунок 4.171 – Часові залежності перехідних електричних величин при КЗ в ЕРС з двостороннім живленням фідерної зони

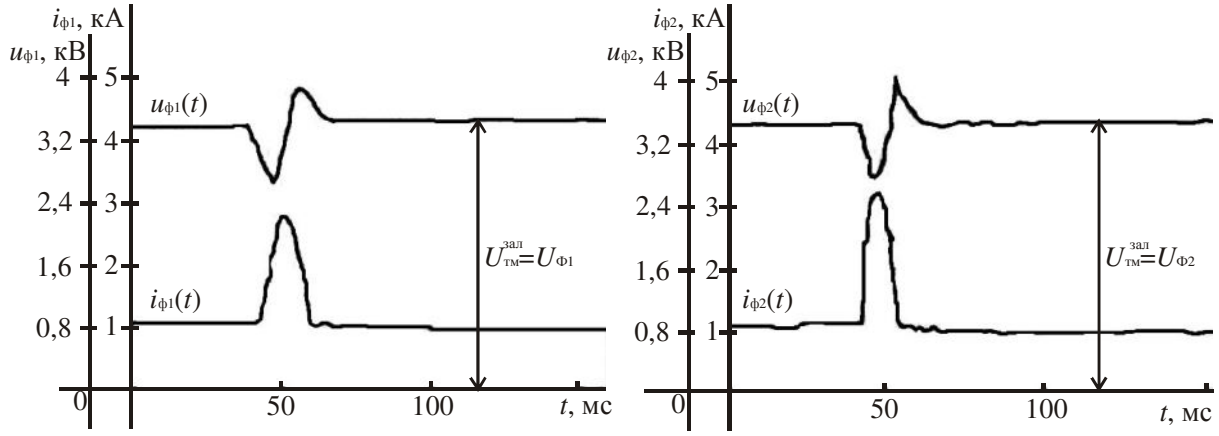


Рисунок 4.172– Осцилограми перехідних електричних величин на різних ТП в процесі вимикання КЗ в ЕРС [33]

Аналогічно, якщо ЕРС розташовано поблизу ТП2, то вимикаються ШВ2 і ШВ ЕРС й, міркуючи аналогічно попередньому, одержимо, що $U^{зал}_{ТМ1}=U^{зал}_{ТМ2}=U^Н_{Ф1}=3{,}3\,кВ$.

Таким чином, значення напруги в ТМ з боку колії фідерної зони, тобто «залишкова напруга» $U^{зал}_{ТМ}$:

а) при КЗ у ТМ дорівнює генераторній е.р.с. $E_{\text{Г}}$ тягових двигунів ЕРС і не перевищує $0{,}5U_{\text{ТП}}^{\text{ном}}$;

б) при КЗ в ЕРС величина $U_{\text{ТМ}}^{\text{зал}}$ дорівнює $U_{\text{ТП}}^{\text{ном}}$, тобто фідерній напрузі.

Тривалість наявності й зменшення $E_{\text{Г}}$, а значить $U_{\text{ТМ}}^{\text{зал}}$, визначається терміном часу загасання $\Phi(t)$ двигунів ЕРС і, як показують експериментальні дослідження [15] і теоретичні розрахунки [251], він складає від 0,5 до 2,5 с.

Отже, $U_{\text{ТМ}}^{\text{зал}}$ може бути ознакою розпізнавання підсистеми з КЗ, для чого може бути розроблена мікропроцесорна система для енергодиспетчера.

4.8 Коротке замикання чи перенавантаження тягової мережі

Нижче обґрунтовуються ознаки, на основі яких може бути створена інформаційна система, яка б свідчила про те, що має місце в ТМ: тягове перенавантаження чи КЗ [220, 259].

Як відомо, найпростіша схема кола вимикання ШВ на ТП при КЗ в ТМ має вигляд (рис. 4.173), а рівняння перехідного процесу вимикання:

$$Ri_{\text{к}}(t) + L\frac{di_{\text{к}}}{dt} + u_{\text{д}}^{\text{к}}(t) = U_{d0}, \qquad (4.125)$$

де R, L – еквівалентні активний опір та індуктивність ТП і ТМ;

U_{d0} – фідерна напруга в режимі холостого ходу;

$u_{\text{д}}^{\text{к}}(t)$ – спад напруги на ШВ при його вимиканні, нехай $u_{\text{д}}^{\text{к}}(t) = b \cdot t$.

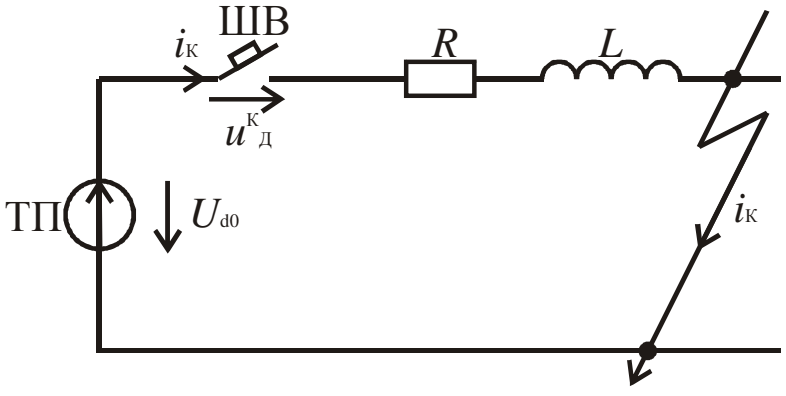


Рисунок 4.173 – Найпростіша схема виникнення КЗ в ТМ

Розв'язавши (4.125), отримаємо $i_{к}(t)$ і $u_{д}^{к}(t)$; їх осцилограми, що отримані експериментально на одній із діючих ділянок при вимиканні близького КЗ ШВ 2×ВАБ-49, представлені на рис. 3.2.

Крім того, із (4.125) випливає, що $u_{д}^{к}(t)$ обумовлена напругою U_{d0}:

$$u_{д}^{к}(t)\Big|_{t=0} = b \cdot t\Big|_{t=0} \approx U_{d0} - \left(Ri_{к}(t) + L\frac{di_{к}}{dt} \right). \qquad (4.126)$$

Найпростіша схема кола при вимиканні ШВ на ТП у випадку тягового перевантаження представлена на рис. 4.174:

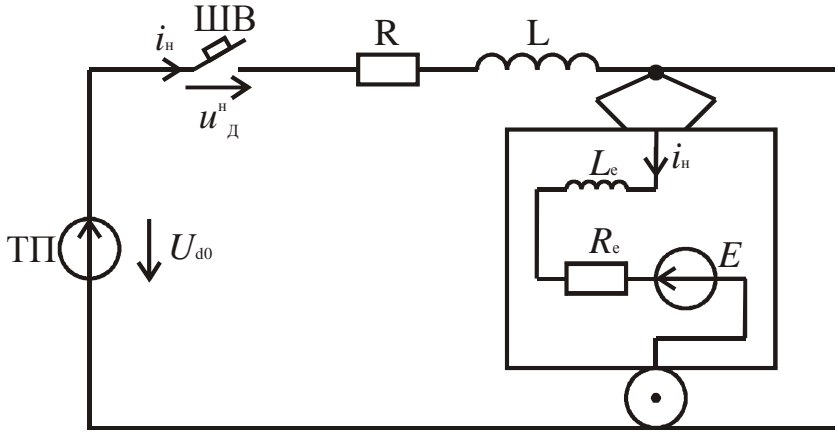


Рисунок 4.174 – Схема вимикання ШВ ТП при тяговому перевантаженні в ТМ

Тоді рівняння перехідного процесу:

$$\left(R + R_{e}\right)i_{н}(t) + \left(L + L_{e}\right)\frac{di_{н}}{dt} + u_{д}^{н}(t) = U_{d0} - E, \qquad (4.127)$$

де R_{e}, L_{e} – активний опір та індуктивність ЕРС; E – проти-ЕРС ТЕД.

Розв'язавши (4.127), отримаємо $i_{н}(t)$ та $u_{д}^{н}(t)$, а отже $U_{д\,max}^{н}$, подібно $U_{д\,max}^{к}$ (рис. 3.2, а). Крім того, із (4.127) випливає, що $u_{д}^{н}(t)$ визначається меншою, ніж U_{d0}, напругою $U_{d0} - E$:

$$u_{д}^{н}(t)\Big|_{t=0} \approx U_{d0} - E - \left(\left(R + R_{e}\right)i_{н}(t) + \left(L + L_{e}\right)\frac{di_{н}}{dt} \right). \qquad (4.128)$$

Отже, зазначені вище аналіз і розсуди, які можна підтвердити розрахунками перехідного процесу (на моделях) або експериментальними дослідженнями, перехідного процеси вимикання ШВ дозволяють стверджу-

вати, що: а) максимальні значення напруги на ШВ ТП, тобто $U_{\text{д max}}$, безпосередньо після вимикання цього ШВ (при $i=0$) різні при вимиканні КЗ чи перевантажені, при цьому $U^{\text{н}}_{\text{д max}} < U^{\text{к}}_{\text{д max}}$, бо після вимикання КЗ до ШВ на протязі деякого часу буде прикладена напруга U_{d0}, а при вимиканні перевантаження – буде прикладена $U_{d0} - E$, яка значно менше U_{d0}; б) вимикання КЗ відбувається довше, ніж вимикання перевантаження, бо постійна часу кола з КЗ $\left(\tau_{\text{к}} = \dfrac{L}{R}\right)$ більша, ніж кола при перевантаженні $\left(\tau_{\text{н}} = \dfrac{L + L_{\text{е}}}{R + R_{\text{е}}}\right)$.

Таким чином, шляхом вимірювання: а) максимального значення напруги на ШВ ТП $U_{\text{д max}}$ одразу ж після вимикання аварійного струму ($i=0$) і б) тривалості вимикання ШВ можна правильно встановити, це було КЗ в ТМ чи перевантаження й тим самим прийняти правильне рішення про можливість і доцільність автоматичного повторного вмикання (АПВ).

4.9 Висновки до розділу 4

1. Режим короткого замикання в системі електричної тяги з електрорухомим складом є найбільш тяжким для систем захисту, що встановлені на міжпідстанційній зоні.

2. Методом селективного визначення електротягової підсистеми з коротким замиканням (тягова мереж чи електровоз) може служити теоретично і експериментально обґрунтований в цій роботі так званий метод «залишкової напруги», який базується на таких ознаках:

− при короткому замиканні в тяговій мережі значення напруги в тяговій мережі з боку фідерної зони в кінці перехідного процесу на короткий термін часу (до 2,5 с), назвемо цю напругу «залишковою», дорівнює генераторній е.р.с. тягових двигунів ЕРС;

− при короткому замиканні в електрорухомому складі ця «залишкова напруга» стає рівною (відновлюється) початковому значенню фідерної напруги (3,3 кВ).

3. Теоретично обґрунтованими ознаками перехідного процесу вимикання швидкодіючих вимикачів, на основі яких можливо встановлення, було перевантаження тягової мережі чи коротке замикання в ній, є максимальне значення напруги на швидкодіючому вимикачі тягової підстанції $U_{\text{д max}}$ безпосередньо після його вимикання і тривалості $t_{\text{вим}}$ цього вимикання: при перевантаженні $U_{\text{д max}}$ і $t_{\text{вим}}$ менші, ніж при короткому замиканні.

4. Режими короткого замикання в тяговій мережі (чи в електрорухомому складі) постійного струму супроводжуються різкими зниженнями напруги на струмоприймачі електрорухомого складу $u_{\text{е}}(t)$, в результаті чого тягові двигуни електрорухомого складу, що рухається, переходять в генераторний режим, необхідною умовою виникнення якого є те, щоб результуюча генераторна е.р.с. $e_{\text{г}}(t)$ тягових двигунів (проти е.р.с. в тяговому режимі) перевищувала напругу на струмоприймачі: $u_{\text{е}}(t) < e_{\text{г}}(t)$. В пусковому режимі електровозів ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1, 2ЕЛ4 (на «С»-з'єднанні) при короткому замиканні напруга $u_{\text{е}}(t)$ різко зменшується з 3,3 кВ до 2,0…1,0 кВ, а на «СП»-з'єднанні $u_{\text{е}}(t)$ різко зменшується до 2450 В, а потім при перехідному процесі плавно зменшувалося до 2240 В в той час як $e_{\text{г}}(t)$ спадала від 2750 В до 2240 В, перевищуючи $u_{\text{е}}(t)$.

5. Імовірність переходу електричного локомотива в генераторний режим, максимальні значення $I_{\text{г max}}$ і тривалість $t_{\text{гр}}$ генераторних струмів залежать від схеми живлення, секціонування і параметрів тягової мережі, відстані від ЕРС до точки короткого замикання $l_{\text{ек}}$ і, строго кажучи, визначальним є значення спаду напруги $U_{\text{ек}}$ на цій ділянці (електрорухомий склад – точка короткого замикання). В режимі короткого замикання в тяговій мережі величина $I_{\text{г max}}$ і їх тривалість на повному полі при двосторонньому живленні досягають: у пусковому режимі – 760 А, 0,09…0,25 с; на «СП»-

з'єднанні – 3500 А, 0,06…0,13 с; на «П»-з'єднанні – 11500 А, 0,04…0,1 с. На «СП»-з'єднанні при вузловій схемі живлення $I_{\text{г max}} = 4800$ А, $t_{\text{гр}} = 0{,}07$ с.

6. В залежності від місця розташування ЕРС відносно точки короткого замикання, схеми з'єднання тягових двигунів («С», «СП», «П») і швидкості поїзда генераторний режим може зовсім не спостерігатися, а може тривати до 2 с. З набором позицій на контролері машиніста максимальне значення генераторного струму і струму короткого замикання збільшуються.

7. У випадку короткого замикання в тяговій мережі поблизу (~0,5 км) однієї тягової підстанції, наприклад, ТП1 фідерний струм цієї тягової підстанції, незалежно від схеми живлення, серії електровозу (ВЛ8, ВЛ10, ДЕ1, 2ЕЛ4) і схеми з'єднання («С», «СП», «П») тягових електричних двигунів, за термін часу 0,025…0,03 с досягає уставки (3500 А) і швидкодіючий вимикач ТП1 вимикається, а вимикач ТП2 залишається увімкненим. При цьому:

- при паралельній схемі секціонування ТП2 разом з електрорухомим складом, що перейшов у генераторний режим, продовжують підтримувати коротке замикання в тяговій мережі, що призводить до значних термічних пошкоджень контактної підвіски, оскільки струми короткого замикання (в закоротці) мають великі значення: 6600 А; 9100 А і 16800 А відповідно схем «С», «СП», «П». Лише при короткому замиканні десь по середині 10±5 км фідерної зони спрацьовують обидва швидкодіючих вимикача, однак коротке замикання тривалий час підтримується електровозом, що рухається на фідерній зоні і знаходиться в генераторному режимі;
- у випадку вузлової схемі секціонування, окрім вимикання швидкодіючих вимикачів ТП1, через 0,013…0,02 с спрацьовує і швидкодіючий вимикач поста секціонування, струм короткого замикання теж значний, 10200 А;
- у схемі з постами секціонування і пунктами паралельного з'єднання спочатку вимикається швидкодіючий вимикач ТП1, потім через 0,025 с

швидкодіючий вимикач поста секціонування і потім швидкодіючий вимикач пунктами паралельного з'єднання.

8. Різко нестаціонарний, найчастіше імпульсний, характер зміни фідерних і електровозних, особливо генераторних, струмів обумовлює різко коливальний характер зміни підстанційних напруг. Тривалість коливань невелика, 0,04…0,05 с, але спостерігається велика кількість стрибків напруги з великими максимальними значеннями: до 9100 В при вузловій схемі живлення і 7100 В – при паралельній, тривалість імпульсів цих максимумів – 3…5 мс.

9. Генераторні струми у режимах послаблення збудження ПЗ1…ПЗ4, у порівнянні з повним полем, у 3…6 разів триваліші і у 1,5…2,5 рази більші за максимальним значенням, що пояснюється швидкістю загасання $\Phi(t)$, а отже, і $e_{\text{г}}(t)$, внаслідок розряду індуктивного шунта через обмотку збудження.

10.Генеруючий електрорухомий склад є рухомим джерелом електромагнітної енергії, яке віддає до місця КЗ енергію руху поїзда. Чим ближче електрорухомий склад знаходиться до точки короткого замикання, тим більший за амплітудою і тривалістю виникає генераторний струм. Наприклад, для вузлової схеми живлення, на «СП»-з'єднанні електровозу ДЕ1 величини $I_{\text{г max}}$ і $t_{\text{гр}}$ склали: 1300 А і 0,037 с, при відстані $l_{\text{ек}} = 18{,}5$ км і 4700 А та 0,07 с при $l_{\text{ек}} = 1$ км. Це збільшує об'єм термічних і механічних пошкоджень при аварійних процесах в контактній мережі чи на електрорухомому складі.

11.З точки зору імовірності перепалу контактного проводу під час короткого замикання найбільш небезпечним є робота електрорухомого складу на «П»-з'єднанні (особливо з послабленням збудження), на якому електровоз незалежно від відстані електрорухомого складу до точки короткого замикання переходить в генераторний режим. На ходовій позиції «П»-з'єднання для електровоза серії ДЕ1 значення струму короткого замикання досягає 16,8 кА, а кількість електрики, що генерується електровозом на послаблені збудження ПЗ4, досягає величини $Q_{\text{г}} = 5882\, A \cdot c$, а в точці короткого замикання –

$Q_к = 8840,2\ A \cdot c$. Тобто, з великою імовірністю можна чекати перепалу контактного проводу.

12.Електромагнітні процеси в системі електротяги з різними серіями восьмивісних електровозів мають однаковий характер, але максимальні значення і генераторних струмів, і струмів КЗ у нових електровозів серій ДЕ1 і 2ЕЛ4 у 3,5…4,5 рази більші, ніж у ВЛ10 і ВЛ8, що пояснюється більшою потужністю сучасних локомотивів.

13.Режим внутрішнього короткого замикання тягових двигунів електрорухомого складу, створеного коловим вогнем на колекторі, який не перекидається дугою на тяговий електричний двигун, є занадто небезпечним для якоря закороченого двигуна, але не створює небезпеки для елементів системи тягового електропостачання, що обумовлено таким:

- на «СП»-з'єднанні, на повному полі, при розташуванні електрорухомого складу на 0,5 км від ТП1 струм в закороченому тяговому двигуні через 0,25 с після короткого замикання досягає значної величини, 5600 А, струм електровоза (з урахуванням в моделі системи тягового електропостачання, на відміну від існуючих робіт) зростає лише до 1470 А при уставці швидкодіючого вимикача електровоза 2500 А і тому цей швидкодіючий вимикач не спрацьовує і електровоз продовжує живитись від ТП1. Струм короткого замикання (в закоротці) досягає 6600 А. Фідерний струм не змінюється різко (напруги теж) і максимальні значення не перевищують 1200 А;
- у режимі П3-4, на «СП»-з'єднанні спостерігається значно більша нестаціонарність зміни напруги на тяговій підстанції, її амплітуди зростають до 6400 В (ТП1) і 5500 В (ТП2), але струм електровоза, хоч і досягає 2000 А, але це знову менше уставки; струм короткого замикання збільшується до 12080 А;
- режим «П»-з'єднання є більш небезпечним ніж «С» і «СП», струм короткого замикання зростає до 27500 А, струм електровоза зростає до 2500 А і його швидкодіючий вимикач вимикається, також спостеріга-

ється різкі зміни за 0,01 с напруги на електровозі з кидками до 5200 В і напруги на тяговій підстанції (до 6400 В), які залежать від початкових умов.

14.В режимі зовнішнього короткого замикання в тяговому електричному двигуні в найнебезпечнішому режимі працює якорь двигуна, послідовно з'єднаний із закороченим тяговим електричним двигуном: в електровозіх ДЕ1 і 2ЕЛ4 в цьому якорі через 2,2 мс після короткого замикання струм зростає до уставки 1900 А і швидкодіючий вимикач електровоза вимикається, в електровозі ВЛ10 уставка 3100 А і вона не досягається. Струм в закороченому якорі всіх серій електрорухомого складу (окрім ВЛ8) на повному полі досягає 1900 А, а в закортці: 4600 А – в ДЕ1, 5000 А – 2ЕЛ4, 2200 А – ВЛ8. Фідерні і підстанційні струми за максимальним значенням для всіх електровозів не перевищують 1400…2200 А, тобто, уставки не досягають і тому ШВ підстанцій не вимикаються. Однак в режимі короткого замикання спостерігаються різкі коливання напруги на тягових підстанціях: з амплітудою 6100 В на ТП1 (що знаходиться на відстані 0,5 км від електрорухомого складу) і 4900 В – ТП2. В режимі послаблення збудження фідерні струми зростають на 100…250 А, а напруги – на 450…500 В.

15.У разі перекриття дахового ізолятора на електровозі, що схематично являє собою режим короткого замикання в тяговій мережі, цей електровоз переходить в генераторний режим і струм в точці КЗ може досягати значення 10 кА. При цьому, незалежно від координати закороченого ЕРС, коротке замикання буде ліквідоване всіма швидкодіючими вимикачами фідерної зони, де виникло коротке замикання, і, звичайно, самого ЕРС. У випадку, якщо на міжпідстанційній зоні знаходиться ще один ЕРС, то ліквідація аварійного режиму буде тим швидше, чим меншою буде відстань між поїздами.

РОЗДІЛ 5

АВАРІЙНИЙ РЕЖИМ «ЗНЯТТЯ-ВІДНОВЛЕННЯ» НАПРУГИ НА СТРУМОПРИЙМАЧІ

5.1 Етапи і наслідки режиму «зняття-відновлення» напруги

Режим короткочасного зняття напруги на струмоприймачі ЕРС з наступним її відновленням спостерігається у випадках: відриву струмоприймача від контактного проводу під час руху поїзда внаслідок вібрації та коливання струмоприймача; при вимиканні фідера швидкодіючим вимикачем і його вторинному вмиканні пристроями АПВ; при проїзді повітряних проміжків в місцях секціонування контактної мережі; при наявності ожеледі, тощо. Найчастіше при експлуатації зустрічається перший випадок, тобто «опускання-піднімання» струмоприймача під навантаженням; його загальна тривалість складає від декількох десятих секунди до 1,5…2,0 с. Процес «відрив-піднімання» струмоприймача обумовлює такі стадії (етапи) режиму «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі (рис. 5.1) [260]: перша стадія – зняття напруги при наявності електричної дуги між струмоприймачем і контактним проводом (на початку відриву струмоприймача) (рис. 5.1, б); друга стадія – повне вимикання струмоприймача ЕРС від контактного проводу (тобто з моменту досягнення струмом ЕРС нуля) (рис. 5.1, в); третя стадія – відновлення напруги живлення (тобто з моменту доторкання струмоприймача до контактного проводу) (рис. 5.1, г).

Дослідження режим «зняття-відновлення» напруги, який відбувається в результаті «відриву-доторкання» струмоприймача важливо, виходячи із таких його наслідків:

а) появою кидків тягового струму в силових колах ЕРС і фідерних струмів ТП;

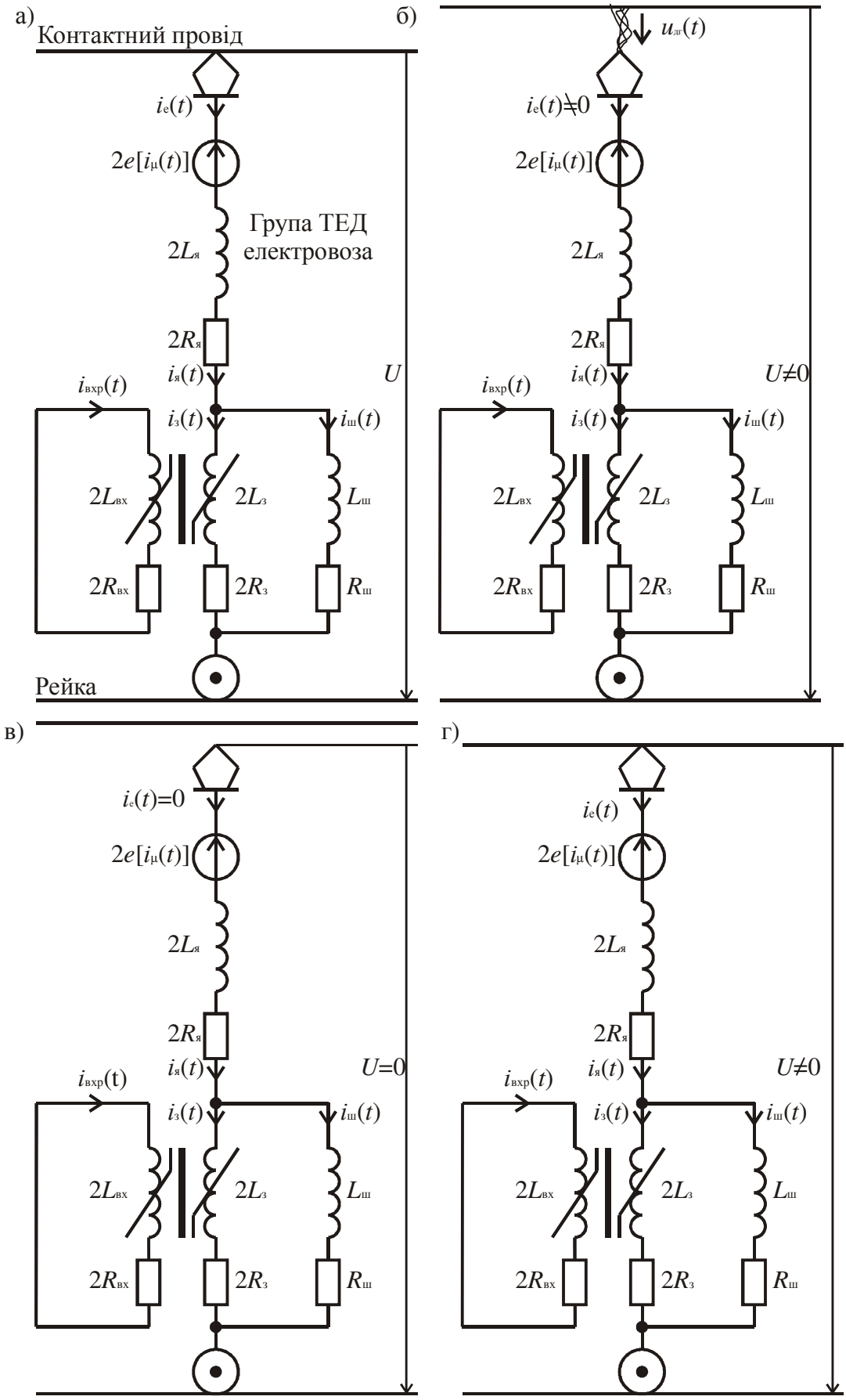


Рисунок 5.1 – Електричні схеми заміщення групи ТЕД електровозу ДЕ1 в різних стадіях режиму «відрив-доторкання» струмоприймача

б) небезпекою перепалу контактного проводу відкритою електричною дугою між струмоприймачем і контактним проводом;

в) електромагнітним впливом перехідних імпульсних напруг і струмів системи тяги на рейкові кола й кола сигналізації;

г) зниженням надійності контактної мережі.

Як показують дослідження [261, 262], контактні проводи є найбільш пошкоджуючими пристроями КМ. Кількість їхніх відмов у рік на 100 км у системі електротяги постійного струму України становить 16% (для порівняння, у Росії - 38%). Однією з головних причин цих відмов є перепал контактних проводів. При цьому до перепалу та віджигу проводів за допомогою виникаючої електричної дуги (рис. 5.2) веде неякісне струмознімання [263, 264], що обумовлює зокрема відрив (з наступним доторканням) струмоприймача від проводів. Контактний провід МФ-100 при струмах до 150...200 А нагрівається дугою, що виникла, деформується, розтягується й розривається через 4...2,5 с із утворенням довгої шийки [47]. При більших струмах на проводі утворюються кратери, і час перепалу зменшується, при розриві утворюється коротка шийка (рис. 5.2).

Рисунок 5.2 – Фото відриву струмоприймача від контактного проводу [265]

Як відомо [47, 266], імовірність і ступінь термічних ушкоджень проводів оцінюється ампер-секундами, тобто кількістю електрики (заряду) дуги. Для МФ-100 уже при 400 А·с можливі розриви проводів, а відносно допустимим значенням кількості електрики є 250 А·с і менше (рис 5.3) [47].

Якщо термін часу дії струму недостатній для того, щоб провід розірвався, на поверхні проводу з'являються кратери; зі збільшенням кількості ампер-секунд глибина проплавлення збільшується, а міцність при розтягуванні знижується. Для проводу МФ-100 при 250 А·с і більше з'являються значні кратери й невеликі шийки.

Особливо варто вказати на імовірність перепалу при опусканні струмоприймача під навантаженням; у середньому вона склала 0,39 [47]. Ця ймовірність залежить від робочого тягового струму і становить: 0,13 - при струмах 300...350 А; 0,29 - при 750 - 950 А и 0,75 - при 1350...1550 А.

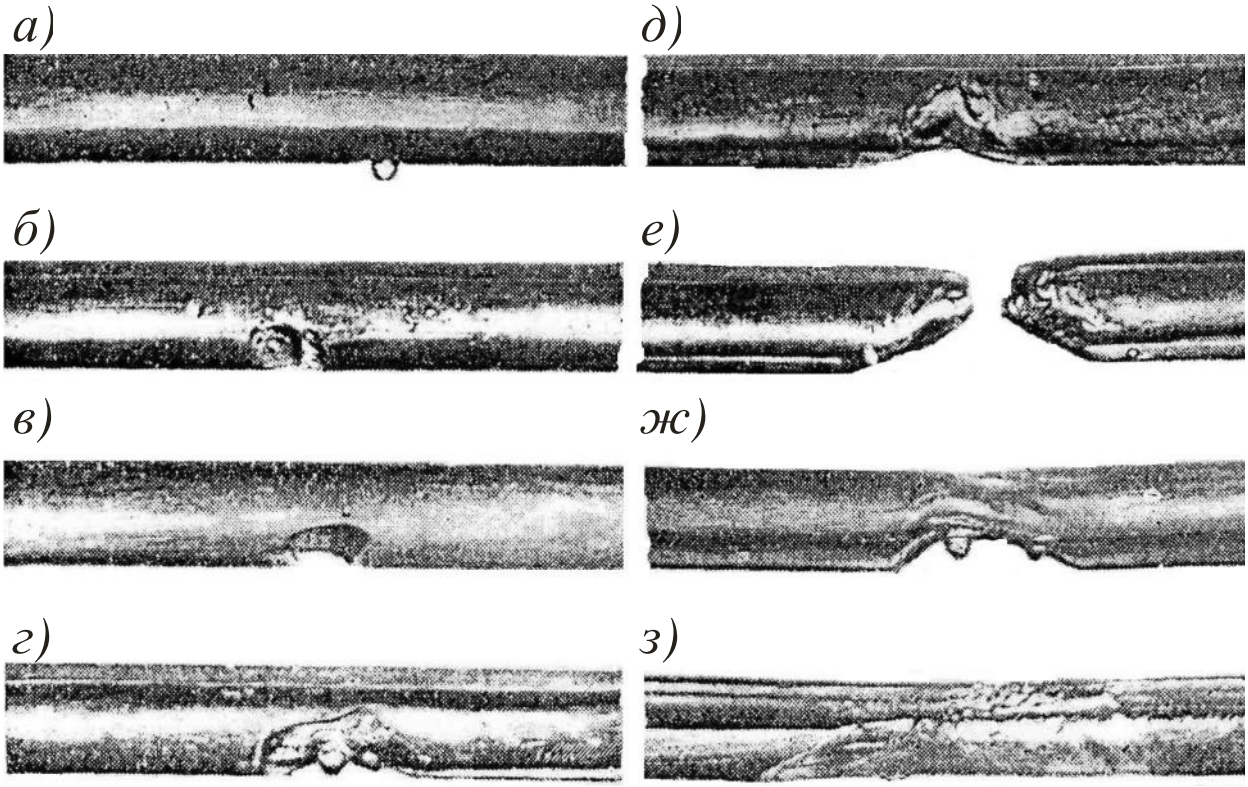


Рисунок 5.3 – Фото зразків мідного контактного проводу перерізом 100 мм^2 після впливу на нього дуги [47]: а – 39 А·с, струм 900 А; б – 78 А·с, струм 880 А; в – 172 А·с, струм 850 А·с; г – 240 А·с, струм 5850 А; д – 325 А·с, струм 3520 А; е – 416 А·с, струм 4650 А;ж – 605 А·с, струм 9000 А; з – 1090 А·с, струм 11500 А

Згідно з [9], частка перепалених контактних проводів над струмоприймачем у загальній кількості пошкоджень КМ на ділянках постійного струму

становить близько 50%. При цьому кількість перепалів і обривів (внаслідок раніше утворених кратерів і шийок (рис. 5.3)) коливається від 0,24 до 0,46 випадків у рік на кожні 100 км розгорнутої довжини КМ. Для електрифікованих ділянок наприклад, Придніпровської залізниці і усіх доріг Укрзалізниці аналогічні дані наведені в таблиці 5.1 [3-8, 267]. При цьому зауважимо, що на відновлення перепаленого (і обірваного) контактного проводу (тобто, на затримку поїзда) необхідно 3,5…4,0 години [268]. Вартість такого відновлення, включаючи економічні втрати від простою поїздів, досягає величини 25383,63 грн. (розрахунок для ділянки електрифікованої залізниці між ТП Нижньодніпровськ Вузол (ЕЧЕ-15) – Ілларіонове (ЕЧЕ-17) ДП «Придніпровська залізниця» приведено у розділі 6). І до цього треба додати, що з перепалом і обривом проводу, як правило, пошкоджується і струмоприймач ЕРС, який теж треба відновлювати, собівартість відновлення якого складає ~20 тис. грн.

Таблиця 5.1

Кількість перепалів проводів на електрифікованих залізницях постійного струму України

Перепали проводів, не включаючи нагрів під клемами (кількість/%)	Роки					
	2004	2005	2006	2007	2008	2009
По Придніпровській залізниці	1/2,7	8/22,86	2/4,3	6/15	2/6,26	4/10,8
По всім залізницям України	24/10,08	23/12,23	20/10,81	13/7,3	22/10,23	13/7,07

% - від загальної кількості пошкоджень КМ.

Кількість перепалів проводів на повітряних проміжках і секційних ізоляторах теж достатньо велика; виникають вони не тільки внаслідок утворення дуги робочого струму, але й дуги КЗ.

5.2. Режим пуску електровоза і набір позицій до ходової на «С»-з'єднанні

Як зазначалось у підрозділі 4.3.1, тривалий термін часу ведення поїзда здійснюється на «С» - з'єднанні ТЕД. Тому розрахуємо і проаналізуємо електромагнітні процеси в системі електротяги при знятті і наступному відновленні напруги на струмоприймачі в режимі пуску електровоза методом математичного моделювання.

5.2.1 Електрична схема заміщення та математична модель системи

Узагальнена електрична схема заміщення системи електричної тяги в режимі пуску електровоза при з'єднанні «С» ТЕД має вигляд, представлений на рис. 5.4.

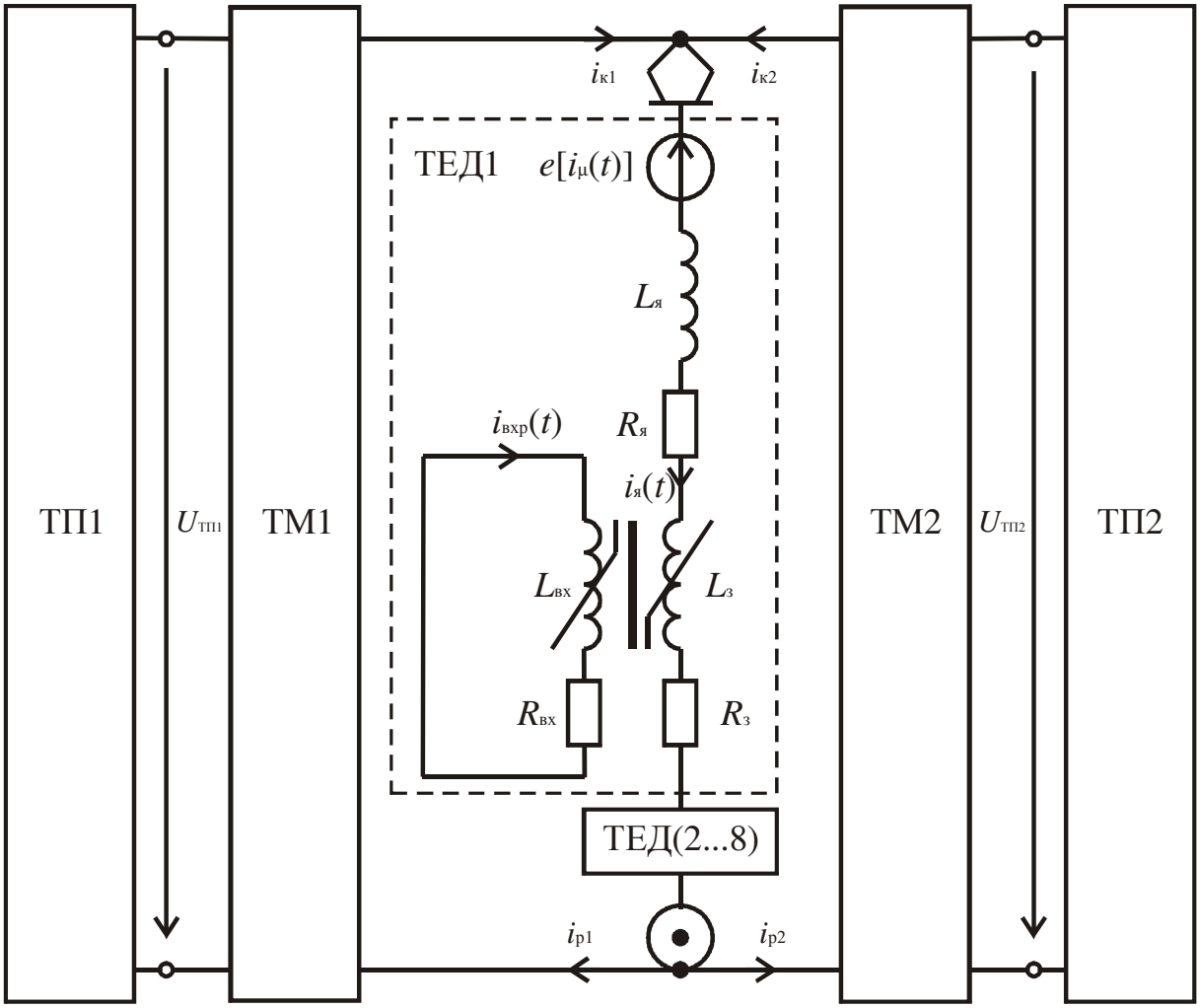


Рисунок 5.4 – Схема заміщення СЕТ з ЕРС, що рухається на «С»-з'єднанні.

Згідно з рис. 5.4, математична модель електромагнітних процесів, що протікають у цій системі, являє собою таку систему рівнянь [271]:

$$\left(R_{т1}+R_{пс1}+R_{зр1}+R_{к1}+R_{р1}+R_{о1}\right)\cdot i_1+\left(L_{т1}+L_{зр1}+L_{к1}+L_{р1}+L_{о1}\right)\frac{di_1}{dt}+$$

$$+R_{іш1\text{-}1}\cdot i_{іш1\text{-}1}+L_{іш1\text{-}1}\frac{di_{іш1\text{-}1}}{dt}+R_{іш1\text{-}2}\cdot i_{іш1\text{-}2}+L_{іш1\text{-}2}\frac{di_{іш1\text{-}2}}{dt}+R_{д}\cdot i_{я}+8R_{я}\cdot i_{я}+8L_{я}\frac{di_{я}}{dt}+$$

$$+2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_8\right)=E_{пс1}-C\omega\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_8\right); \qquad (5.1)$$

$$i_{я}-i_1-i_2=0; \qquad (5.2)$$

$$\left(R_{т2}+R_{пс2}+R_{зр2}+R_{к2}+R_{р2}+R_{о2}\right)\cdot i_2+\left(L_{т2}+L_{зр2}+L_{к2}+L_{р2}+L_{о2}\right)\frac{di_2}{dt}+$$

$$+R_{іш2\text{-}1}\cdot i_{іш2\text{-}1}+L_{іш2\text{-}1}\frac{di_{іш2\text{-}1}}{dt}+R_{іш2\text{-}2}\cdot i_{іш2\text{-}2}+L_{іш2\text{-}2}\frac{di_{іш2\text{-}2}}{dt}+R_{д}\cdot i_{я}+8R_{я}\cdot i_{я}+8L_{я}\frac{di_{я}}{dt}+$$

$$+2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_8\right)=E_{пс2}-C\omega\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_8\right). \qquad (5.3)$$

Розглядувану систему (5.1)-(5.3) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53), а також рівняннями електромагнітних процесів в ЕРС (4.11)-(4.13).

Зазначимо, що в еквівалентній схемі рис. 5.4 і в моделі електрична дуга врахована як лінійний резистор з опором $R_{д}=0,22\ Ом$ [269].

Розроблена вище математична модель, як і схема рис. 5.4, є узагальненою, тобто чинною для всіх зазначених у цьому підрозділі і на рис. 5.1 етапів режиму «зняття-відновлення» напруги; для кожного етапу вона дещо змінюється. Розрахуємо і проаналізуємо електромагнітні процеси для кожного етапу зазначеного режиму.

5.2.2 Електромагнітні процеси в режимі повного зняття напруги

Режим повного зняття напруги включає в себе перший (рис. 5.1,б) і другий (після загасання дуги) (рис. 5.1, в) етапи.

Для початкового, першого етапу зняття напруги (коли дуга ще горить) математична модель (5.1)-(5.3) є чинною у повній мірі. Результати її чисельних розрахунків для даних, приведених в [220, 271], подані на рис. 5.5, із яких випливає наступне.

На першому етапі зняття напруги, (рис. 5.1, б), тобто в процесі горіння та гасіння дуги, в режимі повного збудження поля сила струму електровоза під час свого протікання зменшується, (від 565 до 523 А), його похідна $\frac{di}{dt}$ підвищується (та від'ємна) (рис. 5.5). Тоді при наявності дуги напруга на тягових двигунах і, отже на електровозі $u_{\text{е}}(t)$, теж буде зменшуватися (рис. 5.6). Основний магнітний потік $\Phi(t)$ також буде зменшуватися (рис. 5.7). Однак падіння напруги в дузі $u_{\text{дг}}(t)$ в дугогасильному пристрої високовольтних кіл ЕРС, як було вже зазначено, складає (2…3)% напруги живлення [38], тобто являє собою невелике значення. Тому напруга на ТЕД та їх потік $\Phi(t)$ змінюються дуже незначно; наприклад, від 0,105 до 0,101 Вб, що випливає з рис. 5.7.

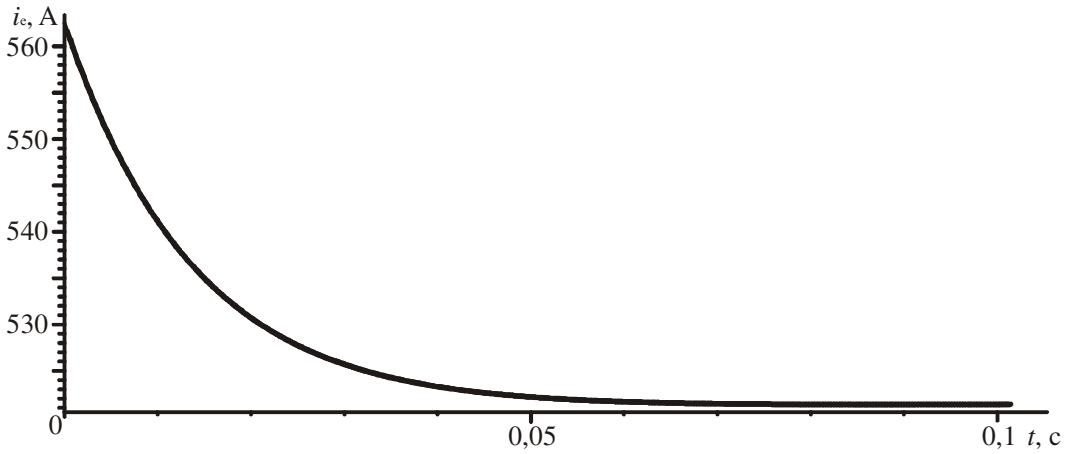


Рисунок 5.5 – Часова залежність струму електровозу на першому етапі зняття напруги

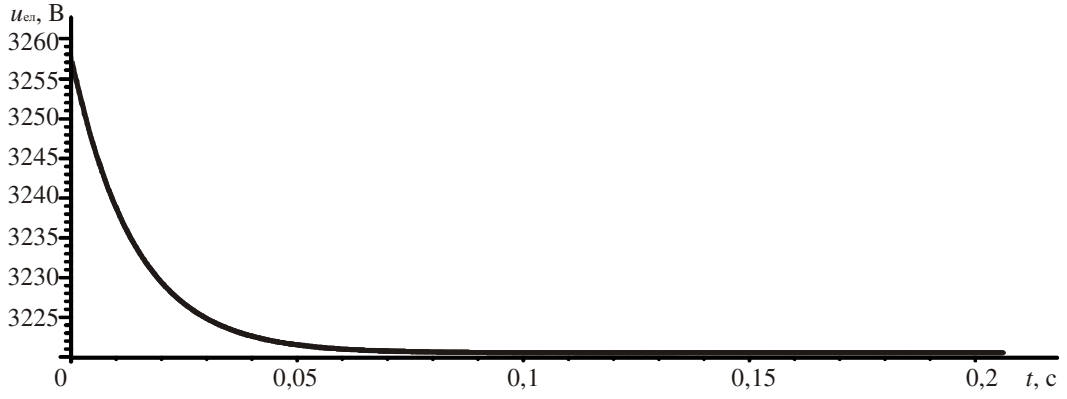


Рисунок 5.6 – Часова залежність зміни фідерної напруги на першому етапі її зняття

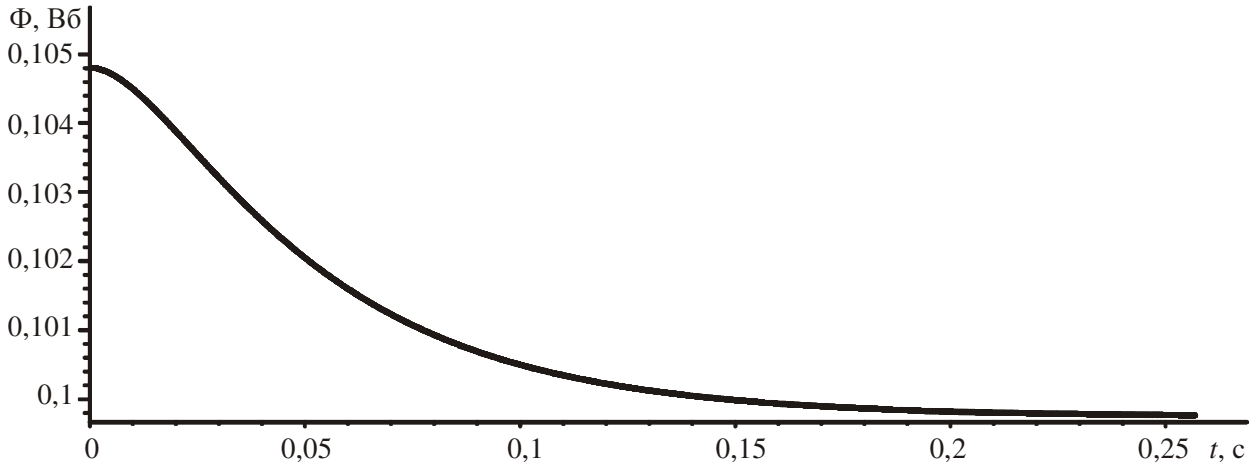


Рисунок 5.7 – Часова залежність зміни основного магнітного потоку на першому етапі зняття напруги

Зі збільшенням початкового значення струму $I_{\text{поч}}$ якорів поточне значення перехідного струму в дузі зростає, його похідна також збільшується (та від'ємна), що обумовлює більше зменшення $u_{\text{дг}}$, й тим самим підвищення напруги на двигуні та його магнітного потоку в кінці стадії, що видно із рис. 5.8 [271, 272] для терміну часу зняття напруги $t_{\text{зн}} = 0{,}5$ с. У цьому випадку у більшій ступені проявляється спадаючий в часі характер магнітного потоку. З іншого боку, навіть ця ступінь зменшення $\Phi(t)$ обумовлюється значною величиною $\frac{d\Phi}{dt}$ й тим самим дуже малими (~15 А) значеннями вихрових струмів (рис. 5.9). Тобто, в цій стадії потік підтримується лише струмом $i_{\text{я}}(t)$, що дорівнює $i_{\text{з}}(t)$ і які практично незмінні та дорівнюють $I_{\text{поч}}$. Протягом першого етапу (горіння дуги) фідерні напруги і струми теж зменшуються, хоча і незначно.

У другому етапі повного зняття напруги (після загасання дуги) (рис. 5.1, в) і після зникнення струму ($i_{\text{е}} = 0, R_{\text{д}} \to \infty, U_{\text{е}} = 0$) якраз електромагнітна енергія, що заощаджена в електромагнітному полі індуктивних елементів ТЕД, визначає зміну $\Phi(t)$ і інших величин. При цьому, у режимі повного поля основний вплив на характер зміни основного магнітного пото-

ку здійснює магнітний потік $\Phi_{вхр}$, створений вихровими струмами. Зокрема, в період розглядуваного етапу в інтервалі часу повного зняття напруги $t_{зн} \le 0,04...0,05\,c$, внаслідок магнітного поверхневого ефекту й тим самим витискання магнітного потоку, активний опір $R_{вхр}$ контуру вихрових струмів великий (рис. 5.10) (бо $R_{вхр} \approx kB_{у}$, де $B_{у}$ - усталене початкове значення індукції [241]). Тому значення $i_{вхр}$ ще менші, ніж на етапі 1 і створений ними магнітний потік $\Phi_{вхр}$ теж малий. Його протидія зміні основного $\Phi(t)$ практично відсутня і тому цей $\Phi(t)$ загасає за рахунок, в основному, зменшення його в поверхневих шарах магнітопроводу та потоків розсіяння. При цьому характери спадаючих кривих $\Phi(t)$ практично співпадають при різних $I_{поч}$. До того ж різниця значень Φ в кінці стадії при різних $I_{поч}$ не перевищує 0,005 Вб.

Струм електровоза $i_{е} = i_{я}(t) = i_{з}(t)$ у цій другій стадії загасає різко (рис. 5.11). Коливання напруги на струмоприймачі від 27230 до 3980 В чисельно і за характером практично не впливають на зміну потоку $\Phi(t)$ та струмів $i_{я}$, $i_{вхр}(t)$ у 1-ій та 2-ій стадіях зняття напруги у режимі повного збудження.

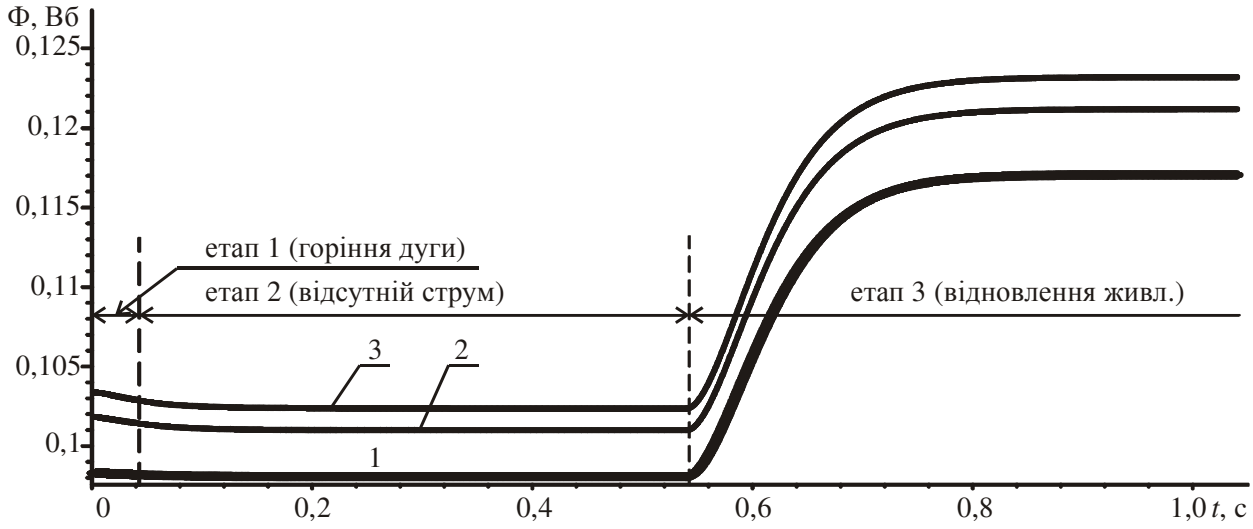


Рисунок 5.8 – Часові залежності зміни магнітного потоку на протязі всього терміну режиму «відриву-доторкання» струмоприймача при $t_{зн} = 0,5$ с для різних початкових значень струму електровозу (А): 1 – 500; 2 – 565; 3 – 600

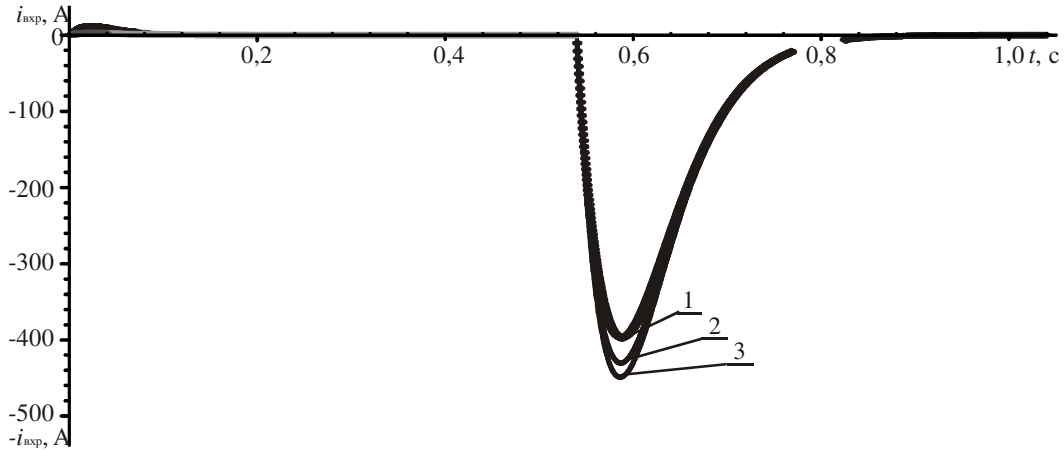


Рисунок 5.9 – Часові залежності зміни вихрових струмів для умов рис. 5.8

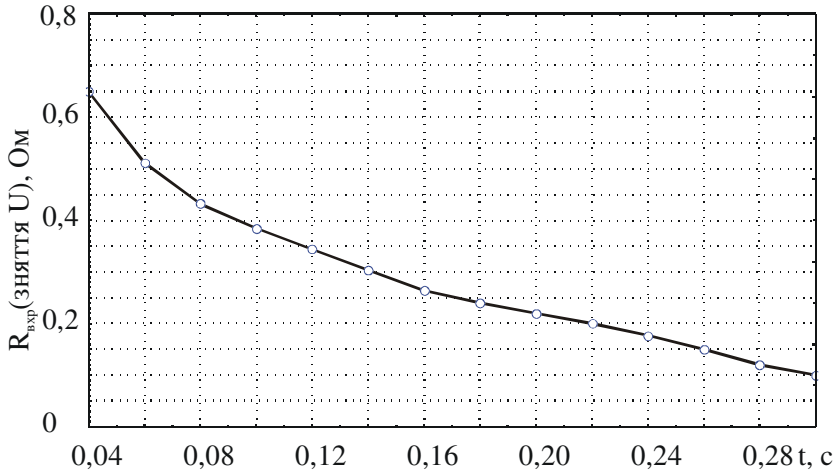


Рисунок 5.10 – Залежність опору $R_{вх}$ контуру, еквівалентного вихровим струмам, у часі перехідного процесу на етапі зняття напруги

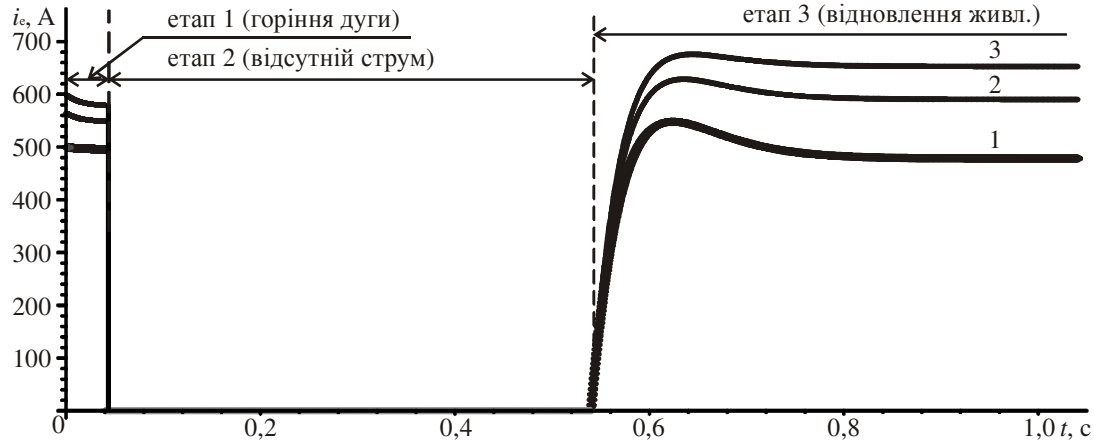


Рисунок 5.11 – Часові залежності зміни струму електровоза для умов рис. 5.8

У режимі повного збудження у другій стадії зняття U (при $i_я = 0$) на характер та ступінь загасання $\Phi(t)$, а точніше на його підтримання, а також на зміну струмів в ТЕД впливають не тільки вихрові струми остова й голов-

них полюсів, але й струм $i_{ш}$ контуру «збудження-шунт» (З-Ш). Вплив вихрових струмів в магнітопроводах індуктивних шунтів не враховується, оскільки їх значення невеликі внаслідок розімкненої магнітної системи шунтів. Тому у режимах ПЗ, перш за все, звертає на себе увагу менша швидкість загасання $\Phi(t)$ на будь-якій ступені послаблення збудження у порівнянні з режимом повного поля. Це пояснюється тим, що струм у контурі З-Ш, підтримуючі потік, зменшує ступінь його загасання за рахунок «розряду» індуктивного шунта через обмотку збудження.

Зі збільшенням індуктивності шунтувальної вітки (зокрема індуктивного шунта $L_{ш}$) загасання магнітного потоку протікає інтенсивніше. Причому по мірі збільшення величини β (послаблення збудження менше) це явище проявляється різкіше. Причиною останнього, очевидно, є збільшення потокозчеплення шунта ($\psi_{ш} = w\Phi_{ш} \approx L_{ш} i_{ш}$) по мірі збільшення β. З цієї точки зору є також очевидним, що вплив збільшення потокозчеплення $\psi_{ш}$ на загасання $\Phi(t)$ повинно більш різко виявлятися на початку 2-ї стадії зняття напруги, приблизно до $t_{зн} \le 0{,}1\,c$. Однак, розбіжність кривих загасання $\Phi(t)$ на зазначеному інтервалі часу мала. Тобто, на початку стадії зняття U загасання $\Phi(t)$ практично не залежить від значень параметрів контура З-Ш. отже, основою роллю індуктивного шунта є його дія як елемента електромагнітної інерції: накопичення і наступний розряд електромагнітної енергії ($W_{м} = \frac{L_{ш} i_{ш}^2}{2}$).

Після гасіння дуги (її розриву) (рис. 5.1, в) напруга на струмоприймачі, як і струм електровоза (рис. 5.10), різко зменшуються до нуля і тому в етапі 2 $U = 0$ (рис. 5.12). Дещо інакше «ведуть себе» фідерні напруги і струми тягових підстанцій (рис. 5.13-5.16): напруга першої підстанції ТП1 $U_1(t)$ після невеликого кидка приблизно у 20 В експоненціально зростає від $U_{ном} = 3{,}33\,кВ$ до 3,38 кВ (рис. 5.13). В той же час фідерний струм цієї ТП1 експоненціально спадає від початкового значення 340-380 А до 100 А (при

$t_{зн} = 0{,}5\,c$) (рис. 5.14). Напруга ТП2 $U_2(t)$ в момент гасіння дуги кидком збільшується на 80 В, а потім, у етапі 2, експоненціально зменшується до 3,31 кВ (при $t_{зн} = 0{,}5\,c$) (рис. 5.15). Струм фідерів $i_1(t)$ цієї ТП2 після кидка майже у 150 А далі експоненціально зменшується (як $i_1(t)$) до 100 А (значення зрівняльного струму) (рис. 5.16).

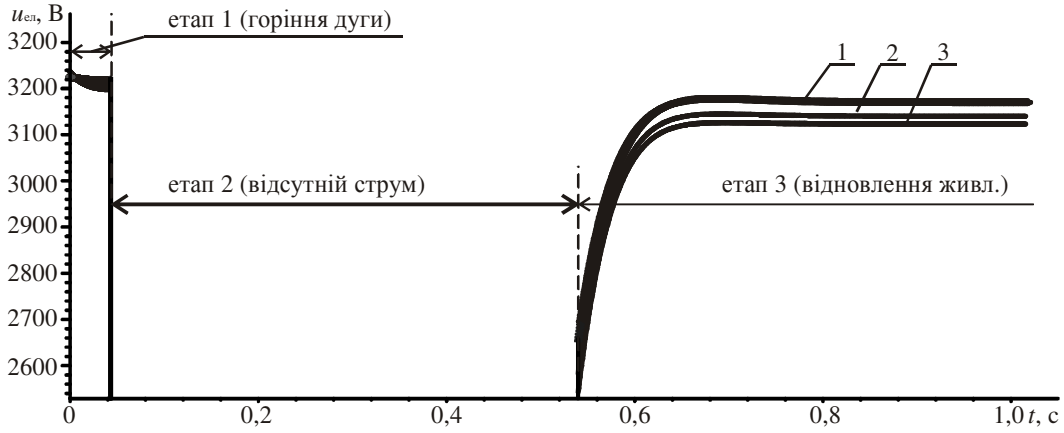


Рисунок 5.12 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі для умов рис. 5.8

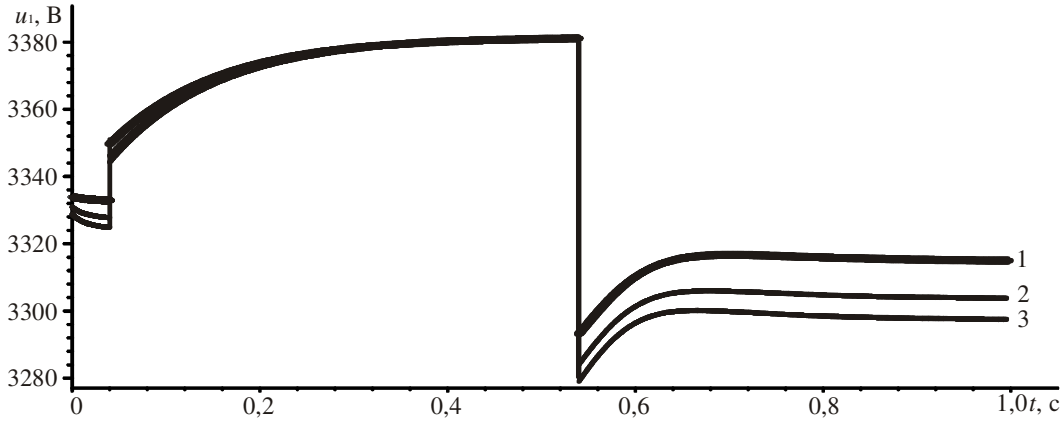


Рисунок 5.13 – Часові залежності зміни фідерної напруги ТП1 для умов рис. 5.8

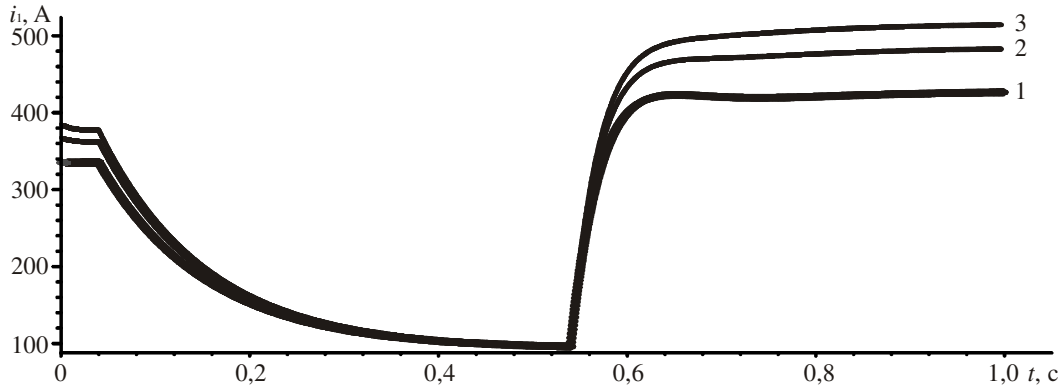


Рисунок 5.14 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1 для умов рис. 5.8

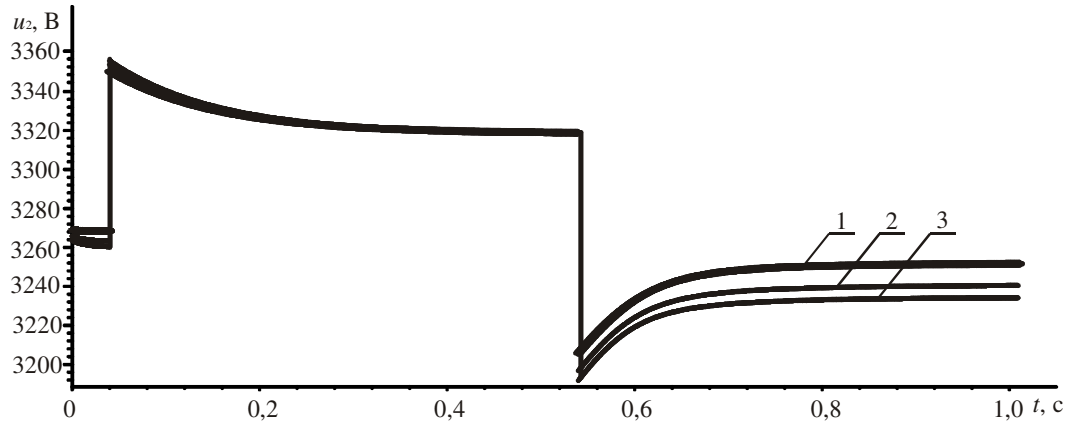


Рисунок 5.15 – Часові залежності зміни фідерної напруги ТП2 для умов рис. 5.8

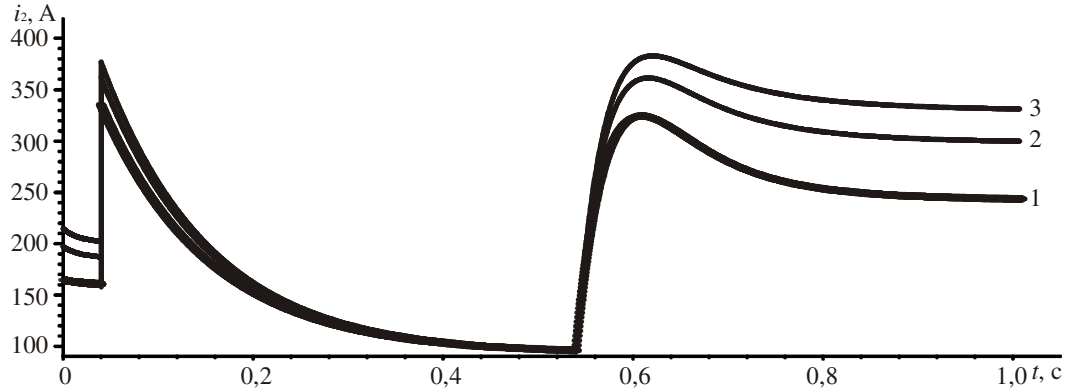


Рисунок 5.16 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП2 для умов рис. 5.8

5.2.3 Електромагнітні процеси на етапі відновлення напруги

Розглянуті вище етапи (стадії) 1 і 2 являються дещо підготовчими до основного етапу 3, етапу відновлення напруги, під час якого і відбуваються основні електромагнітні процеси режиму «відрив-доторкання» струмоприймача ЕРС. Ця третя стадія описується у загальному випадку системою рівнянь (5.1)-(5.3), але при умові, що $R_{\text{д}} = 0$. А, зокрема, в частковому випадку повного поля (нагадаємо, при «С»-з'єднанні ТЕД) струм електровоза $i_{\text{е}}$, або це ж струм якорів $i_{\text{я}}$, можна записати як [271]:

$$i_{\text{я}}(t) = \frac{0{,}5U - \left(e(t) + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + 2p_{\text{з}}\sigma_{\text{з}} \frac{d\Phi}{dt} \right)}{R_{\text{я}} + R_{\text{з}}}. \qquad (5.4)$$

Із цього виразу випливає, що характер перехідного струму у стадії відновлення напруги визначається законом відновлення в часі основного

магнітного потоку і параметрами ТЕД. У режимі ПЗ до дії параметрів $R_{я}, R_{з}, L_{я}$ формули (5.4) додається також вплив параметрів вітки шунтування.

Як відомо, [46, 241, 262], загальні міркування впливу основного магнітного потоку $\Phi(t)$ на перехідні величини ТЕД і електровоза в цілому такі.

Якщо тривалість часу зняття $t_{зн}$ напруги живлення достатня для помітного загасання $\Phi(t)$, то перед відновленням напруги значення цього потоку складає невелику величину. Відповідно і е.р.с. якоря і в ТЕД (яка визначається як: $e(t) = C_{w} \cdot \omega \cdot \Phi(t)$) теж буде малою, оскільки швидкість обертання ω якоря приймається постійною у даний момент часу. При миттєвому відновленні напруги на двигуні електровоза магнітний потік $\Phi(t)$, (а, отже, і проти-е.р.с. двигуна $e(t)$) починають зростати і досягають усталеного значення не миттєво (не кидком, як напруга), а поступово, сповільнено внаслідок демпферуючої протидії магнітного потоку вихрових струмів $\Phi_{вхр}(t)$. Зростання $\Phi(t)$ стримується ще й тим, що основна частина струму двигуна протікає не по обмотці збудження, а через шунтувальну вітку. В результаті в початковий момент відновлення напруги живлення створюється значна різниця між цією напругою та проти-е.р.с. двигуна. Ця різниця при малому активному опорі обмоток ТЕД обумовлює значний кидок струму якоря кожного ТЕД, який погіршує не лише потенціальні умови на колекторах двигунів і може спричинити їх коловий вогонь, але, істотно, буде впливати і на елементи системи електропостачання. Тому тут у подальшому проаналізуємо процеси у цій третій стадії, стадії відновлення напруги.

Як випливає із рис. 5.17, основний магнітний потік $\Phi(t)$ у розглядуваному режимі «С»-з'єднання ТЕД при розриві дуги спадає незначно від 0,102 до 0,101 Вб незалежно від терміну часу зняття напруги $t_{зн}$ в діапазоні від 0,25 до 1,0 с (криві 1-4). Після металевого доторкання струмоприймача ЕРС до контактного проводу потік $\Phi(t)$ відносно повільно, за термін часу ~0,2 с, збільшується від 0,101 до 0,12 Вб (рис. 5.17), а напруга на електровозі зростає

кидком від 0 до 3,1 кВ (рис. 5.18). В результаті цього струм електровоза також зростає кидком від 0 до 620-660 А (в залежності від $t_{зн}$) (рис. 5.19). Також кидком зростають фідерні струми ТП1 (до 480…500А) і ТП2 (до 360…380 А) (рис. 5.20 і 5.21).

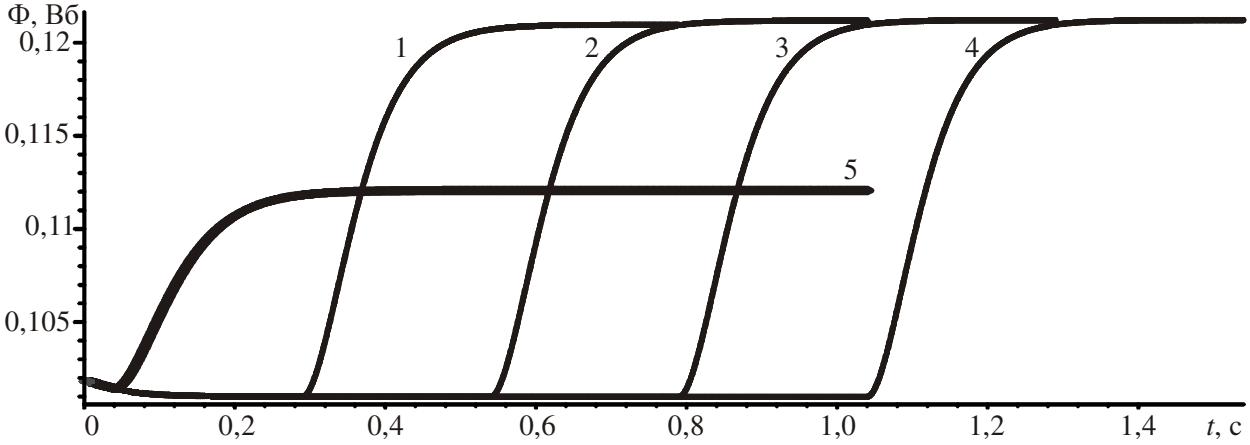


Рисунок 5.17 – Часові залежності зміни основного магнітного потоку ТЕД на протязі режиму «відриву-доторкання» струмоприймача при різній тривалості 2-ого етапу, тобто зняття напруги $t_{зн}$ (с): 1 –0,25; 2 – 0,5; 3 – 0,75; 4 – 1,0; 5 – 2-ий етап відсутній

Залежність досліджуваних величин від місця знаходження ЕРС між тяговими підстанціями, тобто від відстані l (до ТП1), при $I_{ном}$ електровоза 565 А і $t_{зн} = 0,5\,c$ приведені на рис. 5.22 – 5.28. В діапазоні $l = 2...10\,км$ амплітуда кидка струму електровоза (рис. 5.23) змінюється мало, від 620 д 660 А. інакше змінюються від l струми тягових підстанцій: при $l = 2\,км$ від ТП1 кидок її фідерного струму дорівнює 670 А, а кидок фідерного струму ТП2 склав 190 А (рис. 5.24 і 5.25); при $l = 10\,км$ відповідно маємо 463 і 360 А. Максимальні значення напруги на ТП1 і ТП2 після їх різкого зростання змінюються слабко в залежності від місця розташування ЕРС (рис. 5.27 і 5.28), при $l = 2\,км$ вони складають відповідно 3,27 і 3,265 кВ, а при $l = 10\,км$ - 3,31 і 3,235 кВ. тобто, такі зміни складають 30…40 В. В такому ж інтервалі змінюється, після кидка, і напруга на електровозі (рис. 5.26).

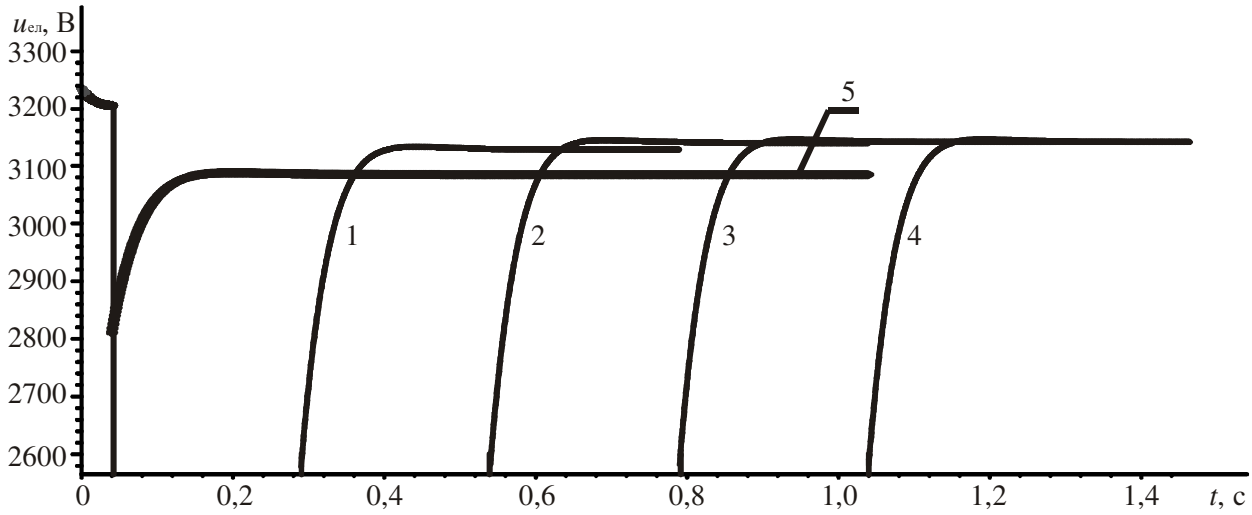


Рисунок 5.18 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі електровоза для умов рис. 5.17

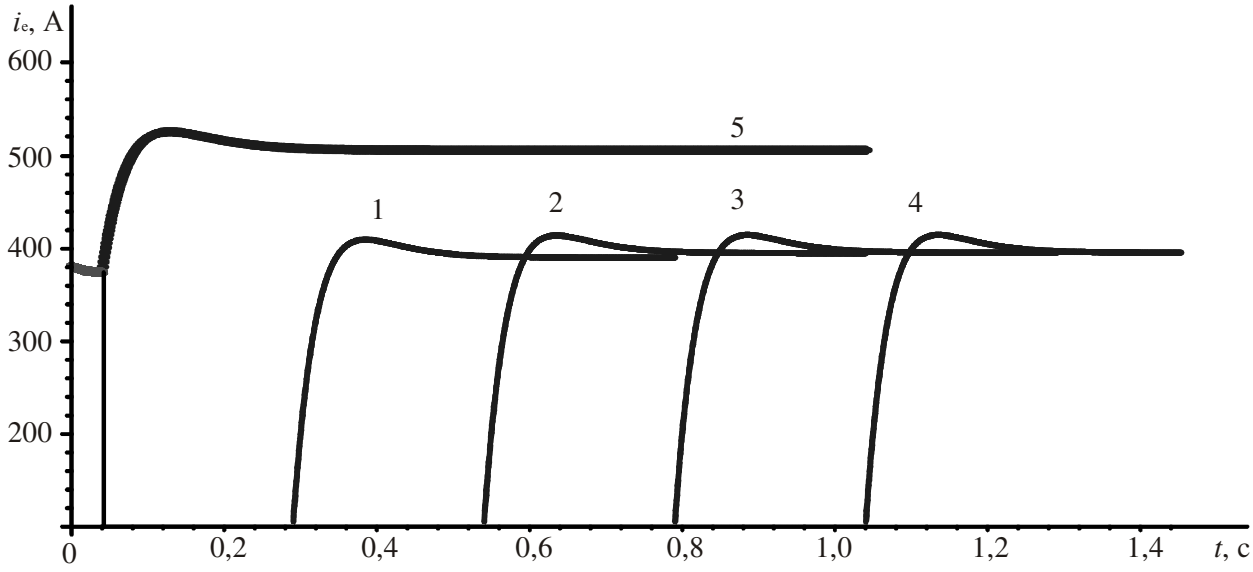


Рисунок 5.19 – Часові залежності зміни струму електровоза для умов рис. 5.17

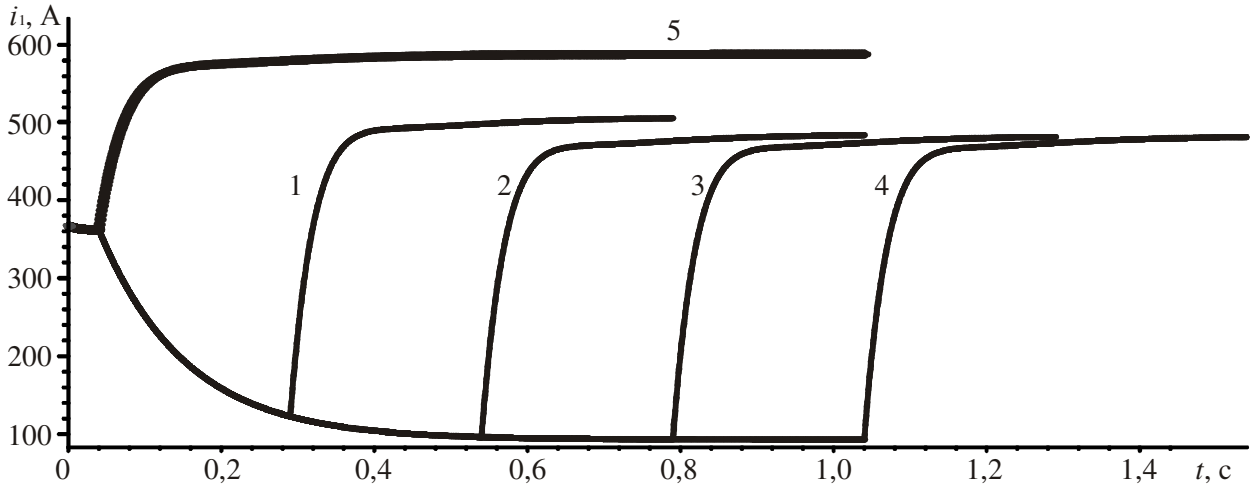


Рисунок 5.20 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1 для умов рис. 5.17

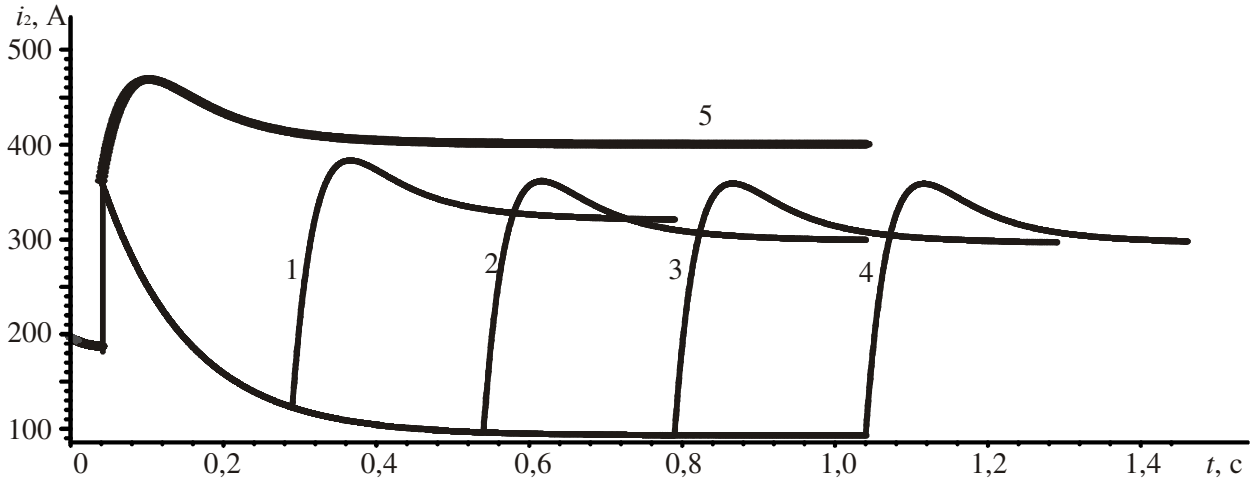


Рисунок 5.21 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП2 для умов рис. 5.17

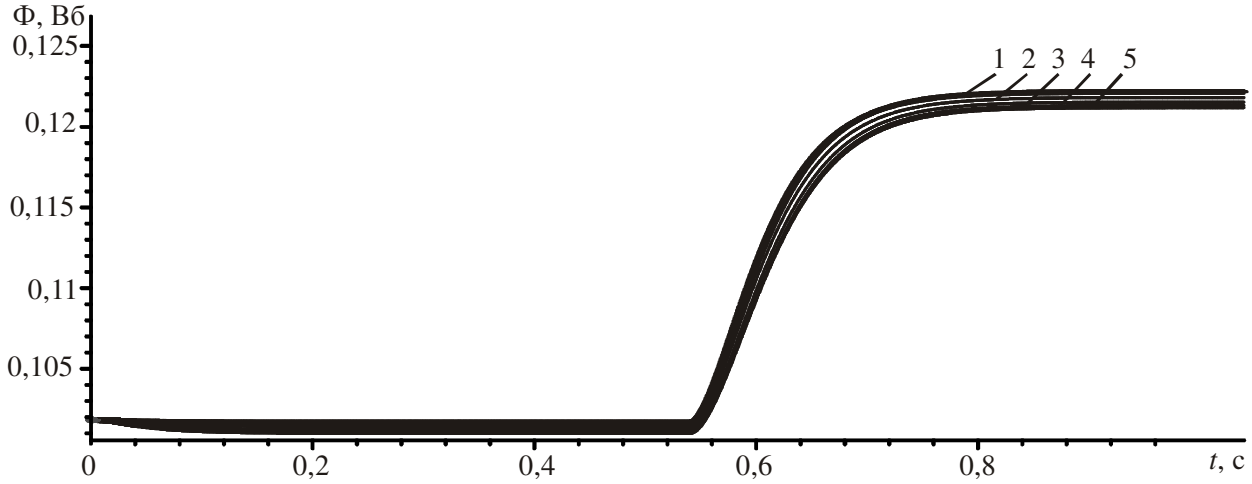


Рисунок 5.22 – Часові залежності зміни основного магнітного потоку ТЕД на протязі всього терміну режиму «відриву-доторкання» струмоприймача при різній відстані від ТП1 до ЕРС (км): 1 –2; 2 – 4; 3 – 6; 4 – 8; 5 – 10

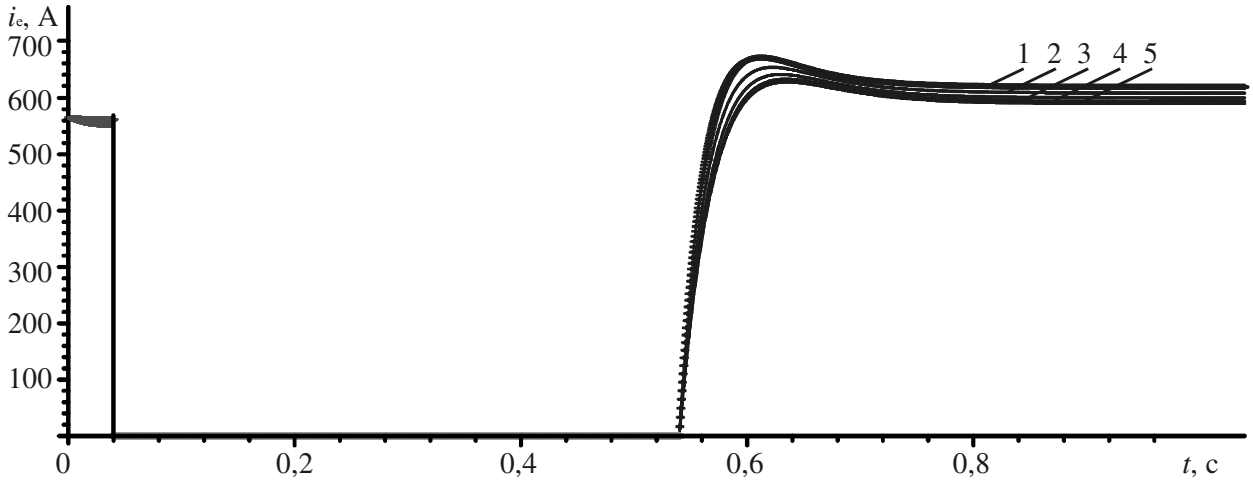


Рисунок 5.23 – Часові залежності зміни струму електровоза для умов рис. 5.22

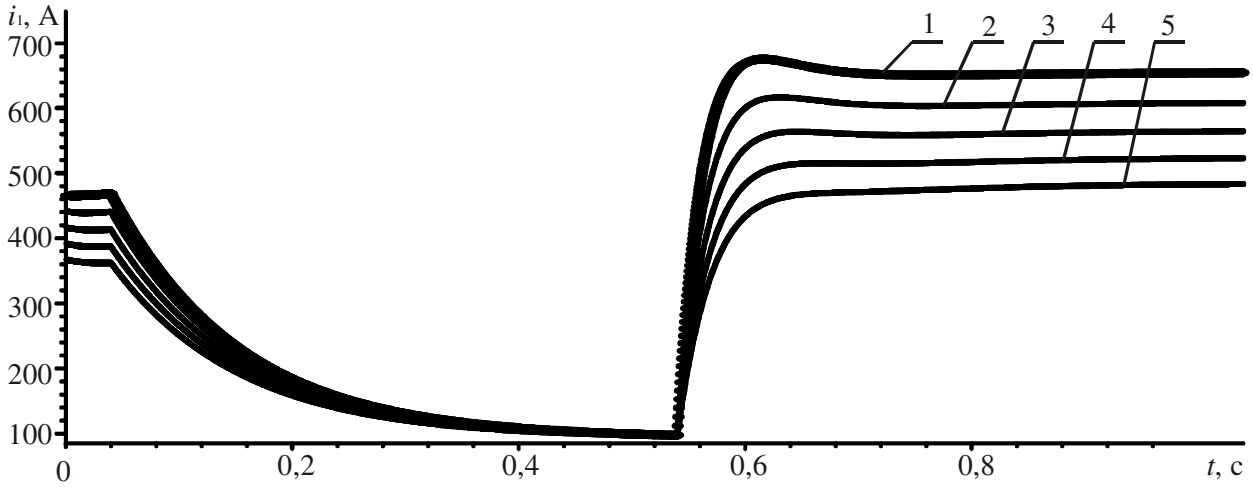


Рисунок 5.24 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1 для умов рис. 5.22

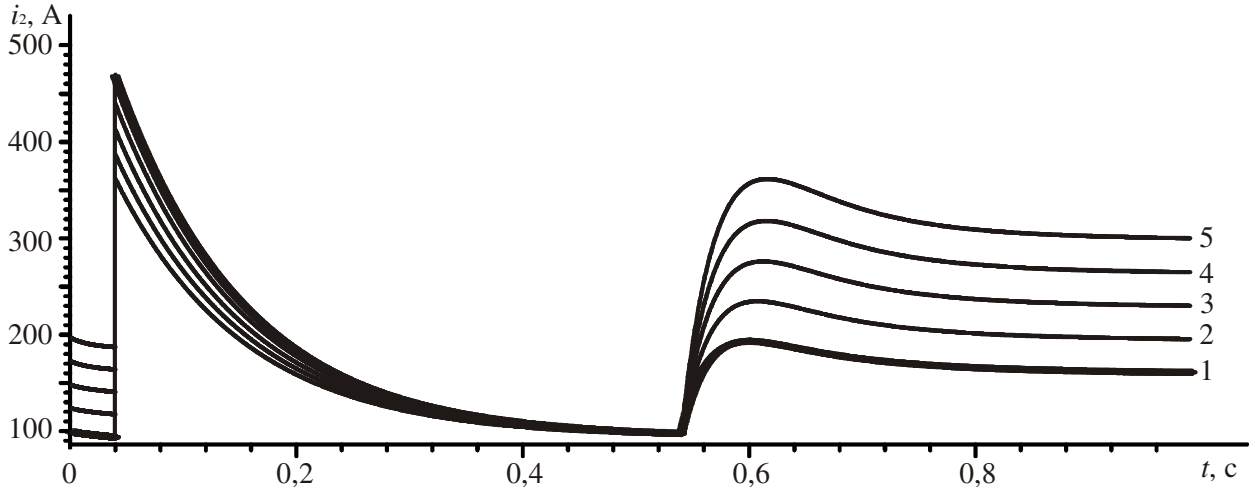


Рисунок 5.25 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП2 на протязі всього терміну режиму «відриву-торкання» струмоприймача, при різній відстані від ТП2 до ЕРС (км): 1 –18; 2 – 16; 3 – 14; 4 – 12; 5 – 10

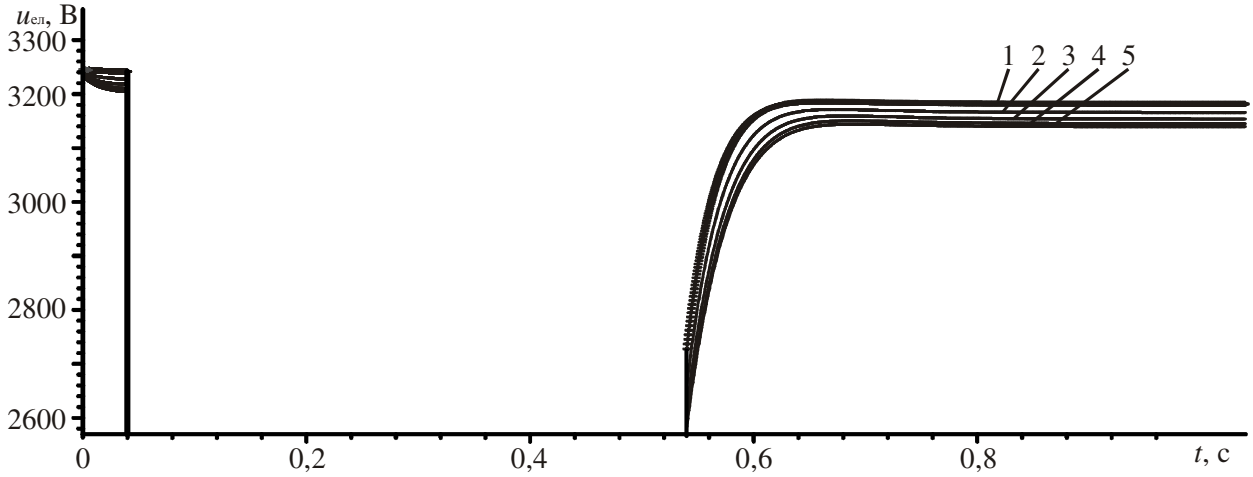


Рисунок 5.26 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі для умов рис. 5.22

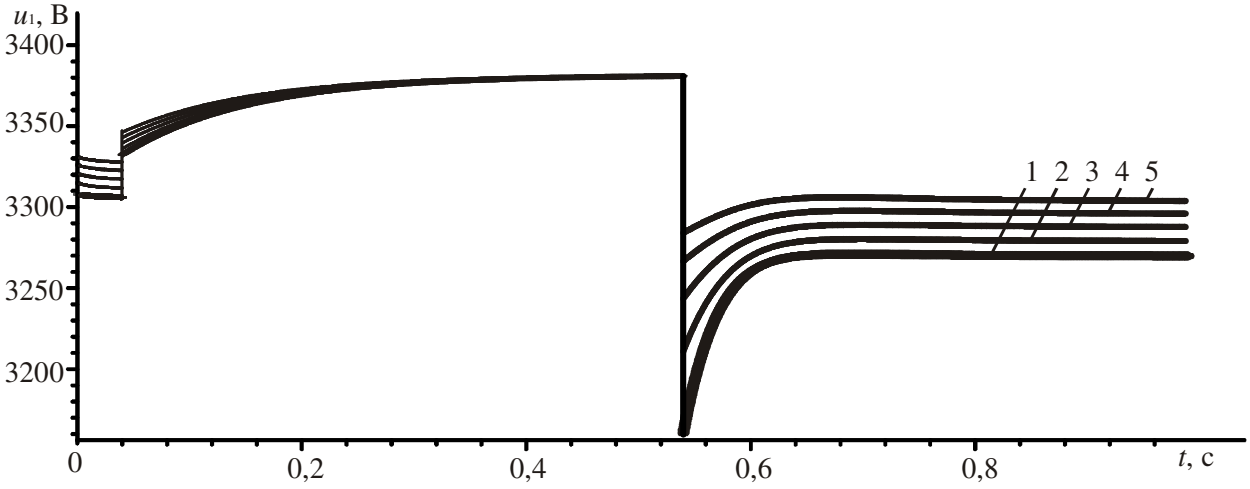


Рисунок 5.27 – Часові залежності зміни фідерної напруги ТП1 для умов рис. 5.22

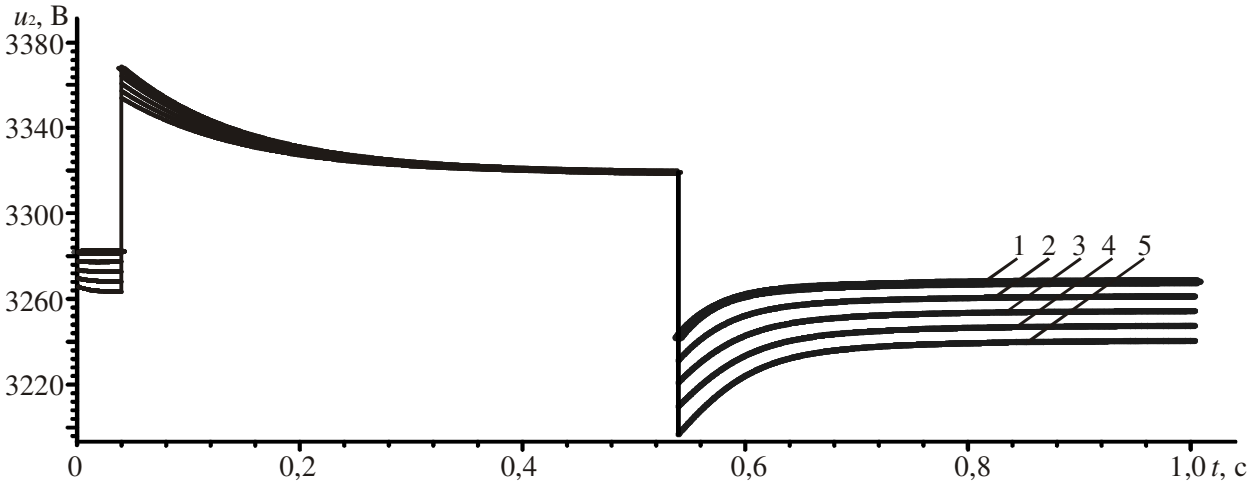


Рисунок 5.28 – Часові залежності зміни фідерної напруги ТП2 на протязі всього терміну режиму «відриву-торкання» струмоприймача, при різній відстані від ТП2 до ЕРС (км): 1 – 18; 2 – 16; 3 – 14; 4 – 12; 5 – 10

В таблиці 5.2 приведені значення кількості електрики, а також енергії що виділяється на протязі всього перехідного процесу «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі, у випадку руху електровозу на «С»-з'єднанні. З неї випливає, що незалежно від початкового струму $I_{\text{поч}}$, положення ЕРС на фідерній зоні, а також терміну часу другого етапу $t_{\text{П}}$, тієї кількості електрики, що виділяється в точці відриву струмоприймача недостатньо для розриву контактного проводу. Проте, кожен такий відрив спричиняє пошкодження поверхні тертя контактного проводу, адже кількість електрики перевищує (зазначені в п. 5.1) 250 А·с; крім того, в точці відриву виділяється велика кі-

лькість теплоти W_e. Слід звернути увагу на те, що кількість електрики, головним чином, залежить від початкового значення струму $I_{поч}$ до відриву струмоприймача. Значення цієї величини коливається у межах $Q_e = 259,4...338,9\ A \cdot c$, а при зміні координати ЕРС, а також терміну часу другого етапу, величини Q_e і W_e практично незмінні.

Таблиця 5.2

Кількісні показники виділеної в точці відриву струмоприймача електроенергії (електровоз рухається на «С»-з'єднанні)

Залежно від		$Q_e = \int i_e(t)dt,\ A \cdot c$	$W_e = \int i_e^2(t)dt,\ A^2 \cdot c$
початкового значення струму, $I_{поч},\ A$	500	259,4	126960,4
	565	310,3	181959
	600	338,9	217279,9
відстані від ЕРС до ТП1, $l, км$	2	328,9	203326,4
	4	321,7	194938,5
	6	316,3	188731,4
	8	312,5	184457,1
	10	310,3	181959
терміну часу другого етапу (відсутності живлення), $t_П, c$	0,25	305,9	176718,5
	0,5	310,3	181959
	0,75	310,8	182541,8
	1,0	310,9	182606

5.2.4 Електромагнітні процеси в системі у випадку постійного горіння електричної дуги (без її розриву до моменту відновлення контакту «струмоприймач – контактний провід»)

Практика експериментального спостереження процесу «відрив-піднімання» струмоприймача свідчить про те, що у деяких випадках розрив електричної дуги не має місце, тобто після першого етапу зразу ж спостерігається відновлення напруги (3-й етап). Згідно [9], термін часу горіння дуги може бути від 0,2 від 2,0 с.

Електрична схема заміщення для цього режиму представлена на рис. 5.1 б, а в математичній моделі (5.1)-(5.3) $R_д = 0,22\,Ом$, $I_е \neq 0$, $U \neq 0$. Чисельні розрахунки моделі виконано для терміну часу горіння дуги до 0,5 с для $l = 10\,км$ і $I_{поч} = 565\,A$; результати приведені на рис. 5.29 – 5.35, із яких випливає наступне.

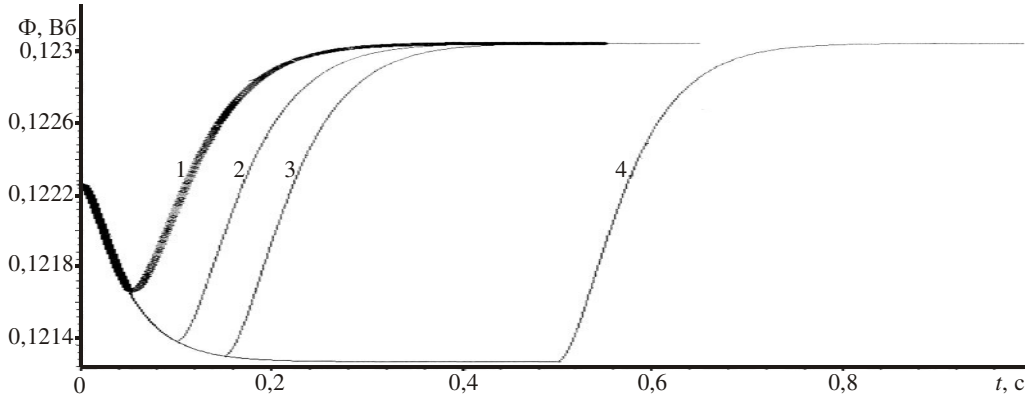


Рисунок 5.29 – Часові залежності зміни основного магнітного потоку ТЕД на протязі всього режиму «відриву-доторкання» при відсутності 2-ого етапу і різній тривалості горіння дуги (с): 1 –0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,15; 4 – 0,5

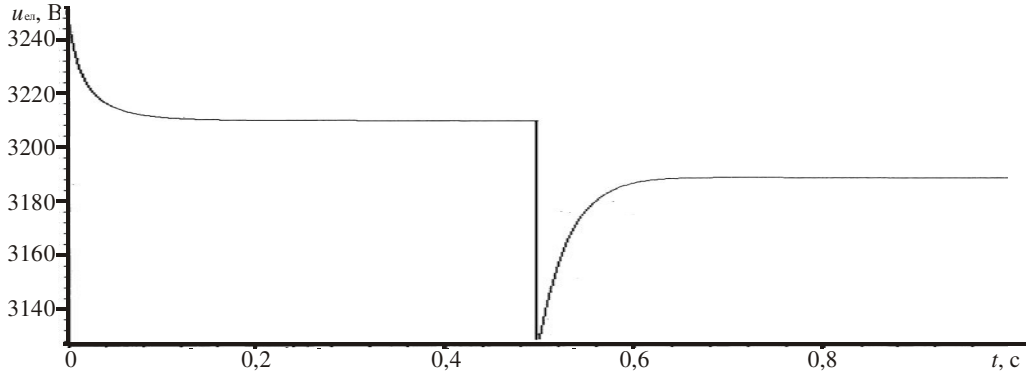


Рисунок 5.30 – Часова залежність зміни напруги на струмоприймачі електровозу в режимі «відриву-доторкання» при відсутності 2-ого етапу і горінні дуги на протязі 0,5 с

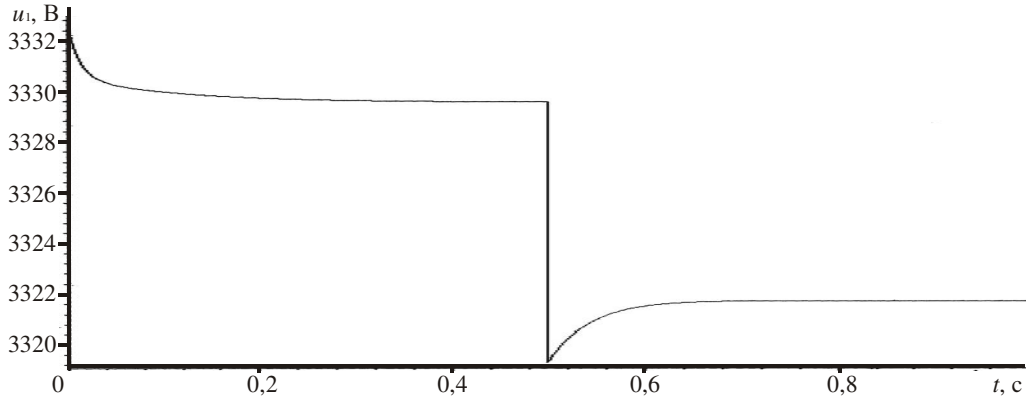


Рисунок 5.31 – Часова залежність зміни фідерної напруги ТП1 для умов рис. 5.30

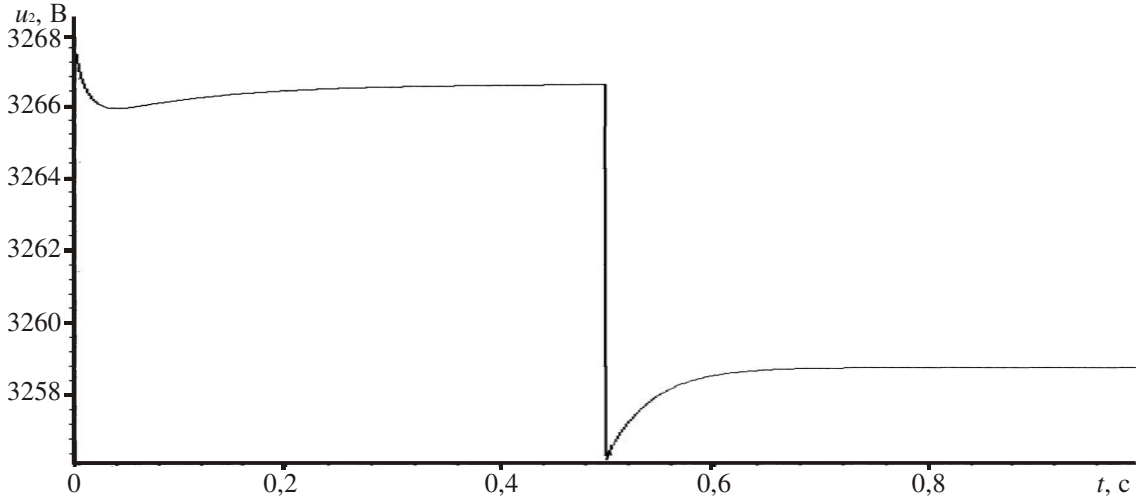


Рисунок 5.32 – Часова залежність зміни фідерної напруги ТП2 для умов рис. 5.30

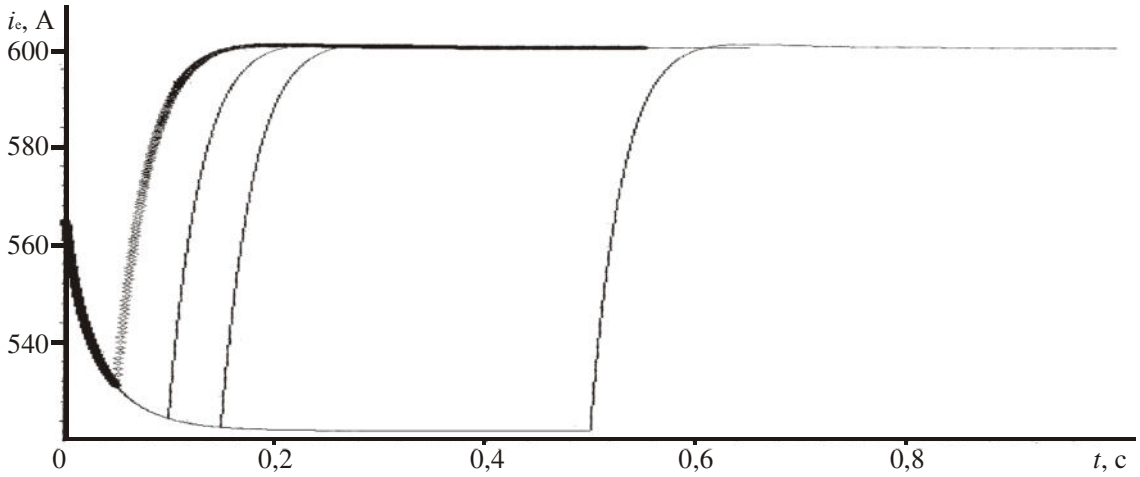


Рисунок 5.33 – Часові залежності зміни струму електровоза на протязі всього режиму «відриву-доторкання» струмоприймача при відсутності 2-ого етапу і різній тривалості горіння дуги (с): 1 –0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,15; 4 – 0,5

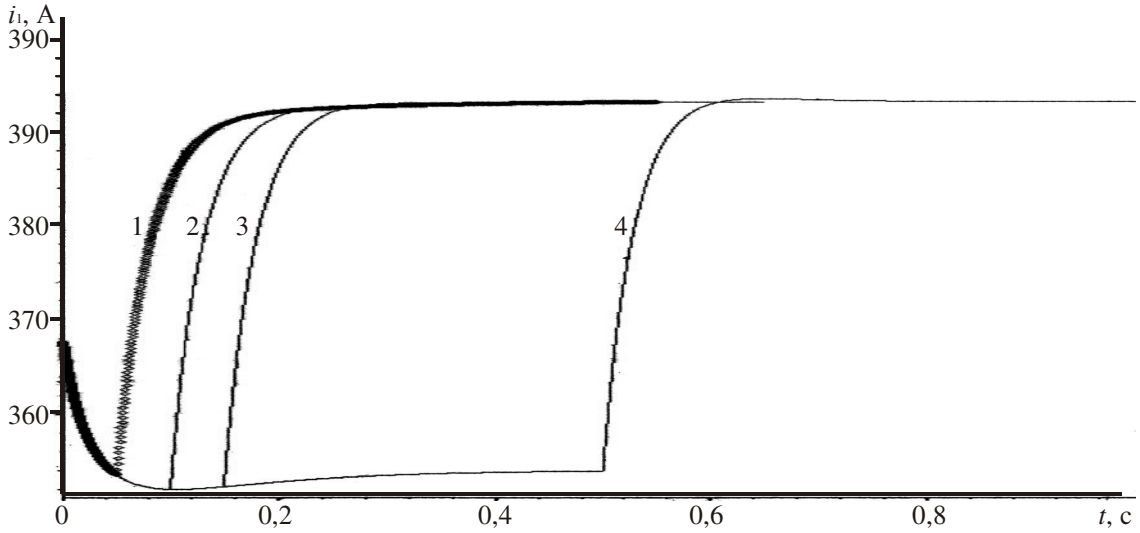


Рисунок 5.34 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1 для умов рис. 5.33

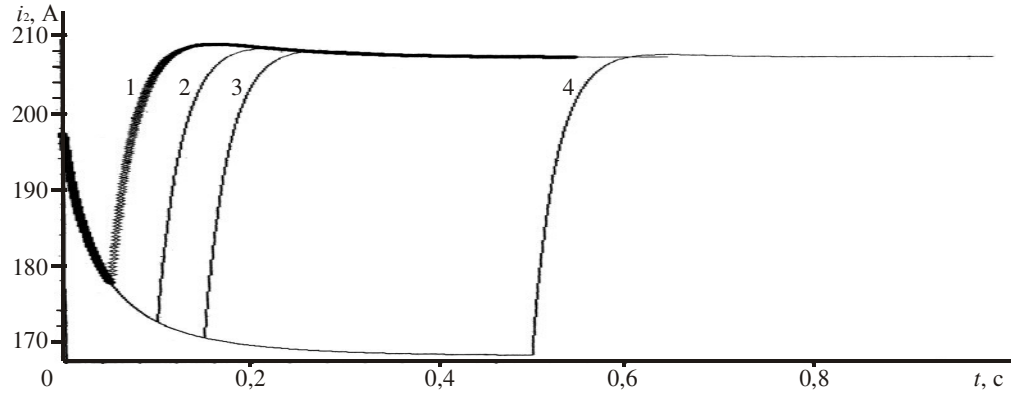


Рисунок 5.35 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП2 для умов рис. 5.33

Під час горіння дуги тривалістю до ~0,2 с основний магнітний потік, фідерні напруги і струми ЕРС зменшуються за експоненціальним законом (рис. 5.29 – 5.35). При тривалості горіння дуги більше 0,2 с спостерігаються усталені значення зазначених величин, тобто, у подальшому вони не зменшуються.

При відновленні металевого контакту струмоприймача з контактним проводом напруга на електровозі, а також фідерні напруги спочатку кидком зменшуються, на ЕРС на 75 В, а фідерні на 10-12 кВ, а потім також кидком збільшуються майже до початкових значень (рис. 5.30 – 5.32). Струми (рис. 5.33 – 5.35) також збільшуються кидками, але їх значення не перевищують значень, які отримані в режимі розриву дуги тієї ж тривалості 0,5 с (рис. 5.11): наприклад, кидок струму ЕРС теж не перевищує 600 А.

5.3 Режим «зняття-відновлення» напруги при русі на «СП»-з'єднанні тягових двигунів

5.3.1 Електрична схема заміщення та математична модель системи

Серієсно-паралельне з'єднання ТЕД є найчастішим і нерідко найтривалішим режимом роботи електровозів постійного струму при веденні ними вантажних поїздів. Наприклад, за умов даних табл. 4.1 на ділянці 1 воно застосовувалось 9 разів загальною тривалістю 1,08 години, на ділянці 2…10 разів, тривалістю 1,11 години. Виходячи з цього і були виконані дослідження

і розрахунки електромагнітних процесів режиму «зняття-відновлення» напруги при СП- з'єднанні ТЕД електровозів ДЕ1.

Електрична схема заміщення системи електротяги для розглядуваного режиму представлена на рис. 5.36, математична модель являє собою систему рівнянь [273]:

$$\left(R_{т1}+R_{пс1}+R_{зр1}+R_{к1}+R_{р1}+R_{о1}\right)\cdot i_1+\left(L_{т1}+L_{зр1}+L_{к1}+L_{р1}+L_{о1}\right)\frac{di_1}{dt}+$$
$$+R_{ішl\text{-}1}\cdot i_{ішl\text{-}1}+L_{ішl\text{-}1}\frac{di_{ішl\text{-}1}}{dt}+R_{ішl\text{-}2}\cdot i_{ішl\text{-}2}+L_{ішl\text{-}2}\frac{di_{ішl\text{-}2}}{dt}+2R_{д}\cdot i_{яl}+4R_{я}\cdot i_{яl}+4L_{я}\frac{di_{яl}}{dt}+$$
$$+2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right)=E_{пс1}-C\omega\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right); \qquad (5.5)$$

$$\left(R_{т2}+R_{пс2}+R_{зр2}+R_{к2}+R_{р2}+R_{о2}\right)\cdot i_2+\left(L_{т2}+L_{зр2}+L_{к2}+L_{р2}+L_{о2}\right)\frac{di_2}{dt}+$$
$$+R_{ішl\text{-}1}\cdot i_{ішl\text{-}1}+L_{ішl\text{-}1}\frac{di_{ішl\text{-}1}}{dt}+R_{ішl\text{-}2}\cdot i_{ішl\text{-}2}+L_{ішl\text{-}2}\frac{di_{ішl\text{-}2}}{dt}+2R_{д}\cdot i_{яl}+4R_{я}\cdot i_{яl}+4L_{я}\frac{di_{яl}}{dt}+$$
$$+2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right)=E_{пс2}-C\omega\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right); \qquad (5.6)$$

$$4R_{я}\cdot i_{яl}+4L_{я}\frac{di_{яl}}{dt}+2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right)-4R_{я}\cdot i_{я2}-4L_{я}\frac{di_{я2}}{dt}-$$
$$-2p\sigma_{з}\omega_{з}\frac{d}{dt}\left(\Phi_5+\ldots+\Phi_8\right)=-C\omega\left(\Phi_1+\ldots+\Phi_4\right)+C\omega\left(\Phi_5+\ldots+\Phi_8\right); \qquad (5.7)$$

$$i_{яl}+i_{я2}-i_1-i_2=0. \qquad (5.8)$$

Розглядувану систему (5.5)-(5.8) слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53), а також рівняннями електромагнітних процесів в ЕРС (4.11)-(4.13).

Як і в режимі «С»-з'єднання ТЕД, в розглядуваному режимі СП-з'єднання перехідні процеси в силових колах ЕРС, отже і в усій системі електричної тяги, в більшій ступені визначаються законом зміни основного магнітного потоку (рис. 5.37) та вихрових струмів (рис. 5.38). І тому пояснення протікаючих електромагнітних процесів у режимі СП-з'єднання можна здійснювати з тих же міркувань, що і в попередньому підрозділі 5.2. Виходячи з цього, в цьому підрозділі здебільшого проаналізуємо лише кількісні характеристики перехідних електричних величин в СЕТ.

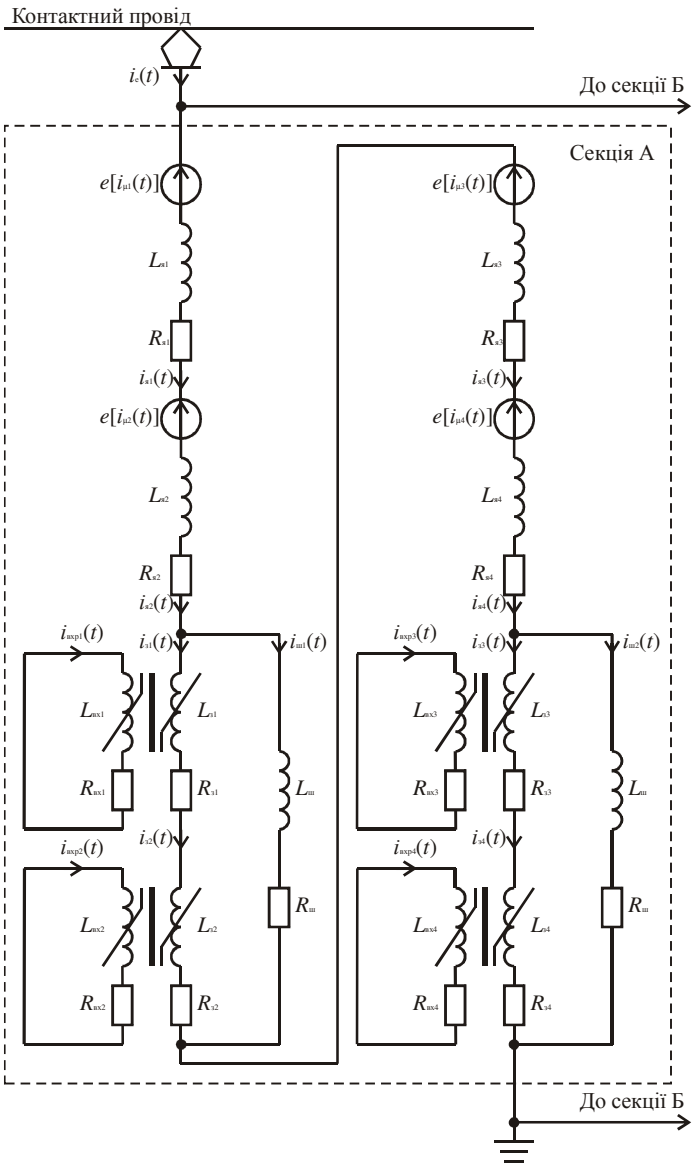


Рисунок 5.36 – Електрична схема заміщення однієї секції електровоза ДЕ1 у режимі тяги при СП- з’єднанні тягових двигунів

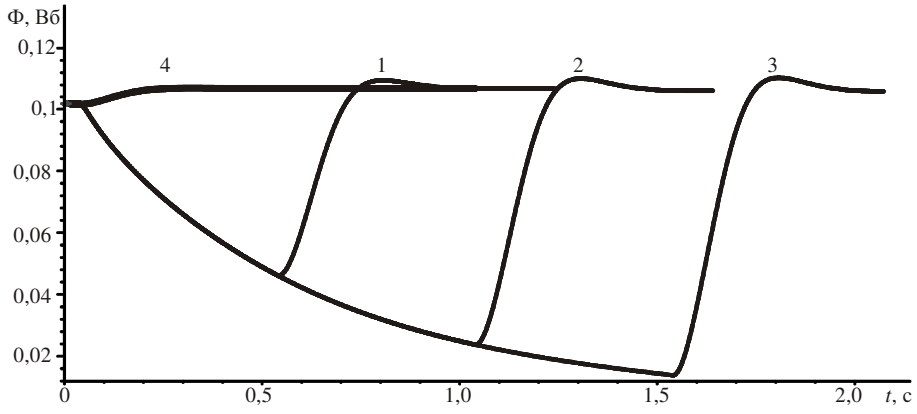


Рисунок 5.37 – Часові залежності зміни основного магнітного потоку на протязі всього режиму «відриву-доторкання» струмоприймача, при різній тривалості 2-ого етапу (с): 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 –2-ий етап відсутній

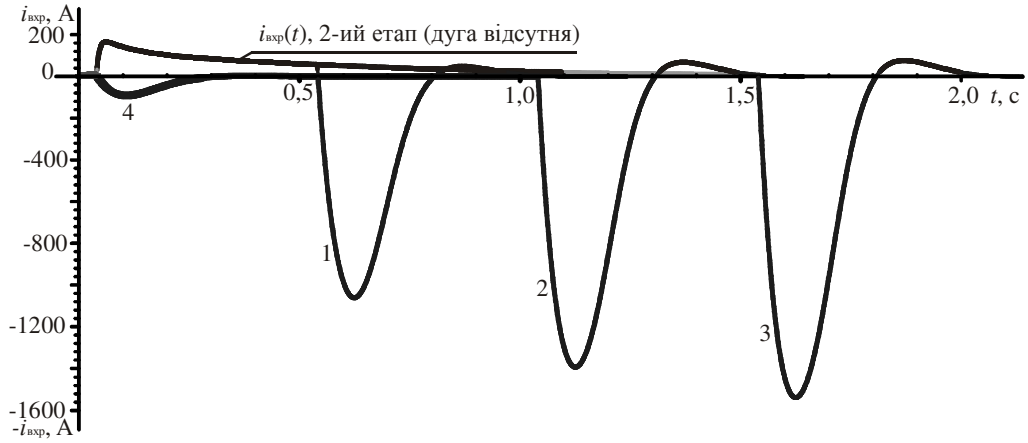


Рисунок 5.38 – Часові залежності зміни вихрових струмів для умов рис. 5.37

5.3.2 Електромагнітні процеси у режимі повного зняття напруги

На етапі 1 (рис. 5.1, б) – етапі горіння дуги тривалістю 40 мс, у режимі повного поля напруга на електровозі $u_{\text{е}}(t)$ зменшується на 50…70 В (рис. 5.39), сила струму в паралельних вітках силового тягового кола електровоза (тобто, в якорях (рис. 5.40)) знижується на 25…40 А, а струм в електровозі $i_{\text{е}}(t)$ зменшується на 50…80 А. Тобто, при такій тривалості горіння електричної дуги і напруга, і струм в ЕРС зменшується незначно. Тому і магнітний потік $\Phi(t)$ (рис. 5.37) змінюється незначно, від 1,04 до 1,0 Вб. Оскільки, як відомо [241, 274], вихрові струми $i_{\text{вхр}} = \kappa \cdot \Phi(t)\dfrac{d\Phi}{dt}$, а $\dfrac{d\Phi}{dt}$ і $\Phi(t)$ малі за значеннями, то вихрові струми практично дорівнюють нулю (рис. 5.38).

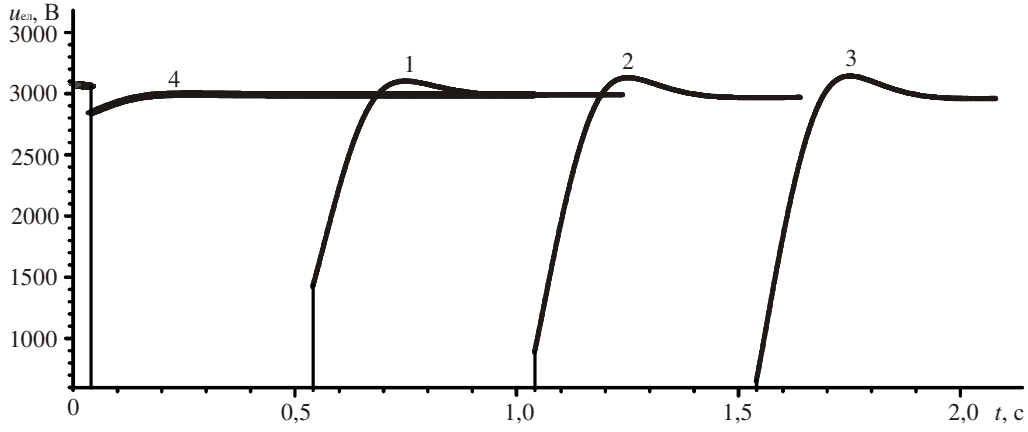


Рисунок 5.39 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі електровоза на протязі всього терміну режиму «відриву-доторкання», при різній тривалості 2-ого етапу (с): 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5; 4 –2-ий етап відсутній

Також мало змінні фідерні струми і вихідні напруги на обох тягових підстанціях (рис. 5.41 – 5.45).

В початковий період етапу 2 (рис. 5.1, в) (після розриву дуги й тим самим зникнення струму електровоза, $i_{\text{е}} = 0$) в інтервалі $t_{\text{зн}} = 40...50\,мс$, внаслідок ще великих значень $\Phi(t)$, а також різкого його зниження (велика від'ємна $\frac{d\Phi}{dt}$) (рис. 5.37), вихрові струми зростають кидком до ~200 А (рис. 5.38). Створений ними магнітний потік $\Phi_{\text{вхр}}$ обумовлює значну протидію основному $\Phi(t)$, що й визначає більш повільне загасання $\Phi(t)$ у другій половині (чи наприкінці) етапу 2. Далі, менша $\frac{d\Phi}{dt}$ і менші значення $\Phi(t)$ зменшують вихрову е.р.с. та вихрові струми, які поступово експоненціально загасають.

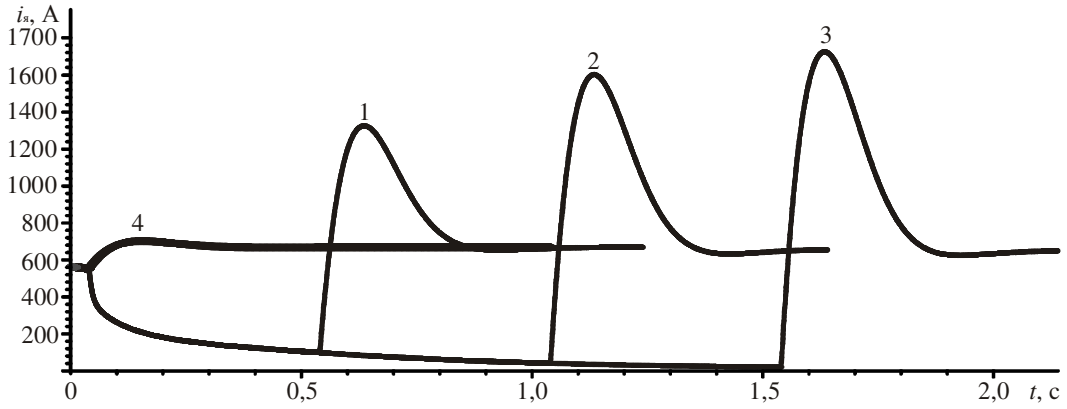


Рисунок 5.40 – Часові залежності зміни струму якоря ТЕД електровоза для умов рис. 5.39

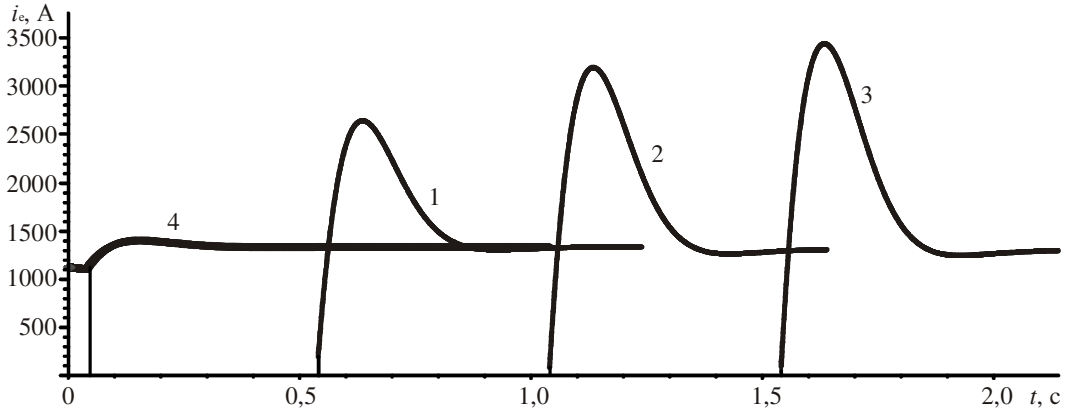


Рисунок 5.41 – Часові залежності зміни струму електровоза для умов рис. 5.39

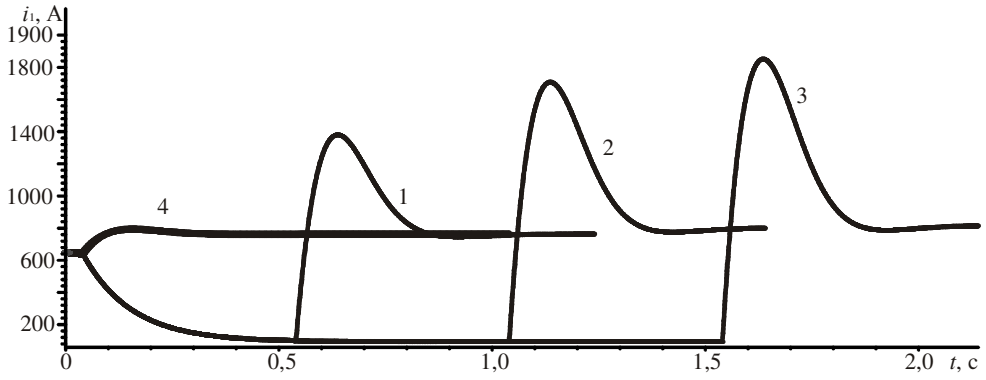


Рисунок 5.42 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1 для умов рис. 5.39

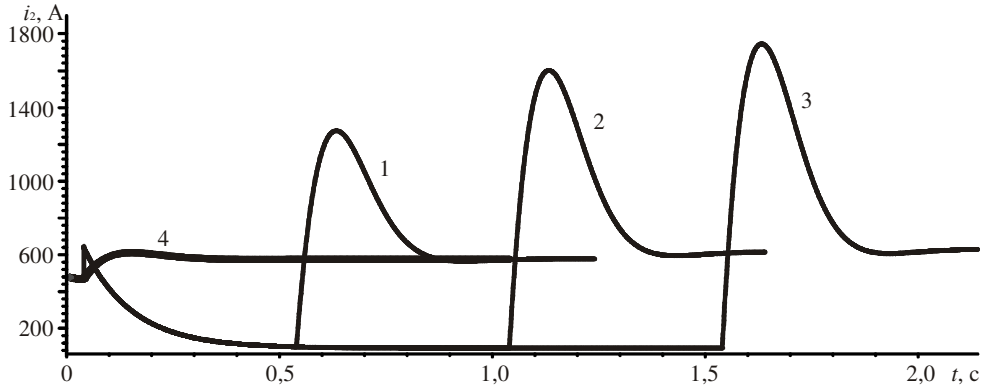


Рисунок 5.43 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП2 для умов рис. 5.39

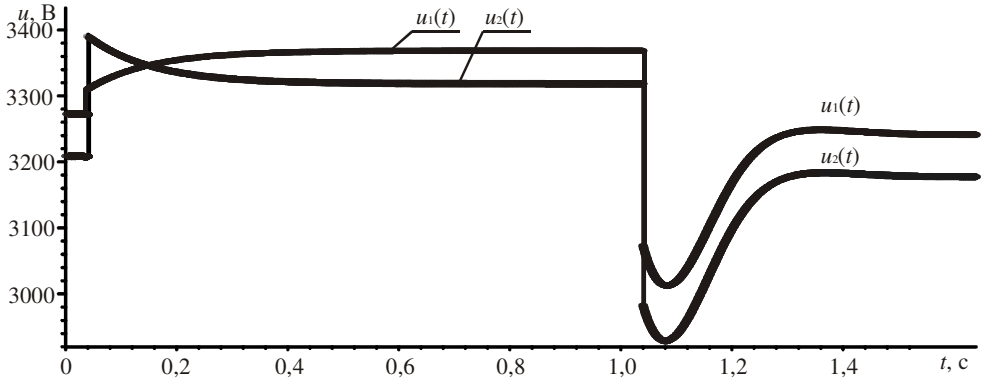


Рисунок 5.44 – Часові залежності зміни фідерних напруг ТП1 і ТП2 на протязі всього режиму «відриву-доторкання» при тривалості 2-ого етапу 1,0 с

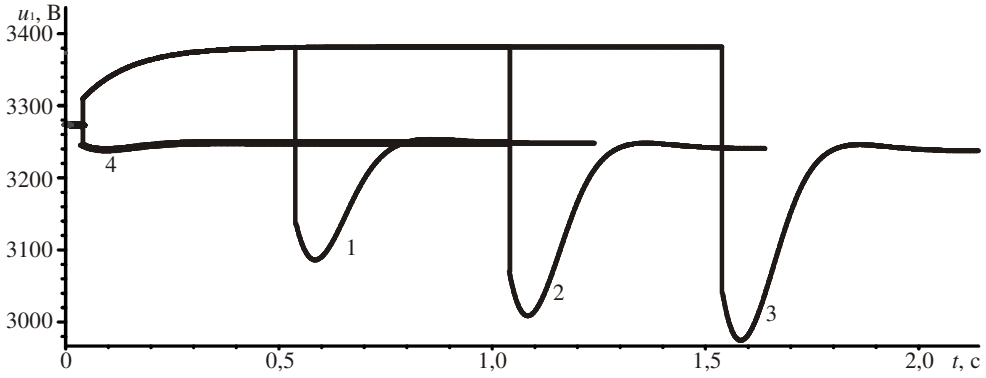


Рисунок 5.45 – Часові залежності зміни фідерної напруги ТП1 для умов рис. 5.39

Одночасно, в термін часу етапу 2 (рис 5.1, в) струм електровоза (рис. 5.41) і напруга на струмоприймачі (рис. 5.39) після розриву дуги різко спадають до нуля. У контурі, утвореному двома вітками ТЕД, струм зменшується експоненціально, досягаючи нуля через 1,7…2,0 с. (рис. 5.40). В той же час, напруги ТП1 і ТП2, після кидків до своїх початкових значень ($U_1 = 3{,}3\,кВ$, а $U_2 = 3{,}4\,кВ$), експоненціально змінюються відповідно до 3,4 і 3,3 кВ (рис. 5.44). Внаслідок різниці фідерних напруг ($U_1 - U_2 = 0{,}1\,кВ$) по тяговій мережі протікає зрівняльний струм, значення якого залежить від терміну часу зняття напруги $t_{зн}$ і при $t_{зн} = 1{,}5\,с$ він складає ~70 А (рис. 5.42 і 5.43).

Найбільш «відповідальним» з точки зору протікаючих по СЕТ процесів є етап 3, етап відновлення напруги (рис. 5.1, г), коли, після поновлення металевого контакту між струмоприймачем і контактним проводом, напруга на ЕРС кидком зростає до $U_{ном} = 3{,}0\,кВ$ (незалежно від $t_{зн}$) (рис. 5.39). В той же час, основний магнітний потік $\Phi(t)$, внаслідок стримуючої дії $\Phi_{вхр}$, створеного великими $i_{вхр}$ (рис. 5.38), починає зростати, але не кидком (як напруга на струмоприймачі), а повільно. Як наслідок, струм якорів ТЕД в паралельних вітках (рис. 5.40) і всього електровозу (рис. 5.41) зростають кидком, максимальні значення яких залежать від $t_{зн}$. Зокрема, струм електровоза $i_е$ складає (рис. 5.41): 2650 А – $t_{зн} = 1{,}5\,с$, 3200 А при 1,0 с і 3450 А при 1,5 с. Тобто, ШВ електровоза спрацює, оскільки йог уставка дорівнює 2500 А, однак коловий вогонь на якорях ТЕД спостерігатися не буде, оскільки для зазначених $t_{зн}$ струм якорів (в паралельних вітках будуть (рис. 5.40) відповідно: 720; 1320; 1610; 1720 А). Струми ТП (рис. 5.42 і 5.43) не перевищують 1840 А навіть при $t_{зн} = 1{,}5\,с$ і тому ШВ тягових підстанцій не спрацьовують.

Максимальне значення кидків струмів ЕРС і ТП залежить від відстані l розташування електровоза до певної ТП (рис. 5.46-5.49): чим ближче ЕРС знаходиться до певної ТП, тим більший за амплітудою кидок струму в електровозі і фідерного струму цієї ТП.

Кількість електрики, головним чином, залежить від початкового значення струму $I_{\text{поч}}$ до відриву струмоприймача, кількість електрики змінюється у межах $Q_{\text{е}} = 465{,}9...1112{,}9\ \ A \cdot c$ (таблиці 5.3). Термін час другого етапу, головним чином, впливає на кількість енергії, що виділяється під час протікання надструмів при торканні струмоприймача; чим довше буде термін часу t_{II}, тим більше термічні пошкодження контактного проводу і струмоприймача. При зміні координати ЕРС величини $Q_{\text{е}}$ і $W_{\text{е}}$ практично незмінні.

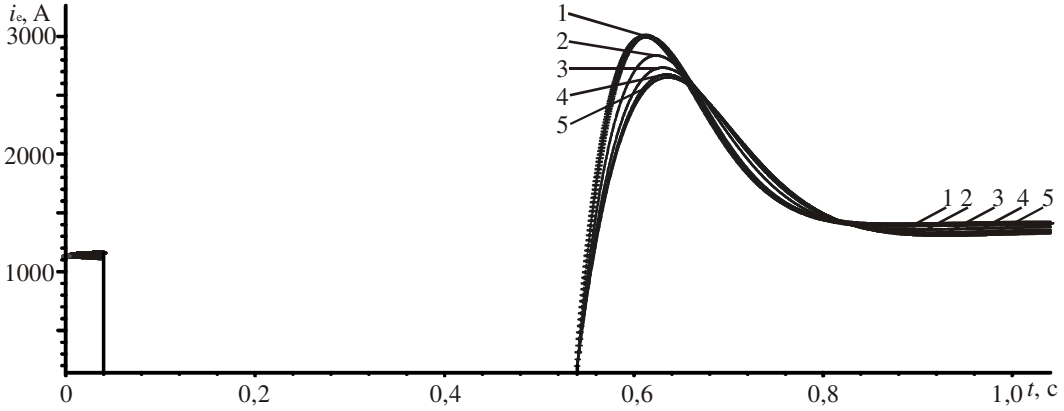


Рисунок 5.46 – Часові залежності зміни струму електровоза на протязі всього режиму «відриву-доторкання» струмоприймача при різній відстані від ТП1 до ЕРС (км): 1 –2; 2 – 4; 3 – 6; 4 – 8; 5 – 10

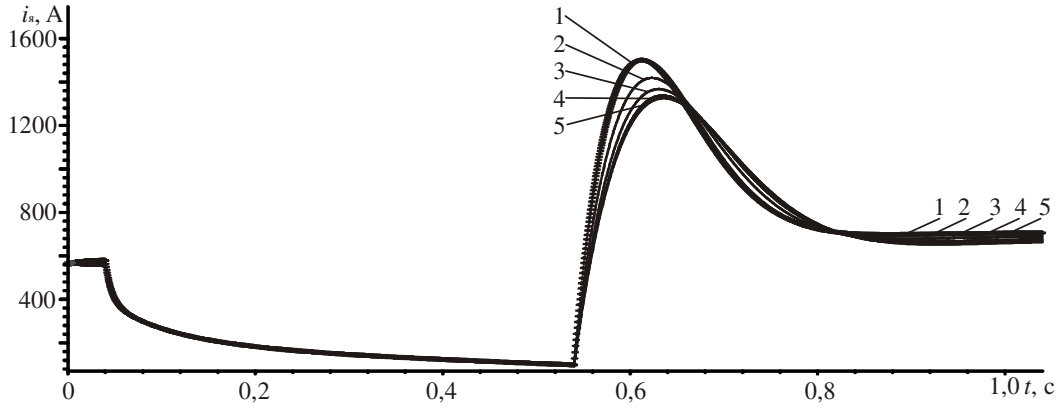


Рисунок 5.47 – Часові залежності зміни струму якоря ТЕД для умов рис. 5.46

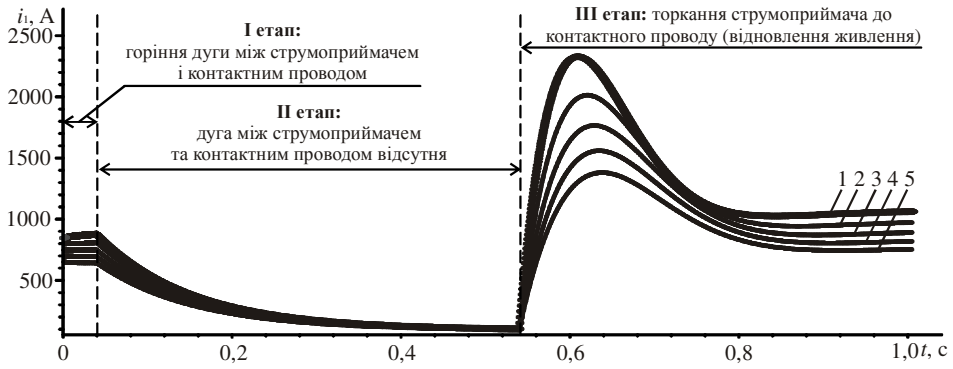


Рисунок 5.48 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1 для умов рис. 5.46

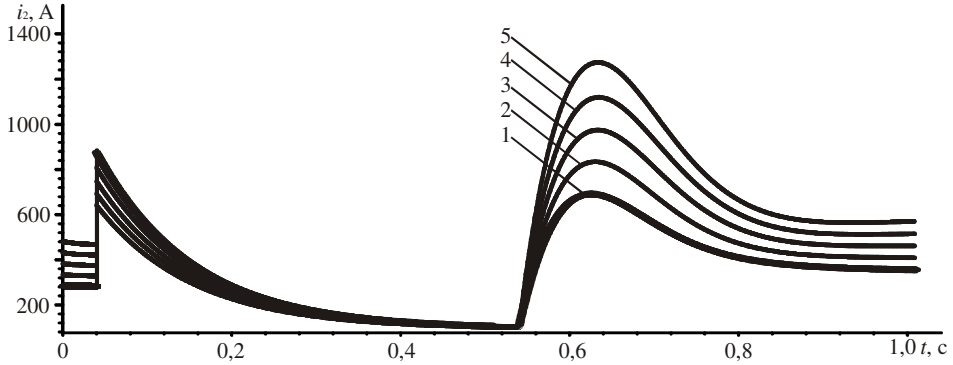


Рисунок 5.49 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП2 на протязі всього режиму «відриву-торкання» струмоприймача, при різній відстані від ТП2 до ЕРС (км): 1 –18; 2 – 16; 3 – 14; 4 – 12; 5 – 10

Таблиця 5.3

Кількісні показники виділеної в точці відриву струмоприймача електроенергії (електровоз рухається на «СП»-з'єднанні)

Залежно від		$Q_e = \int i_e(t)dt,\ A \cdot c$	$W_e = \int i_e^2(t)dt,\ A^2 \cdot c$
початкове значення струму, $I_{поч},\ A$	200	465,9	522455,8
	300	625,8	823005,7
	400	813,6	$1,22 \cdot 10^6$
	565	1024,5	$1,79 \cdot 10^6$
	600	1076,4	$1,96 \cdot 10^6$
відстані від ЕРС до ТП1, $l, км$	2	1077,5	$2 \cdot 10^6$
	4	1056	$1,91 \cdot 10^6$
	6	1040,3	$1,85 \cdot 10^6$
	8	1029,9	$1,81 \cdot 10^6$
	10	1024,5	$1,79 \cdot 10^6$
термін часу другого етапу (відсутності живлення), $t_П, c$	0,5	1002,1	$1,75 \cdot 10^6$
	1,0	1077,7	$2,16 \cdot 10^6$
	1,5	1112,9	$2,37 \cdot 10^6$

З таблиці 5.3 випливає, що імовірність перепалу контактного проводу в аварійному режимі «відриву-торкання» струмоприймача, головним чином, залежить від початкового струму $I_{\text{поч}}$, а також термін часу другого етапу $t_{\text{П}}$: повного відриву струмоприймача від контактного проводу. Положення ЕРС на фідерній зоні не впливає на величини кількості електрики $Q_{\text{е}}$ та енергії $W_{\text{е}}$, що виділяється під час протікання перехідного процесу.

5.3.3 Електромагнітні процеси у режимі неперервного горіння дуги

При піднімані струмоприймача, внаслідок коливання контактного провода і, як результат, миттєвих відривів і доторкань струмоприймача до провода виникає електрична дуга довжиною 2…5 мм між струмоприймачем і контактним проводом. Як випливає із рис. 5.41, 5.46 і 5.52, кількість електрики (ампер-секунд) від дії струму електровозу, який протікає в дузі становить від 650 до 875 А·с, що у повній мірі, згідно з даними рис. 4.57 і 4.58 [9], достатньо для перепалу контактного провода (при одночасному спрацьовуванні ШВ ЕРС, оскільки його уставка складає 2500 А). Тобто, при струмі 1 кА перепал провода 2МФ-100 відбувається при 1150 А·с, при 2 кА – 770 А·с, а при 3 кА – 1070 А·с.

Як уже зазначалось, горіння дуги між струмоприймачем і контактним проводом може тривати від 0,2 до 2,0 с [9], а тривалість часу «відрив-доторкання» струмоприймача – не перевищує 1,5…2,0 с [252, 269]. Тому потрібен аналіз процесів режиму, коли після неперервного горіння дуги певної тривалості $t_{\text{дг}}$ зразу ж відбувається відновлення металевого контакту між струмоприймачем і контактним проводом. Результати розрахунків такого режиму при початковому значені струму електровоза $I_{\text{поч}} = 565\ A$ і $l = 10\ км$ представлені на рис. 5.50 – 5.54, із яких випливає наступне.

При будь-якій тривалості дуги $t_{\text{дг}}$ (до 2,0 с) магнітний потік $\Phi(t)$ не знижується нижче 0,101 Вб, тобто на 0,001 Вб, а потім, при відновленні контакту, він стрімко зростає до 0,107 Вб, але всього лише на 0,006 Вб.

(рис. 5.50). Напруга ж на струмоприймачі $U_{\text{е}}$, хоча і зменшилась під час горіння дуги, але вона не переривається. Якраз оці особливості «поведінки» $\Phi(t)$ і $u_{\text{е}}(t)$ і обумовили той факт, що максимальні значення кидків струмів в паралельних вітках (якорях) електровозу (рис. 5.51), у всьому електровозі (рис. 5.52), а також фідерні струми обох ТП (рис. 5.53 і 5.54), по-перше, як і $\Phi(t)$, не залежать від терміну часу горіння дуги $t_{\text{дг}}$ і, по-друге, їх значення при $I_{\text{поч}} = 565\ A$ і відстань між ТП1 і ТП2 $l = 10\ км$ невеликі і склали відповідно 792 і 612 А.

Вплив величини l, тобто місця розташування ЕРС між тяговими підстанціями, на максимальні значення струмів, зокрема фідерів ТП1 і ТП2 при $t_{\text{дг}} = 0,25\ c$, представлені на рис. 5.55 і 5.56. Як випливає із рис. 5.55, кидок фідерного струму ТП, яка ближче розташована до ЕРС, достатньо помітний і складає 978 А.

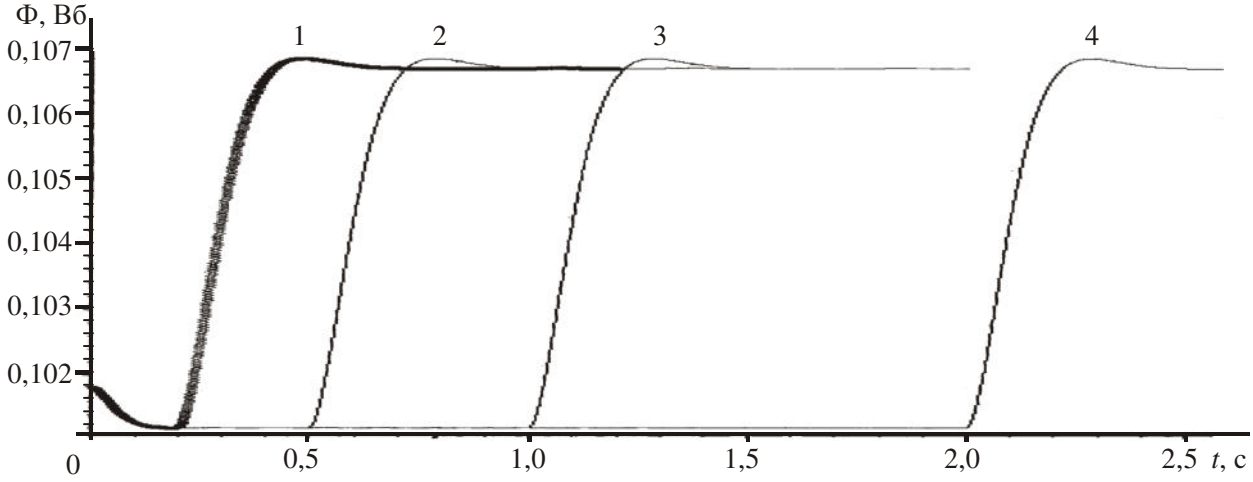


Рисунок 5.50 – Часові залежності зміни основного магнітного потоку ТЕД на протязі всього режиму «відриву-доторкання» при відсутності 2-ого етапу і різній тривалості горіння дуги $t_{дг}$ (с) : 1 –0,2; 2 – 0,5; 3 – 1,0; 4 – 2,0

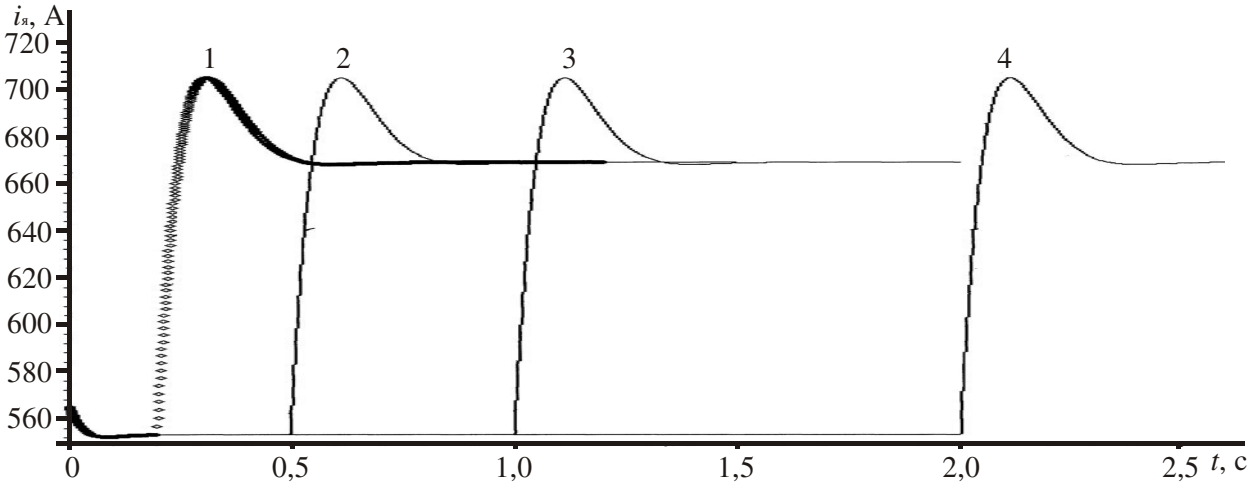


Рисунок 5.51 – Часові залежності зміни струму якоря ТЕД для умов на рис. 5.50

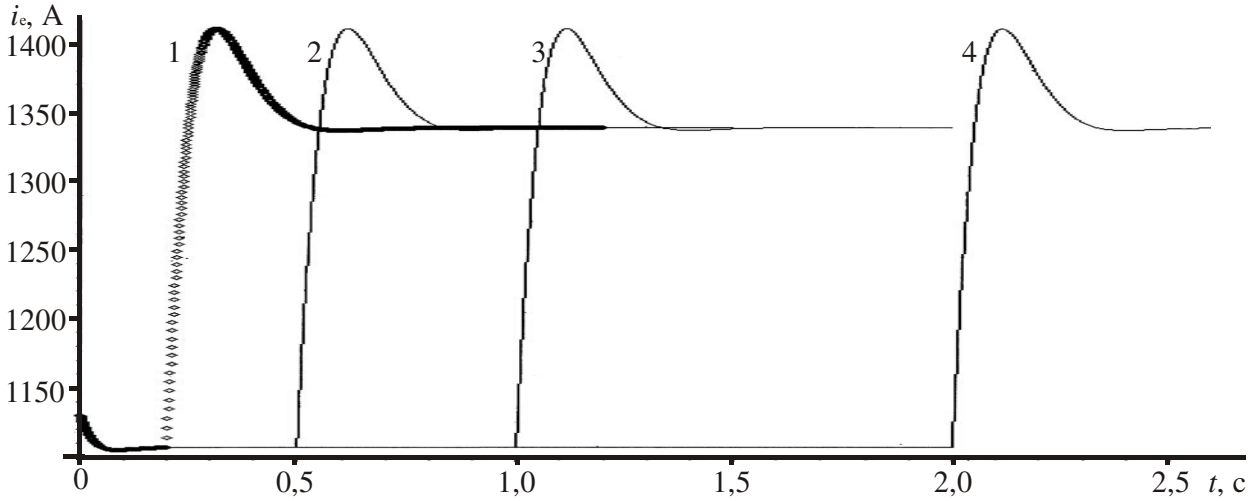


Рисунок 5.52 – Часові залежності зміни струму електровозу

для умов рис. 5.50

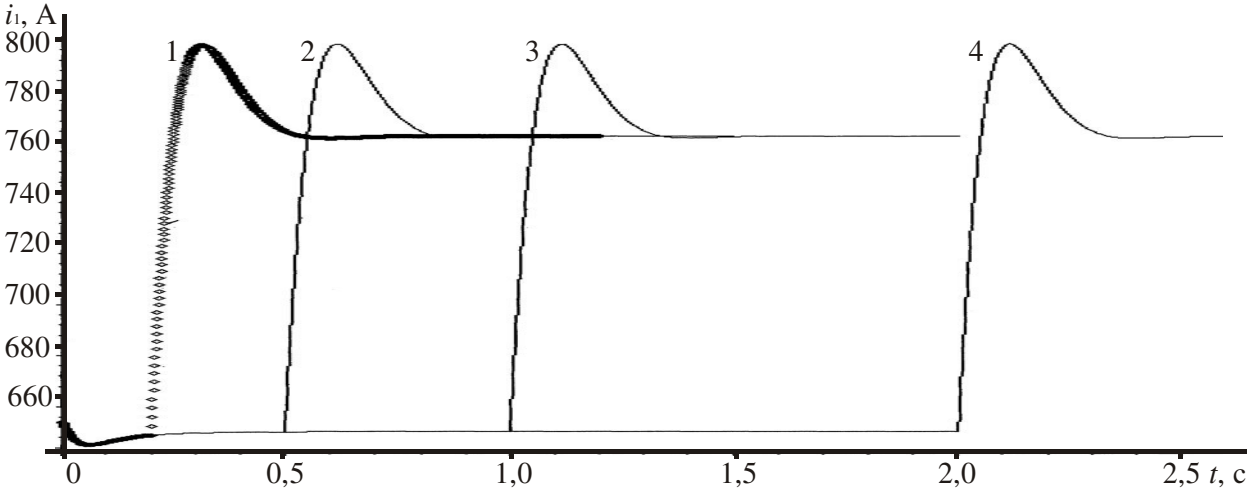


Рисунок 5.53 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1

для умов рис. 5.50

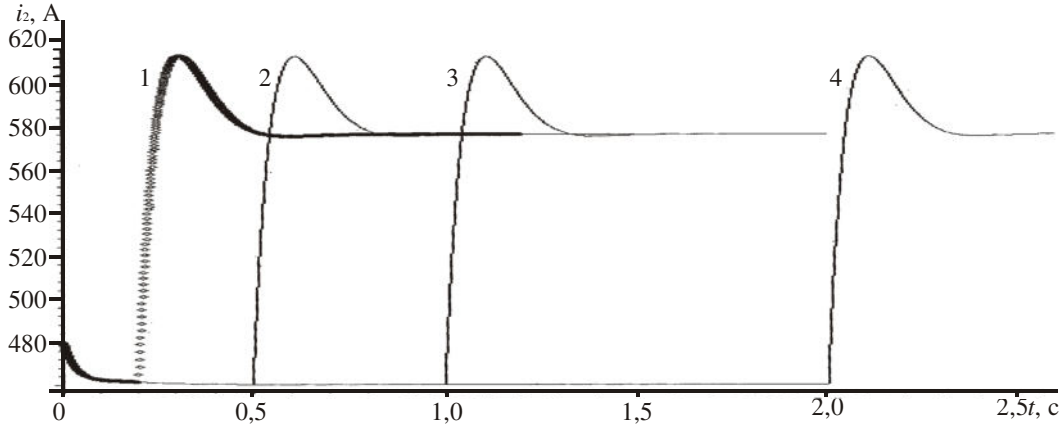


Рисунок 5.54 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП2 для умов рис. 5.50

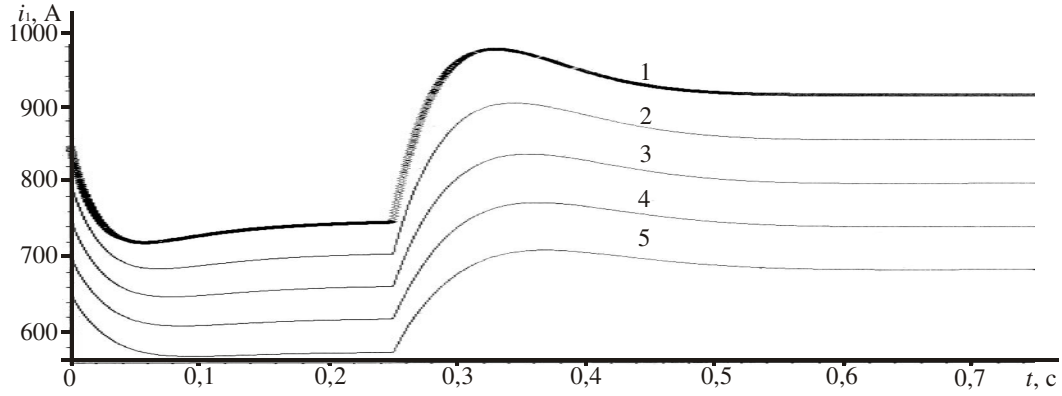


Рисунок 5.55 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1 на протязі всього режиму «відриву-доторкання» при відсутності 2-ого етапу і різній відстані l від ТП1 до ЕРС (км): 1 – 2; 2 – 4; 3 – 6; 4 – 8; 5 – 10

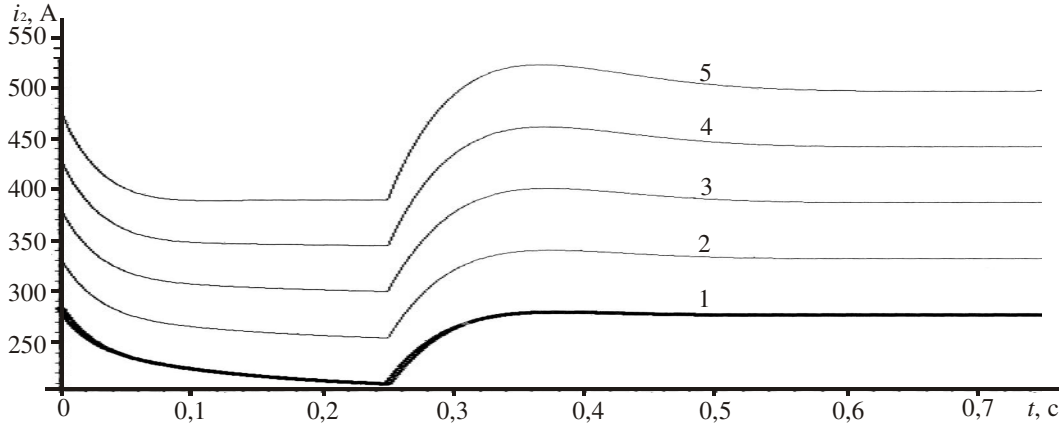


Рисунок 5.56 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП2 на протязі всього режиму «відриву-доторкання» при відсутності 2-ого етапу і різній відстані від ТП2 до ЕРС (км): 1 – 18; 2 – 16; 3 – 14; 4 – 12; 5 – 10

5.4 Оцінка адекватності математичних моделей електромагнітних процесів в режимі відриву струмоприймача від контактного проводу з подальшим його торканням

Для підтвердження правильності розрахунків за математичною моделлю процесів у режимі «зняття-відновлення» напруги автором було здійснено ряд експериментів на діючих електрифікованих ділянках ДП «Придніпровська залізниця».

Перший дослід був виконаний на міжпідстанційній ділянці ЕЧЕ-14 Горяїнове – ЕЧЕ-13 Сухачівка (ЕЧ-3, Верхівцеве). Запис фідерного струму виконували на протязі всього робочого дня з 9^{00} до 16^{00} для даних таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Форма (з прикладом) таблиці для проведення експерименту

№	Тип потягу	Тип електровозу	Час в'їзду на фідерну зону	Кількість вагонів	Ступінь завантаженості вагонів поїзда
1	2	3	4	5	6
1	вантажний	ВЛ8	11^{27}	63	завантажені
2	вантажний	ВЛ8	12^{58}	58	завантажені

Проте, слід відзначити, що ділянка була обрана невдало: на даній ділянці до тягової підстанції ЕЧЕ-13 Сухачівка дуже великий ухил, тому, як правило, вантажні потяги їдуть з подвійною тягою на невеликій швидкості і з двома працюючими пантографами. Переглядаючи осцилограму фідерного струму було виявлено тільки один відрив струмоприймача (рис. 5.57).

Було встановлено, що в цей час на фідерній зоні перебував пасажирський поїзд, електровозом якого був ЧС7. Більш докладно аналізувати експеримент не будемо, зазначимо лише, що форма фідерного струму за осцилограмою подібна до розглядуваних вище теоретичних розрахунків.

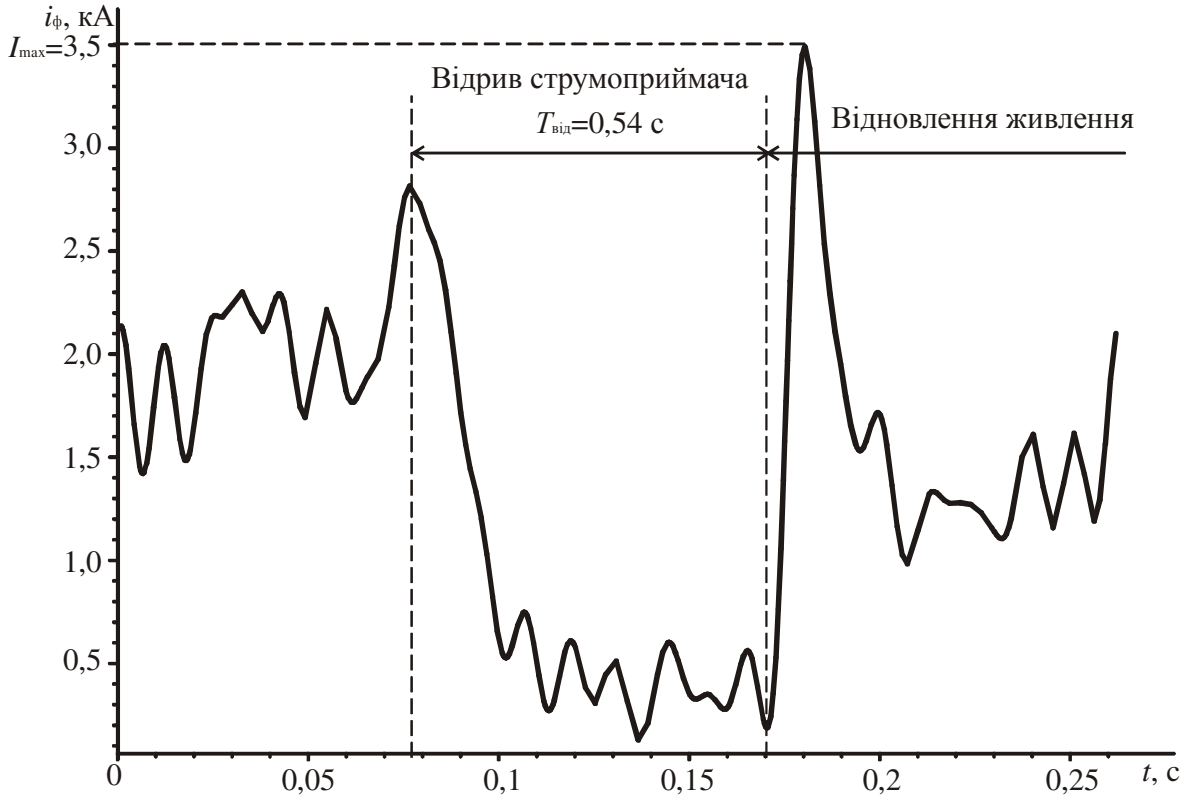


Рисунок 5.57 – Осцилограма фідерного струм під час «відриву-торкання» струмоприймача до контактного проводу

Зважаючи на це, було прийнято рішення провести дослід повторно. Було обрано фідерну зону тягової підстанції ЕЧЕ-12 Баглій по першому шляху в бік підстанції ЕЧЕ-82 Воскобійня. На даній ділянці спостерігається невеликий ухил, тому експеримент був більш вдалим. В процесі експерименту автор неодноразово спостерігав у полі зору горіння дуги (іскріння) під струмоприймачем. Переглядаючи осцилограму, було виявлено, щонайменше, два відриви струмоприймача від контактного проводу. В таблиці 5.4 наведенні данні про потяги. Осцилограми дослідів та результати моделювання представлені на рис. 5.58 і 5.59.

Розглянемо деякі особливості моделювання саме цих перехідних процесів «відриву-відновлення» струмоприймача електровозу серії ВЛ8 (за таблицею 5.4). В процесі моделювання вихідними даними були: схеми тягової підстанції; схеми секціонування контактної мережі; параметри ЕРС типу ВЛ8 (додаток Д); отримані за осцилограмами, початкові значення фідерних

струму $I_{\text{поч}}$ та напруги $U_{\text{поч}}$, а також момент час відриву $T_{\text{від}}$ струмоприймача від контактного проводу (для кожного окремого випадку значення представлені на осцилограмах). В процесі моделювання було прийнято, що на фідерній зоні знаходиться тільки один розглядуваний потяг (дізнатися про присутність іншого не вдалося). Рух потягу здійснювався на «СП»-з'єднанні. За пусковими характеристиками для ЕРС типу ВЛ8 [239] було прийнято швидкість для потягу №1 (за таблицею 5.4) $V_{\text{поч}} \approx 22\,{}^{км}\!/_{год}$, для потягу №2 $V_{\text{поч}} \approx 20\,{}^{км}\!/_{год}$.

Із аналізу осцилограм дослідів (рис. 5.58 і 5.59) можна із впевненістю зробити висновок, що розроблені автором математичні моделі відтворюють процеси в реальній мережі, похибка між розрахунками та експериментами не перевищує 8…10%.

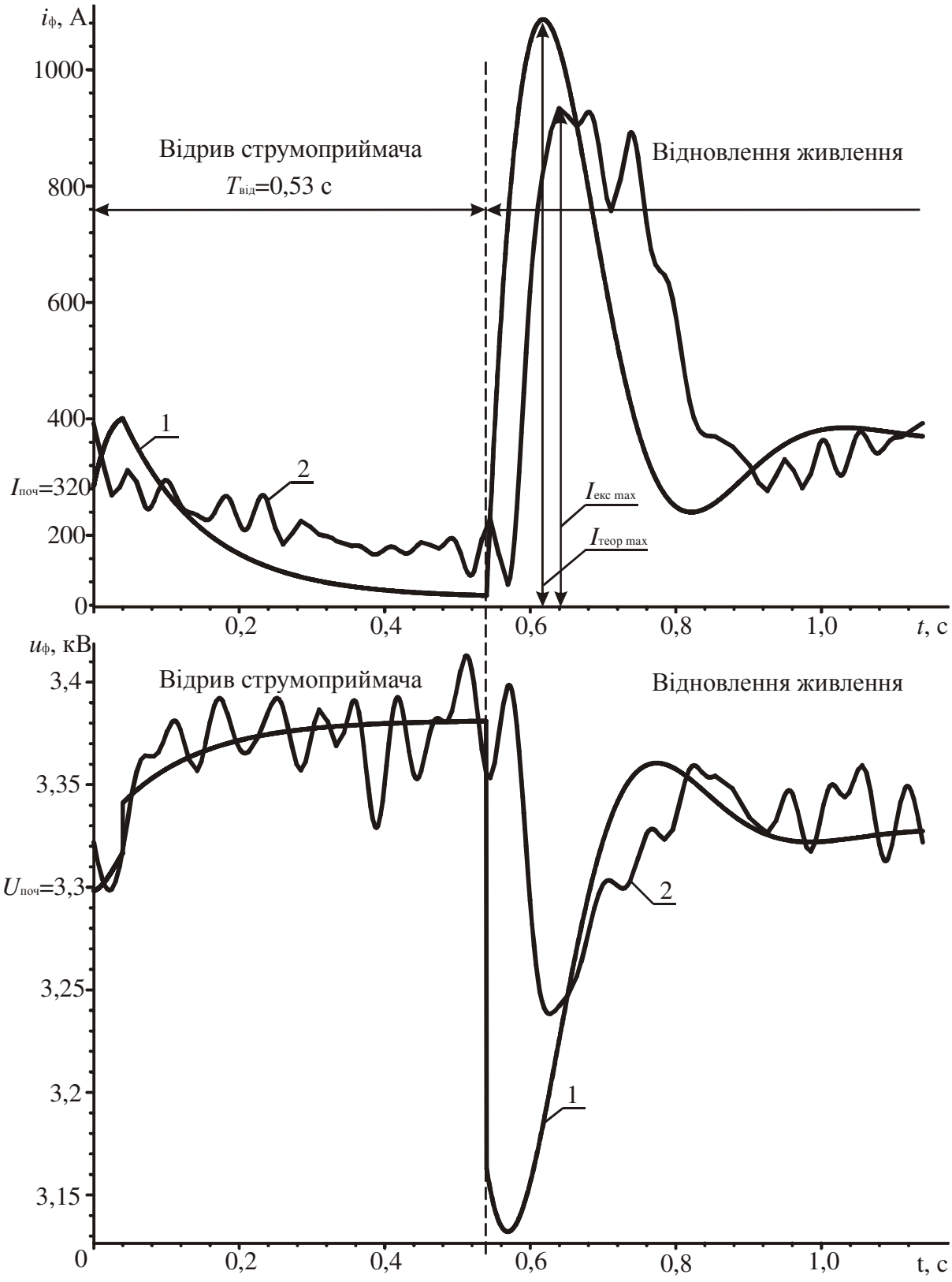


Рисунок 5.58 – Часові залежності фідерних струму $i_ф(t)$ та напруги $u_ф(t)$ під час «відриву-торкання» струмоприймача до контактного проводу електровозу ВЛ8 №1 (за таблицею 5.4), що отримані розрахунком по розробленим математичним моделям (криві 1) і експериментально (криві 2 – осцилограми)

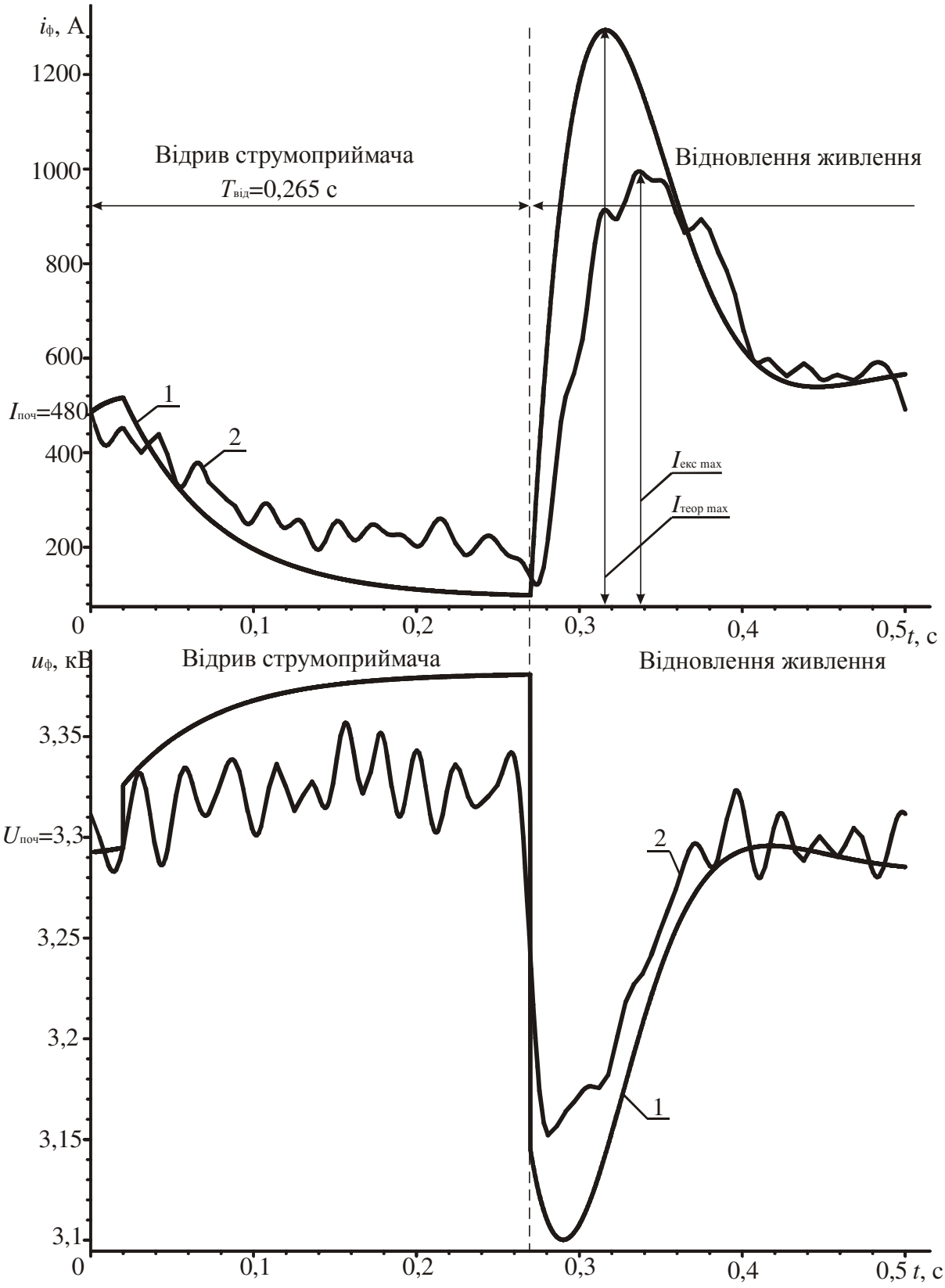


Рисунок 5.59 – Часові залежності фідерних струму $i_ф(t)$ та напруги $u_ф(t)$ під час «відриву-торкання» струмоприймача до контактного проводу електровозу ВЛ8 №2 (за таблицею 5.4), що отримані розрахунком по розробленим математичним моделям (криві 1) і експериментально (криві 2 – осцилограми)

5.5 Висновки до розділу 5

1. Найбільш небезпечною причиною режиму «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі є його відрив-торкання контактного провода, оскільки відрив супроводжується обов'язковим горінням електричної дуги між полозом і проводом, що призводить до руйнування їх поверхонь. Термін часу процесу «відрив-торкання» може тривати до 2 с, в наших експериментальних дослідженнях вона складала від 0,25 до 1,5 с.

2. Експериментальні дослідження режиму «відрив-торкання» струмоприймача, що виконані в цій роботі на ряді діючих електрифікованих ділянок Придніпровської залізниці, свідчать про адекватність розроблених автором математичних моделей електромагнітних процесів, що спостерігаються в системі електричної тяги при втраті і подальшому відновлені напруги на струмоприймачі. Похибка між результатами експериментів і теоретичних розрахунків не перевищує 8…10 %.

3. Під час другого етапу повного зняття напруги, тобто після зникнення струму і відсутності горіння дуги, саме електромагнітна енергія, що накопичена в електромагнітному полі обмоток тягових двигунів, визначає характер зміни магнітного потоку $\Phi(t)$, а, отже, усіх перехідних величин в тяговому колі електровоза, а в тяговій мережі між тяговими підстанціями протікає струм зрівняння ~100 А як при «С», так і при «СП»-з'єднанні тягових електричних двигунів.

4. Третій етап, етап відновлення напруги є найбільш енергетично небезпечним, його перебіг залежить від двох попередніх (підготовчих) етапів, тривалості зняття напруги $t_{зн}$ та початкового значення струму електровозі $I_{поч}$.

В режимі пуску електровоза і далі до ходової позиції «С»-з'єднання тягових електричних двигунів величина основного магнітного потоку $\Phi(t)$ на другому етапі зменшується дуже повільно і лише на 0,001 Вб в інтервалі $t_{зн} = 0,25...1,0$ с і тому на третьому етапі:

- максимальні значення кидків струму не залежать від $t_{зн}$ і невеликі: електровоза в інтервалі 620…660 А, а фідерних – 480…500 А (ТП1) і 360…380 А (ТП2);
- від положення місця електрорухомого складу на фідерній зоні його тяговий струм не залежить і становить 630 А, а фідерні струми залежать: із зростанням відстані між поїздом і тяговою підстанцією амплітуда кидка фідерного струму зменшується і коливається в межах 370…660 А;
- кількість електрики, що виділяється в місці відриву-контакту струмоприймача з контактним проводом за весь термін часу перехідного процесу, коливається від 259,4 до 338,9 А·с при зміні $I_{поч}$ від 500 до 600 А, $t_{зн}$ від 0,5 до 1,0 с і відстані від електрорухомого складу до тягової підстанції від 2 до 10 км. Цієї кількості електрики не достатньо для перепалу контактного провода, але при цьому виділяється теплоти 7279 $А^2$·с, достатньої для пошкодження поверхонь контакту.

5. Більш небезпечним для розглядуваного аварійного режиму є «СП»-з'єднання тягових двигунів. Магнітний потік сильно залежить від терміну часу зняття напруги і за 1,5…2,0 с досягає майже нульового значення, при спаді 0,1 Вб, в результаті:

- амплітуди кидків струму фідерів в діапазоні $t_{зн} = 0,5...1,5$ с складають 1400…1840 А (швидкодіючі вимикачі тягових підстанцій не спрацьовують), а електровоза відповідно 2650…3450 А. Оскільки уставка швидкодіючого вимикача електровоза дорівнює 2500 А, то він вимикається, хоча і коловий вогонь на колекторі не виникає, оскільки струм якоря не перевищує 1720 А, тобто менше $4 \cdot I_{ном}$, при якому виникає вогонь;
- чим ближче електрорухомий склад знаходиться до тягової підстанції, тим більші кидки струмів і електровоза, і фідера: при $l = 2$ км

кидок струму електровоза ДЕ1 складає 3000 А (а якоря 1480 А), а фідера ближньої тягової підстанції – 2300 А;

- кількість електрики, що виділяється в точці відриву струмоприймача, складає 465,9…1112,9 А·с, що достатньо для перепалу контактного провода.

6. У випадку, коли другий етап повного відриву струмоприймача відсутній, тобто дуга між контактним проводом і струмоприймачем горить до моменту торкання останнього, величина зменшення магнітного потоку взагалі незначна і не перевищує 0,001 Вб. В результаті перехідний процес більш «м'який»: стрибки фідерного струму і струму електровозу не перевищують: 100 А при «С»-з'єднанні; 300 А електровоза і 160 А фідера на «СП»-з'єднанні.

7. Напруги на тягових підстанціях за термін часу перехідного процесу в режимі «відрив-торкання» струмоприймача змінюються відповідним чином, не виходячи за межі 2900… 3450 В.

РОЗДІЛ 6

ЗАСОБИ І МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ В АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ

В попередніх розділах 3, 4 і 5 викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень, в ході здійснення яких автору вдалося виявити ряд нових ознак в характерах зміни перехідних електричних величин, що спостерігаються в досліджених аварійних режимах. На основі цих ознак, а тому за новими принципами, в дисертації розроблено і нижче, в цьому розділі, описано нові мікропроцесорні системи фідерного 3,3 кВ захисту, інформаційної системи, а також запропоновано і обґрунтовано інші технічні засоби і методи по підвищенню ефективності роботи системи електричної тяги постійного струму в аварійних режимах. Безумовно, що такі роботи є своєчасними, оскільки, згідно з [10], у найближчий період пріоритетним напрямком роботи Головного управління електрифікації та електропостачання є комплексна модернізація тягових підстанцій у питанні фідерної автоматики і застосування сучасних мікропроцесорних систем захисту [275].

6.1 Розробка мікропроцесорної системи фідерного захисту, що реагує на швидкість лінійного зменшення фронту фідерної напруги

В підрозділі 3.6 викладено теорію роботи системи захисту тягового електропостачання, основаного на крутизні лінійного зменшення фронту фідерної напруги в аварійних режимах КЗ в тяговій мережі. Нижче, в цьому підрозділі, викладається розробка нової (мікропроцесорної) системи захисту, що базується на цій новій ознаці, на цьому новому принципі.

Згідно результатів експериментів, проведених на тягових підстанціях постійного струму України, було встановлено швидкості падіння напруги для близького, середнього та дальнього КЗ на фідері (таблиці 3.11). Ці швидкості

становлять: для близького КЗ – 2000-4000 В/мс; середнього КЗ – 1000-2000 В/мс; дальнього КЗ – 400-1000 В/мс. Швидкість падіння напруги менше 400 В/мс вважається нормальним навантаженням.

Опираючись на ці дані, була розроблена система, яка враховуючи дані швидкості, буде виявляти КЗ та вказувати на зону виникнення аварійної ситуації.

6.1.1 Розрахунок швидкостей падіння напруги фідера за конкретний проміжок часу в цифровому еквіваленті

Маючи номінальні значення падіння напруги при близькому, середньому та дальньому короткому замикання, розраховуємо номінальні значення цих швидкостей в цифровому вигляді. Напруга фідера 4000 В перетворена схемою подільника напруги буде рівною 5В, тоді визначаємо номінальні значення швидкостей падіння напруги в 5-ти вольтовому еквіваленті, вони становлять: близьке КЗ – 2,5-5В/мс; середнє КЗ – 1,25-2,49В/мс; дальнє КЗ – 0,5-1,24В/мс.

Опираючись на технічні характеристики обраної схеми спряження і гальванічної розв’язки, робимо висновок, що схема передає значення напруги в діапазоні 0-5 В у вигляді 0,1102-4,8639 В. Далі визначаємо номінальні значення швидкостей падіння напруги в 5-ти вольтовому еквіваленті після проходження напруги через схему спряження і гальванічної розв’язки: близьке КЗ – 2,4319-4,8639В/мс; середнє КЗ – 1,2159-2,4318В/мс; дальнє КЗ – 0,4863-1,2158В/мс.

Також, знаючи технічні показники до обраного АЦП, можна зазначити, що, оскільки він 16-ти розрядний, то напруга 5,3 В в ньому перетвориться в максимальне значення 65535 біт. Діленням максимальної напруги (5,3 В) на максимальне 16-ти розрядне число 65535 біт розраховується значення зміни напруги для зміни числа в цифровій формі на 1мс; це число становить 80,8728 мВ. Далі, методом ділення номінальних значень швидкостей напруги на це число, знаходимо границі в цифровій формі за проміжок часу 1 мс, во-

ни становлять: при близькому КЗ – 30071-65535 біт; середньому КЗ –15035-30070 біт; дальньому КЗ: – 9021-15034 біт.

В розробленому алгоритмі напруга фідера вимірюється 8 разів і розраховується середнє значення за термін часу 52 мкс. Швидкість падіння напруги фідера в цифровій 16-ти розрядній формі за проміжок часу 52 мкс складає такі значення: при близькому КЗ – 1774-3867 біт; середньому КЗ – 887-1773 біт; дальньому КЗ – 532-886 біт. Ці цифри використовуються далі в програмі для виявлення КЗ та визначенні місця його виникнення.

6.1.2 Структурна схема

Структурна схема пристрою захисту представлена на рис. 6.1 [276].

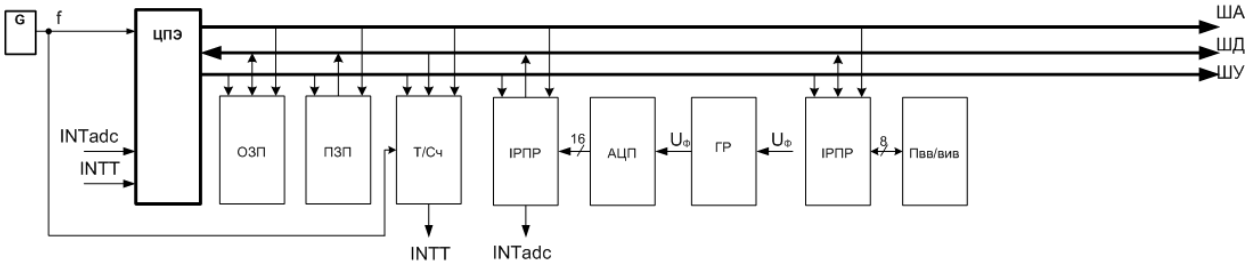


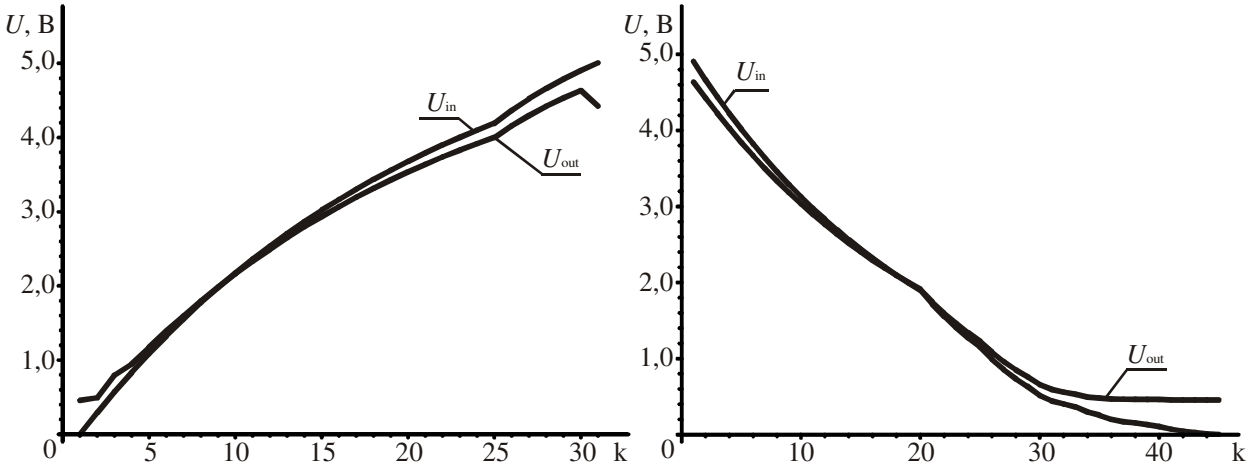
Рисунок 6.1 – Структурна схема мікропроцесорного пристрою захисту, де G – кварцовий резонатор, який використовується в схемі для генерації частотних синхроімпульсів; ЦПЕ – центральний процесорний елемент. Мікропроцесорний пристрій для управління системою; ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій; Т/Сч – таймер-лічильник, який використовується для відліку затримок; ІРПР – паралельний інтерфейс прийому й передачі даних; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач, який використовується для перетворення рівня напруги в цифрову форму для обробки ЦПЕ; ГР – пристрій спряження і гальванічної розв'язки, який використовується в схемі для від'єднання АЦП від напруги фідера; ПВив – пристрій виводу, який використовується для виведення інформації на індикатори, а також для видачі сигналу на ШВ

6.1.3 Вибір елементної бази для технічної реалізації пристрою

Для захисту пристрою від високої напруги блок обробки інформації відділяється від блоку зчитування інформації за допомогою гальванічної

розв'язки на базі оптронів, яка також передає інформацію з мінімальною нелінійністю. Для вирішення цієї задачі було обрано мікросхему Hcnr-200 фірми AvagoTechnologies. Крім цього, Hcnr-200 може використовуватися як гальванічна розв'язка аналогових сигналів в різних пристроях, що вимагають високого рівня стабільності і лінійності, широку смугу пропускання і низьку вартість вирішень поставленої задачі. Вона забезпечує максимальну гнучкість використання і, залежно від схемного рішення, може працювати в різних режимах, включаючи: уніполярний/біполярний, AC/DC, інверсний/не інверсний. Основні характеристики даної мікросхеми такі: наднизька нелінійність – 0,25%; коефіцієнт підсилення (IPD2/IPD1) – +/-15%; низька залежність коефіцієнта підсилення від зміни температурного режиму; смуга пропускання 0...1,5 МГц; передача напруги 0…5 В; напруга пробою 9000 В.

Моделювання за допомогою спеціальної програми PROTEUS типової схеми вмикання гальванічної розв'язки, запропонованої розробниками кристалу Hcnr-200, було виявлено, що вона має відхилення вихідної напруги U_{out} від вхідної U_{in} (рис. 6.2). На графіках по осі абсцис відкладено значення k – номер експерименту.



а) збільшення U_{in} б) зменшення U_{in}

Рисунок 6.2 – Графіки зміни вихідної напруги U_{out} відносно вхідної U_{in} до модернізації типової схеми вмикання кристалу Hcnr-200

Для зменшення даного відхилення схему було модифіковано до вигляду, представленого на рис. 6.3:

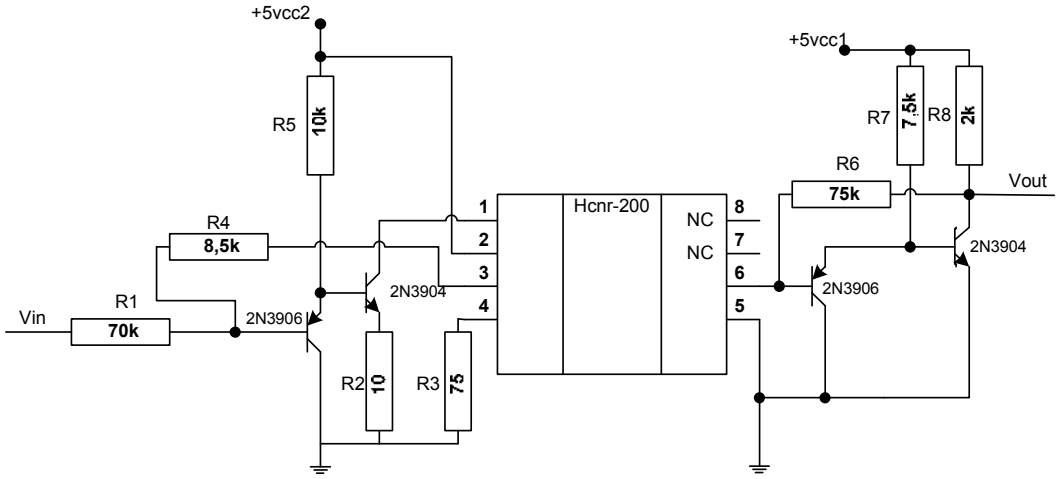
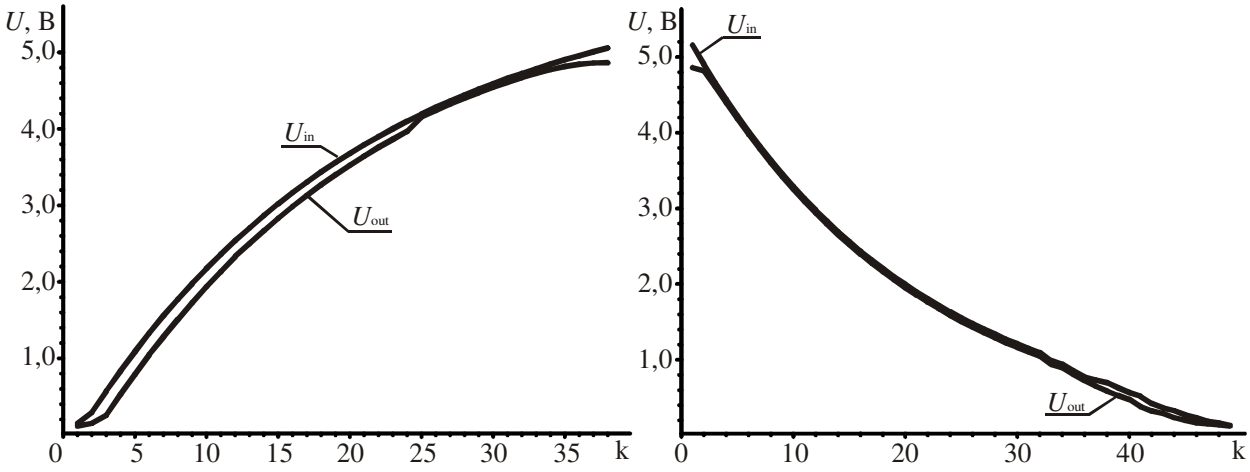


Рисунок 6.3 - Схема вмикання оптронної пари у вимірювальне коло

Після зміни схеми її роботу знову було промодельовано. Як видно з нижче представлених графіків рис. 6.4, напруги по входу і виходу запропонованої схеми проходять майже без змін.



а) збільшення U_{in} б) зменшення U_{in}

Рисунок 6.4 – Графіки зміни вихідної напруги U_{out} відносно вхідної U_{in} після модернізації (покращення) типової схеми вмикання кристалу Hcnr-200

При виборі необхідного АЦП керувались тим, що він повинен точно розпізнавати напругу, перетворювати інформацію мінімум в 12-ти розрядний вид, краще в 16-ти розрядний, бути достатньо швидкісним, мінімум 50000

перетворень/сек, і працювати в достатньо широкому температурному діапазоні. Тому для реалізації цих задач було обрано АЦП max1165 фірми Maxim. 16-ти розрядний, економічний АЦП послідовного наближення має функцію автоматичного вимикання, вбудований тактовий генератор, що налаштовується на стадії виробництва, з температурним діапазоном роботи -40…+85 ^{o} С. На рис. 6.5 представлено типову схему вмикання мікросхеми.

Процесорний пристрій має бути достатньо швидкодіючим для того, щоб дозволяти отримувати і обробляти вхідні дані (переведений в цифровий шістнадцятирозрядний вигляд рівень напруги фідера) та видавати реакцію на них кожні 6,1 мкс, що пов’язано з тим, що термін часу перетворення АЦП в найшвидшому режимі становить 6,1 мкс. Крім цього, процесор повинен мати достатньо портів вводу/виводу інформації для того, щоб прийняти 16 розрядів від АЦП, видати 3 сигнали на індикацію, 1 сигнал на схему ШВ, прийняти сигнал від диспетчера і від АПВ на ТП. Виходячи з цих умов, в якості процесорного пристрою було обрано мікроконтролер ATmega8515 в корпусі PDIP 40. ATmega8515- економічний 8-розрядний мікроконтролер, заснований на посиленій AVR RISC архітектурі, блок-схему представлено на рис. 6.6. AVR ядро об’єднує багатий набір інструкцій з 32 робочими регістрами загального призначення. Усі 32 регістри безпосередньо увімкнені до АЛУ (арифметико-логічний пристрій), що дозволяє вказувати два регістри в одній інструкції і виконати її за один цикл. Дана архітектура має більшу ефективність коду і в 10 разів більшу продуктивність в порівнянні з CISC мікроконтролерами. ATmega8515 забезпечує продуктивність 1 млн. операцій в секунду на частоті синхронізації 1 МГц за рахунок виконання більшості операцій за один машинний цикл і дозволяє оптимізувати споживання енергії за рахунок зміни частоти синхронізації.

Обраний мікроконтролер повністю задовольняє заданим умовам. При вмиканні кварцового резонатора з частотою видачі сигналів КХ-13Т 16 МГц (GENERelectronic) він встигає отримувати, обробляти і реагувати на вхідну

інформацію (напруга фідера) з достатньою швидкістю. Температурний режим роботи обраної мікросхеми -40…+85 ^{o}C.

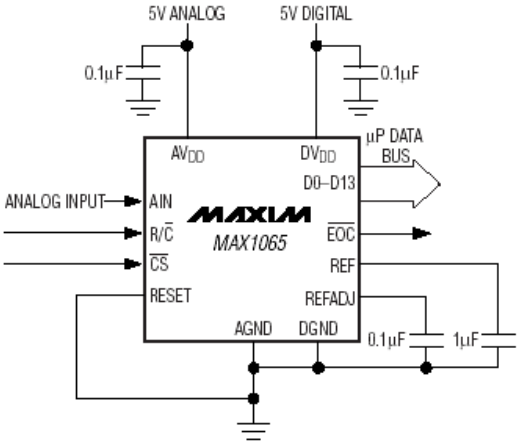


Рисунок 6.5 – Типова схема вмикання мікросхеми MAX 1165

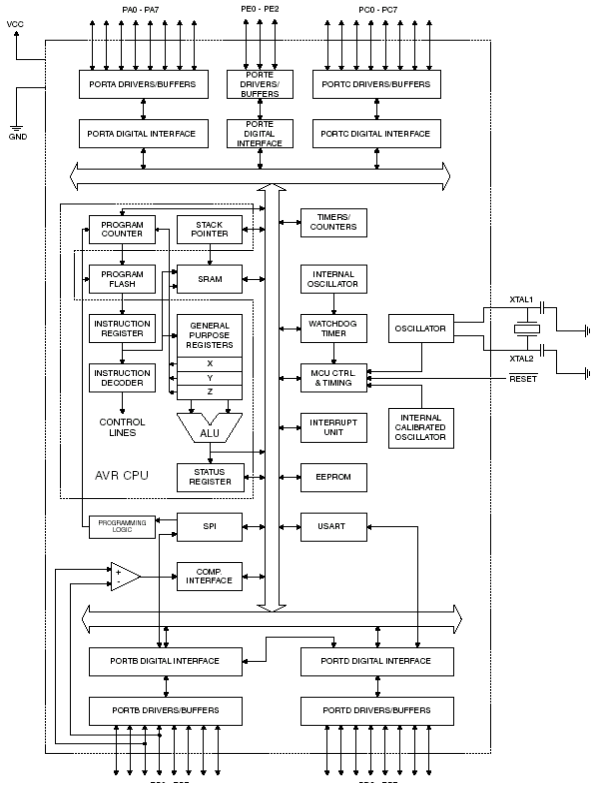


Рисунок 6.6 - Блок схема мікроконтролера ATmega8515

6.1.4 Розробка функціональної та принципової схеми системи

Функціональна схема зображена на рис. 6.7. В якості центрального процесорного елементу було обрано мікроконтролер Atmega8515. Також в ньому знаходиться оперативно запам’ятовуючий пристрій і таймер-лічильник.

Порти PA і PC налаштовані на прийом інформації. До них увімкнено відповідно (D8-D15) і (D0-D7) розрядів від АЦП. Порт PB налаштовано на видачу інформації. До нього увімкнено сигнали до трьох індикаторів (розряди PB0-PB2), також підключено сигнал до ШВ (розряд PB7). Розряд 6 порта PD (PD6/WR#) використовується для видачі сигналу RD/C# (видача на шину даних, перетворення напруги в цифрову форму). Він подається на вхід АЦП (RD/C#).

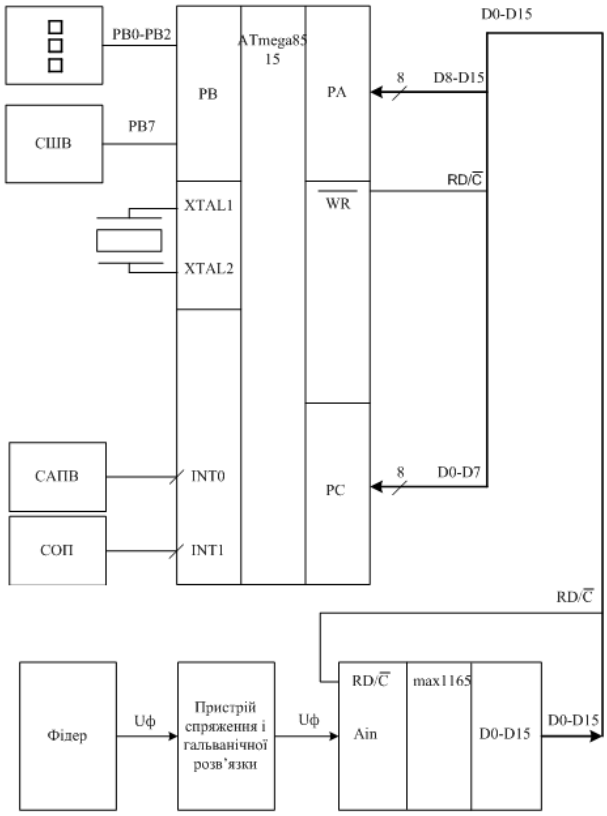


Рисунок 6.7 – Функціональна схема пристрою захисту

До входів XTAL1, XTAL2 під'єднано кварцовий резонатор. До входу переривання INT0 подано сигнал спрацьовування АПВ. До входу переривання INT1 подано сигнал від оператора (скидання індикації). Напруга, що знята з фідера, проходить через пристрій спряження і гальванічної розв'язки і подається на вхід Ain АЦП. Для того, щоб приймати сигнали на входи переривань мікроконтролера, в ньому треба задати слова налаштування маски переривань: регістр GICR

7	6	5	4	3	2	1	0	GICR
1	1	0	X	X	X	0	0	C0h

0 - не підтверджується переміщення вектора переривань в початок пам'яті;

1 - заборона переміщення вектора переривань в початок пам'яті;

2, 3, 4 - не використовується;

5 - заборона переривання INT2;

6 і 7 - дозвіл переривання відповідно INT0 INT1.

Налаштування режиму спрацьовування переривань: регістр MCUCR

7	6	5	4	3	2	1	0	MCUCR
0	0	0	0	1	1	1	1	0Fh

(0, 1) і (2, 3) – режим спрацювання по фронту відповідно сигналів INT0 INT1;

4, 5 – не використовується режим SLEEP;

6 – не використовується зовнішня пам’ять;

7 –вимкнення альтернативних функцій входів (RD, WR, ALE).

Принципова схема пристрою зображена на рис. 6.8. Для забезпечення частоти мікроконтролера в схему увімкнено кварцовий резонатор з двома конденсаторами ємністю по 16 пФ. На схемі зображено роз’єми X1, X2. До роз’єму X1 під’єднано вхід живленняVCC1, вхід заземлення GND, три виходи сигналів індикації, вхід сигналу від АПВ, вхід сигналу від оператора. До роз’єму X2 під’єднано окремий вхід живлення VCC2, який подається для живлення вхідної частини схеми спряження і гальванічної розв’язки. Також до нього увімкнено дві лінії для зняття напруги з фідера (UФ і GND), які подаються на вхідну частину схеми спряження і гальванічної розв’язки.

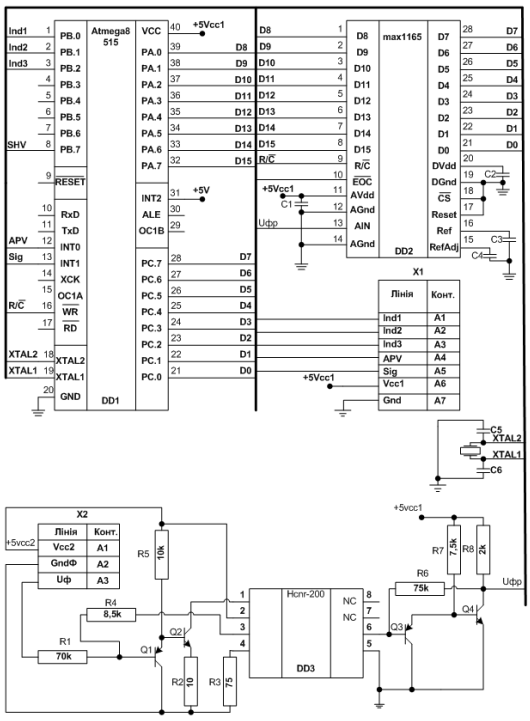


Рисунок 6.8 – Принципова схема захисного пристрою

Для забезпечення стійкості пристрою від електромагнітних полів на тяговій підстанції його потрібно екранувати. Високовольтна частина (виділена пунктиром на схемі) має знаходитись окремо від основної частини прийняття та процесорної обробки інформації. Лінія Uфр має підходити до процесорної частини пристрою в екранованому проводі.

Розроблена і описана вище система захисту, на відміну від існуючих систем, дозволяє:розрізняти нормальний режим і режим КЗ; розпізнавати вид КЗ (близьке, середнє, дальнє); ліквідовувати «мертві зони» існуючих захисних пристроїв. Для цього вона володіє наступними функціями: аналізує фідерну напругу, зокрема її фронт; визначає фактичність КЗ; подає сигнал на схему спрацювання ШВ; визначає зону його виникнення; видає інформацію про нього на індикатори.

Розрахунок терміну часу відпрацювання програми захисту за лінійним зменшенням фідерної напруги показав, що вже через 0,104 мс мікропроцесорний пристрій видає сигнал на вимикання швидкодіючого вимикача ТП. Проте, зрозуміло, що цей сигнал не миттєво подається на схему вимикання ШВ. Керування швидкодіючим вимикачем за сигналом мікропроцесорних пристроїв здійснюється через пристрої узгодження. Для виконання цієї функції на існуючих мікропроцесорних системах захисту найбільшого розповсюдження набула, так звані, пристрої форсування вимикання ШВ [14]. Термін часу вимикання таких пристроїв коливається у межах від 5 до 10 мс.

6.1.5 Оцінка ефективності запропонованої системи за енергетичними показниками режиму короткого замикання

Головним завданням розробленої мікропроцесорної системи захисту є виявлення аварійного режиму КЗ на ранніх етапах його виникнення і вимикання цього процесу при невеликих значеннях струму короткого замикання. Основним критерієм ефективності функціонування цієї системи є кількість електрики, що проходить через електричну дугу в точці короткого замикання і в дугогасних камерах захисних апаратів [72]. Саме цей показник, головним

чином, визначає ступінь термічного пошкодження дугогасних камер контактів ШВ і контактного проводу в точці короткого замикання.

Для оцінки кількості електрики до та після впровадження запропонованого захисту виконаємо математичне моделювання режиму КЗ в ТМ без ЕРС і при наявності електротягової одиниці на фідерній зоні.

6.1.5.1 Математичне моделювання короткого замикання в ТМ без ЕРС на фідерній зоні розглянемо на прикладі схеми заміщення, представленої на рис. 3.26. Відстань між ТП1 і ТП2 складає 20 км, координата точки КЗ $x_{\text{кз}} = 10$ км (рис. 3.18), тобто КЗ виникло посередині фідерної зони. З врахуванням часу роботи мікропроцесорної системи, пристрою узгодження, а також власного терміну часу спрацювання ШВ t_1 (згідно робіт [72, 192] для сучасних ШВ $t_1 < 5$ мс) (рис. 3.23) приймемо термін часу від моменту виникнення КЗ до розходження контактів 10 мс.

Результатами чисельних розрахунків моделі КЗ є часові залежності перехідних електричних величин. На рис. 6.9 представлено графіки струму в точці КЗ до та після впровадження запропонованого захисту.

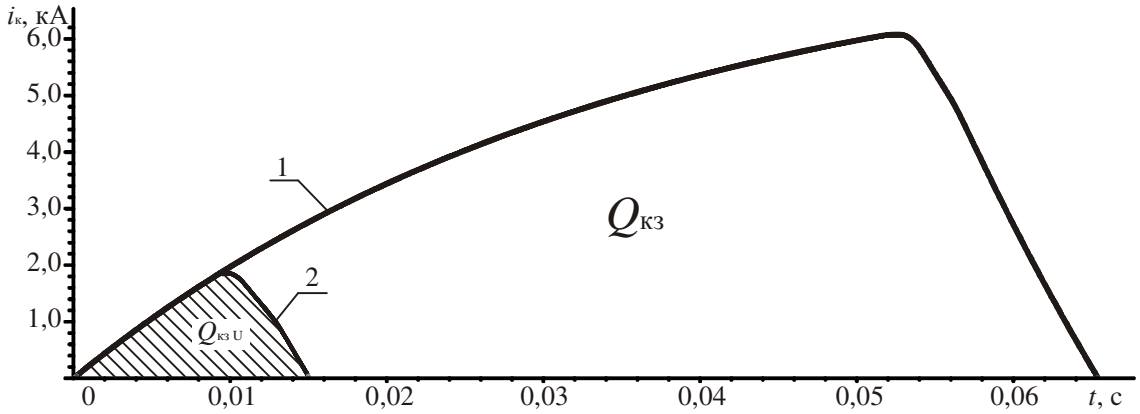


Рисунок 6.9 – Часові залежності струму в точці КЗ: 1 – до впровадження запропонованої системи; 2 – після її впровадження

З графіку видно, що кількість електрики (амперсекунд) до впровадження $Q_{\text{кз}}$ значно більша за цю величину після впровадження $Q_{\text{кз U}}$ системи захисту за швидкістю спадання фідерної напруги (тут і далі індекс «U» позначає енергетичні показники і перехідні електричні величини $a(t)$ після

впровадження запропонованої системи захисту за швидкістю зменшення фідерної напруги). В таблиці 6.1 представлено чисельні значення енергетичних показників перехідних струмів.

Таблиця 6.1

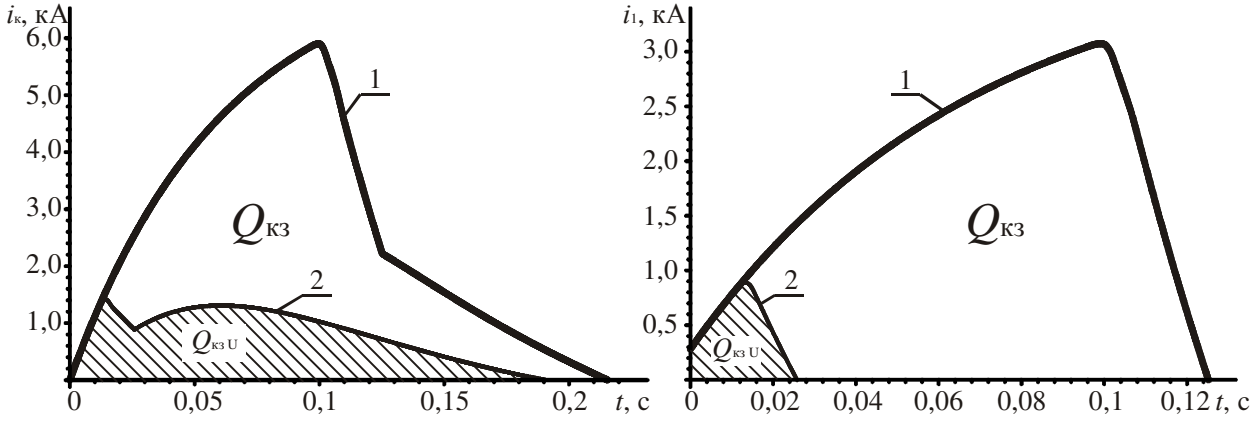
Кількісні показники виділеної електрики Q і теплової енергії W в точці КЗ і в дугогасних камерах ШВ

перехідні струми / енергетичні показники	$i_к(t)$	$i_1(t)$	$i_2(t)$
$Q=\int a(t)dt,\ \text{А}\cdot\text{с}$ (до впровадження системи)	482,9	249,4	234,1
$Q_U=\int a_U(t)dt,\ \text{А}\cdot\text{с}$ (після впровадження системи)	31,3	17,43	13,87
$Q_U/Q,\ \%$	6,48	6,991	5,925
$W=\int a^2(t)dt,\ \text{А}^2\cdot\text{с}$ (до впровадження системи)	$2{,}197\cdot10^6$	$0{,}578\cdot10^5$	$0{,}523\cdot10^5$
$W_U=\int a_U^2(t)dt,\ \text{А}^2\cdot\text{с}$ (після впровадження системи)	41933,6	12411,9	8775,5
$W_U/W,\ \%$	1,908	2,144	1,678

З таблиці випливає наступне, при наявності електричної дуги в точці короткого замикання, що виникло на фідерній зоні де відсутня запропонована система захисту, контактний провід, майже напевно, перегорить, оскільки кількість електрики в точці короткого замикання складає $Q_{кз}=482{,}9\ \text{А}\cdot\text{с}$ (як було зазначено в розділі 5 критичне значення, при якому спостерігається перепал контактного проводу складає 450 А·с). Після впровадження мікропроцесорного захисту кількість електрики становить $Q_{кз\,U}=31{,}3\ \text{А}\cdot\text{с}$ і складає лише 6,48 % від попереднього значення. У цьому випадку мови про термічне пошкодження елементів контактної підвіски навіть не йдеться. Крім того, бачимо, що значно зменшено енергетичну напруженість дугогасної камери захисних апаратів ТП1, оскільки $Q_{1\,U}=17{,}43\ \text{А}\cdot\text{с}$ і ТП2

$Q_{2\,\mathrm{U}} = 13{,}87\ \mathrm{A}\cdot\mathrm{c}$, й тим самим збільшується термін експлуатації як самої камери, так і контактів швидкодіючих вимикачів. Зменшилася також і кількість теплоти, яка виділяється в точці КЗ і камері вимикача. Згідно інструкції [214], ремонт для здвоєних швидкодіючих вимикачів за технічним станом проводиться після 80 вимикань. Під час ремонтів виконується огляд головних і дугогасних контактів та дугогасних камер, очищення і ремонт камер тощо. Зрозуміло, що із впровадженням запропонованого принципу і відповідно мікропроцесорного пристрою, що реалізує його, кількість вимикань аварійних режимів збільшується у 15…20 разів.

6.1.5.2 Математичне моделювання короткого замикання в ТМ з ЕРС на фідерній зоні розглянемо на прикладі схеми представленої на рис. 4.24 у випадку коли КЗ виникло в точці 2-2` на відстані $l_{\text{ек}} = 14\,\text{км}$ від ЕРС. Електровоз ДЕ1 рухається на ходовій (без ослаблення збудження) позиції «СП»-з'єднання ТЕД. На рис. 6.10 представлено графіки струмів фідерного ТП1 $i_1(t)$ (рис. 6.10, б) і в точці КЗ $i_{\text{к}}(t)$ (рис. 6.10, а) до та після впровадження запропонованого захисту.



а) струм короткого замикання $i_{\text{к}}(t)$ б) струм фідера ТП1 $i_1(t)$

Рисунок 6.10 – Часові залежності перехідних струмів під час КЗ в ТМ з ЕРС на фідерній зоні: 1 – до впровадження запропонованої системи; 2 – після її впровадження

В таблиці 6.2 представлено чисельні значення енергетичних показників перехідних струмів.

Таблиця 6.2

Кількісні показники виділеної електрики Q і теплової енергії W в точці КЗ і в дугогасних камерах ШВ

перехідні струми / енергетичні показники	$i_к(t)$	$i_1(t)$	$i_2(t)$	$i_е(t)$
$Q=\int a(t)dt,\ \text{А}\cdot\text{с}$ (до впровадження системи)	571,7	242,2	223,6	174,94
$Q_U=\int a_U(t)dt,\ \text{А}\cdot\text{с}$ (після впровадження системи)	156,4	14,04	15,43	152,5
$Q_U/Q,\ \%$	27,36	5,798	6,9	87,2
$Q/Q_{кз},\ \%$		42,36	39,12	30,6
$Q_U/Q_{кз\,U},\ \%$		8,976	9,863	97,51
$W=\int a^2(t)dt,\ \text{А}^2\cdot\text{с}$ (до впровадження системи)	$2,274\cdot10^6$	558185	512931	256718,7
$W_U=\int a_U^2(t)dt,\ \text{А}^2\cdot\text{с}$ (після впровадження системи)	162518	9156,1	14701,7	153480,5
$W_U/W,\ \%$	7,145	1,64	2,866	59,79

Як і у попередньому випадку за кількістю електрики після впровадження запропонованої системи $Q_{кз\,U}=156,4\ \text{А}\cdot\text{с}$, бачимо, що імовірність перепалу проводу в точці КЗ зійшла нанівець. Крім того, спостерігається явний ефект і для фідерних струмів ТП1 і ТП2 частка фідерних струмів після впровадження зменшилася до $Q_{1U}/Q_1=5,798\ \%$ і $Q_{2U}/Q_2=6,9\ \%$ відповідно у відношенні до впровадження. Цікавим є співвідношення кількості електрики фідерних струмів ТП1 $i_1(t)$ і ТП2 $i_2(t)$, а також генераторних струмів ЕРС $i_е(t)$ до струму в точці КЗ $i_к(t)$ до та після впровадження мікропроцесорної системи захисту за швидкістю зменшення фідерного струму. З таблиці випливає, що до впровадження частка кожного із зазначених вище струмів

$Q_1 / Q_{кз} = 42{,}36\,\%$, $Q_2 / Q_{кз} = 39{,}12\,\%$, $Q_e / Q_{кз} = 42{,}36\,\%$ практично однакова. Проте, після встановлення запропонованої системи захисту ці відношення змінюються так: $Q_{1\,U} / Q_{кз\,U} = 8{,}976\,\%$, $Q_{2\,U} / Q_{кз\,U} = 9{,}863\,\%$, $Q_{e\,U} / Q_{кз\,U} = 97{,}51\,\%$. Тобто, частка кількості електрики від дії фідерних струмів ТП1 $i_1(t)$ і ТП2 $i_2(t)$ зменшилася майже в 6 разів, а частка від дії генераторних струмів ТЕД ЕРС збільшилася майже в 2 рази. Це зрозуміло, адже ШВ тягових підстанцій, що обладнані розглядуваною системою, відсікають фідерні струми $i_1(t)$ і $i_2(t)$ від живлення точки КЗ, проте не впливають на генераторні струми ЕРС. В той же час, кількість електрики, яку генерують ТЕД ЕРС, що перейшов в режим генерації, визначається лише накопиченою енергією до моменту виникнення КЗ в ТМ.

6.2 Розробка мікропроцесорної системи за принципом «залишкової напруги»

В підрозділі 4.2 обґрунтовано новий так званий метод «залишкової напруги», за допомогою якого можливо розпізнавання, в якій підсистемі (СТЕП чи ЕРС) виникло КЗ. Нижче в цьому підрозділі, розроблена і описана нова інформаційна мікропроцесорна система, в якій реалізовано цей метод.

Структурна схема системи, її елементи та їх призначення представлені на рис. 6.1. Блок - схема загального алгоритму системи представлена на рис. 6.11 [276], де: 1 – налаштування процесорного елементу; 2 – скидання регістрів (A:=0); 3 – очікування сигналу про КЗ; 4 – виконання затримки 50 мс; 5 – запуск конвертації АЦП напруги фідера в цифрову форму; 6 – очікування закінчення процесу конвертації; 7 – читання даних з АЦП в акумулятор; 8 – порівняння рівня напруги фідера з константою. (Якщо напруга менша заданого константою значення – відбулося КЗ в тяговій мережі фідерної зони,

інакше – в локомотиві); 9, 10 – подання сигналів на індикацію (у відповідності з результатом порівняння в блоці №8).

В розглядуваній системі у якості гальванічної розв'язки прийнято рішення застосовувати вищерозглядувану в підрозділі 6.1 оптопару Hcnr-200 і модифіковану схему її вмикання представленої на рис. 6.3.

Для вирішення поставленої задачі не потрібний АЦП з великою розрядністю і швидкістю перетворення, оскільки треба вираховувати певну затримку. Тому було обрано АЦП ADC0801 фірми NationalSemicondactor. На рис. 6.12 представлена типова схема вмикання АЦП до мікропроцесора.

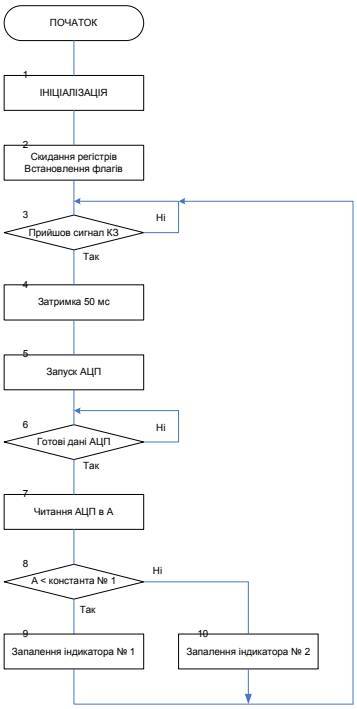


Рисунок 6.11 – Загальний алгоритм роботи інформаційної системи (пристрою)

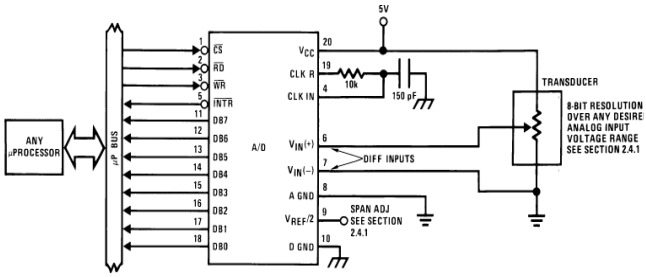


Рисунок 6.12 – Типова схема вмикання АЦП

Обраний АЦП має наступні технічні характеристики: розрядність – 8 біт; час перетворення – 100 мкс; сумісний з 8080 мікропроцесором – не потребує додаткової інтерфейсної логіки; час доступу - 135 нс; простий інтерфейс з усіма мікропроцесорами, або автономна робота; логічні входи і виходи сумісні з ТТЛ і МОП рівнями; працює з 2,5 В джерелом опорної на-

пруги; внутрішній генератор синхронізації; 0...5 В діапазон напруги аналогового вхідного сигналу з одним джерелом живлення 5 В; не потребує корекції нуля; можна використовувати подільник напруги з напругою в діапозоні 2,5…5 В.

В обраному процесорному елементі має бути достатньо портів вводу/виводу інформації для того, щоб прийняти 8 розрядів від АЦП, видати 2 сигнали на індикацію, прийняти сигнал від оператора. Цим умовам задовольняє мікроконтролер ATtiny2313 - 8-бітний КМОП мікроконтролер з AVR RISC архітектурою. Виконуючи команди за один цикл, ATtiny2313 досягає продуктивності 1 MIPS при частоті генератора 1 МГц, що дозволяє розробнику оптимізувати відношення споживання до продуктивності. ATtiny2313 має такі характеристики: 2 Кб програмованої в системі Flash-пам’ять програми, 128-байтну EEPROM пам’ять даних, 128-байтний SRAM (статичний оперативно запам’ятовуючий пристрій), 18 ліній введення - виведення загального застосування, однопровідний інтерфейс для вбудованого налаштовувача, два гнучких таймера/лічильника зі схемами порівняння, внутрішні і зовнішні джерела переривання, послідовний програмований USART, універсальний послідовний інтерфейс з детектором стартової умови, програмований сторожовий таймер з вбудованим генератором і три програмно - ініціалізуємі режими зниженого споживання. В режимі Idle зупиняється ядро, але оперативно запам’ятовуючий пристрій, таймери/лічильники і система переривань продовжують функціонувати. У режимі Power-down регістри зберігають своє значення, але генератор зупиняється, блокуючи всі функції приладу до наступного переривання або апаратного скидання. В Standby режимі заданий генератор працює, в той час як інша частина приладу не діє. Це дозволяє дуже швидко запустити мікропроцесор, зберігаючи при цьому в режимі бездіяльності потужність.

Блок-схема контролера ATtiny2313 представлена на рис. 6.13. Функціональна схема розробленої системи зображена на рис. 6.14.

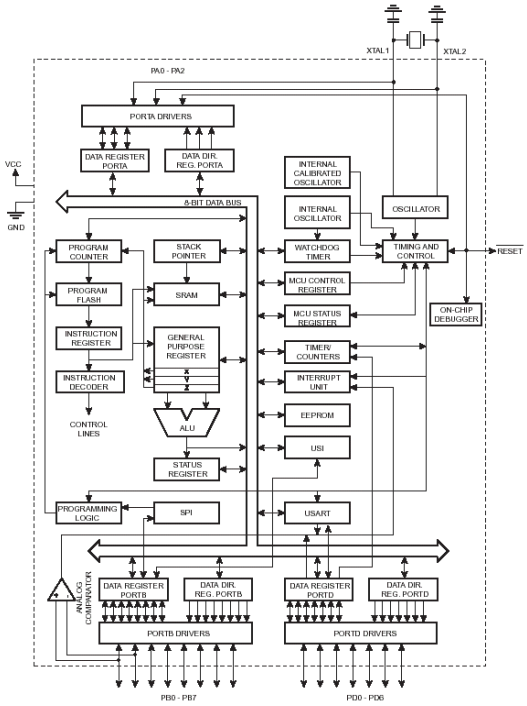


Рисунок 6.13 – Блок-схема мікроконтролера ATtiny2313

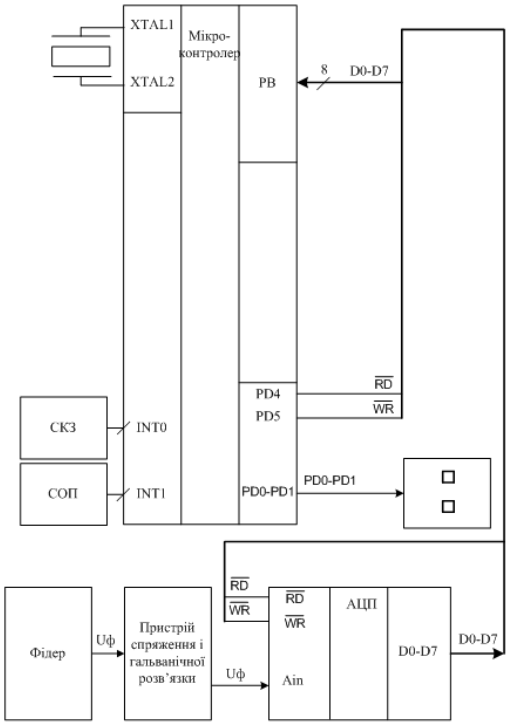


Рисунок 6.14 – Функціональна схема інформаційної системи (пристрою)

На схемі зображено мікроконтролер ATtiny 2313 в якості центрального процесорного елементу і оперативно запам'ятовуючого пристрою. Порт PB налаштовано на прийом інформації. На нього подається інформація від АЦП. Два молодші розряди порта PD використовуються для видачі інформації на індикатори (розряди PD0 –PD1). Розряд PD5 використовується для подачі сигналу старту конвертації на АЦП. Розряди PD2, PD3 використовуються як системні входи сигналів переривань INT0, INT1. До входів XTAL1, XTAL2 під'єднано кварцовий резонатор ZTB1000MJ (1 МГц) фірми ECSinc.

Фідерна напруга проходить через пристрій спряження і гальванічної розв'язки і подається на АЦП. Вхід Vin- увімкнено до аналогової землі. До входуVin+ подається гальванічно розв'язана напруга фідера.

Для того щоб приймати сигнали на входи переривань мікроконтролера в ньому треба задати слова налаштування [276]. Налаштування маски переривань: регістр GIMSK

7	6	5	4	3	2	1	0	GIMSK
1	1	X	X	X	X	X	X	C0h

0…5 – біти не використовується;

6, 7 – дозвіл переривання відповідно INT0 і INT1.

Налаштування режиму спрацьовування переривань: регістр MCUCR

7	6	5	4	3	2	1	0	MCUCR
X	0	0	0	1	1	1	1	0Fh

(0, 1) і (2, 3)– режим спрацювання відповідно по фронту сигналу INT0 і INT1;

4, 5 –не використовується режим SLEEP;

6 – не використовується зовнішня пам’ять;

7 – біт не використовується.

Принципова схема зображена на рис. 6.15.

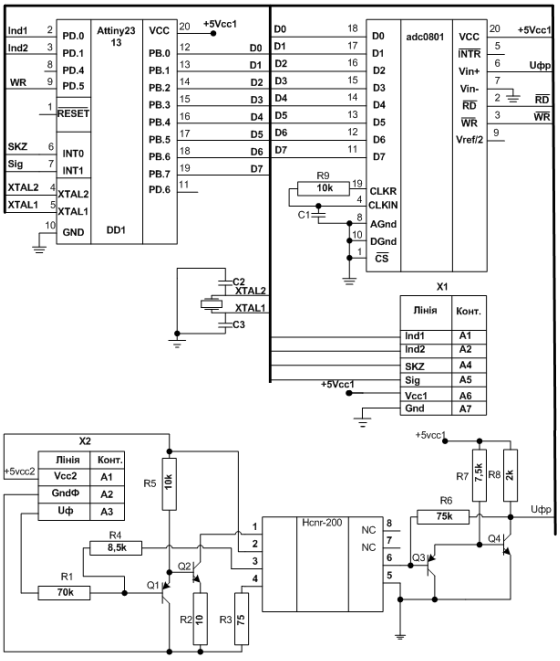


Рисунок 6.15 – Принципова схема пристрою інформаційної системи

До роз’єму X1 під’єднано вхід живлення VCC1, вхід заземлення GND, три виходи сигналів індикації, вхід сигналу від АПВ, вхід сигналу від оператора. До роз’єму X2 під’єднано окремий вхід живлення VCC2, який подається для живлення вхідної частини схеми спряження і гальванічної

розв'язки. Також до нього увімкнено дві лінії для зняття напруги з фідера (UФ і GND), які подаються на вхідну частину схеми спряження і гальванічної розв'язки.

Розроблена система володіє функціями: приймає сигнал про виникнення КЗ; розпізнає вид КЗ; видає інформацію енергодиспетчеру про вид КЗ (близьке, середнє, дальнє)

6.3 Енергетика і спосіб зменшення генераторних струмів електрорухомого складу

Електрорухомий склад в генераторному режимі являє собою рухоме джерело електроенергії (джерело струму), яке поряд зі стаціонарними існуючими ТП живить місце КЗ в ТМ. Під час цього аварійного режиму до місця КЗ від ЕРС передається уся електромагнітна енергія, що була накопичена в магнітній системі ТЕД до режиму КЗ. Отже, генеруючий ЕРС, по суті, являє собою додаткову рухому ТП, струм якої є причиною термічних пошкоджень контактного проводу. Крім цього, вони викликають пошкодження також іскрових проміжків у колі заземлення опор КМ. Часті також випадки пошкодження апаратури на самому генеруючому ЕРС.

Як відомо [9, 47, 103], імовірність і ступінь термічних пошкоджень (зокрема, термін перепалу КП) оцінюється: кількістю електрики Q (ампер-секунд, $I \cdot t$), що пройшла в місці КЗ при нещільному (дуговому, відкритій електричній дузі) контакті; кількістю теплової енергії W ($A^2 \cdot c$, $I^2 \cdot t$), що виділяється в місці контакту, - при щільному (бездуговому) контакті. Тому в таблицях 6.3, 6.4, 6.5 відповідно для досліджених у розділі 4 режимів КЗ для кожного з'єднання («С», «СП», «П») ТЕД визначено: $Q_к$ (А·с) і $W_к$ ($А^2$·с) – загальні кількості відповідно електрики і теплової енергії, що виділились в місці КЗ від тягових підстанцій і генеруючого ЕРС; $Q_г$ (А·с) і $W_г$ ($А^2$·с) – відповідно кількість електрики і теплової енергії, що виділились лише від генеруючого ЕРС. Для порівняння з даними цих таблиць на запозичених із

[9], рис. 6.16-6.19 приведені граничні, за умов перепалу КП, терміни часу його перепалу та кількості електрики ($I \cdot t$) і теплової енергії ($I^2 \cdot t$).

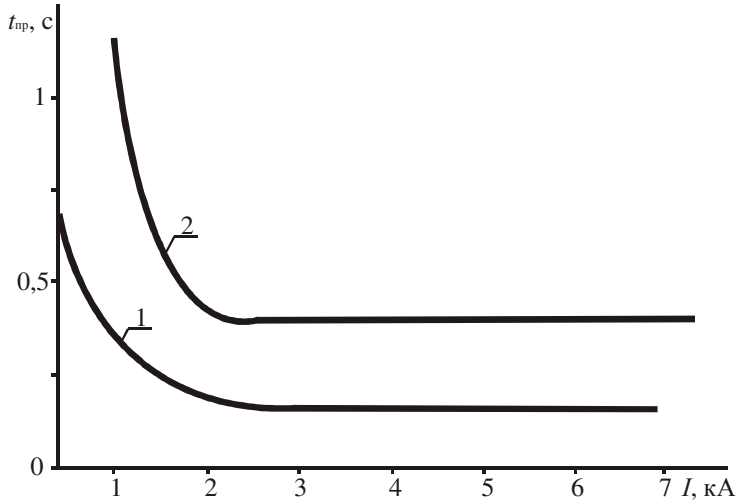


Рисунок 6.16 – Залежність від струму терміну часу перепалу контактного проводу (вугільні вставки типу А) при наявності дуги: 1 – для проводу МФ-100; 2 – 2МФ-100 [9]

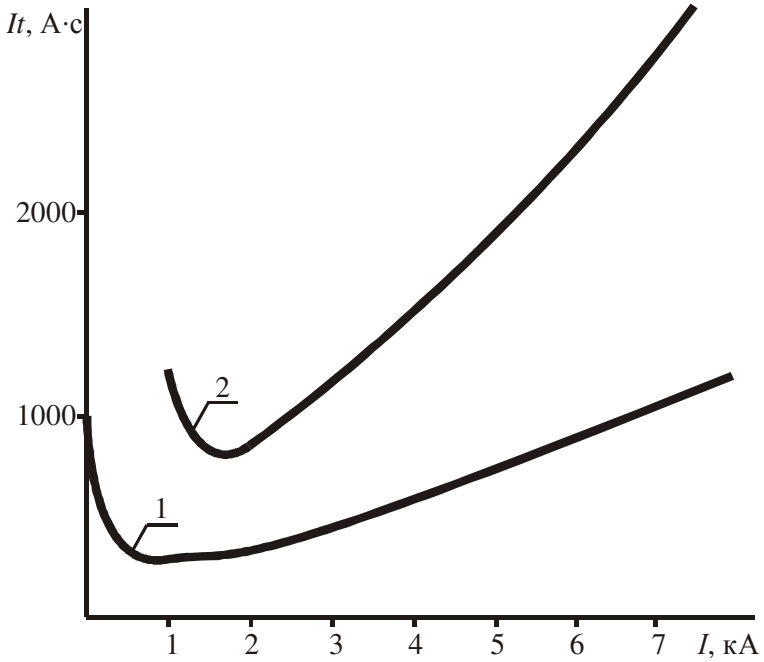


Рисунок 6.17– Залежність значення $I \cdot t$, при яких відбувається перепал проводу при наявності дуги від струму в контакті: 1 – для проводу МФ-100; 2 – 2МФ-100 [9]

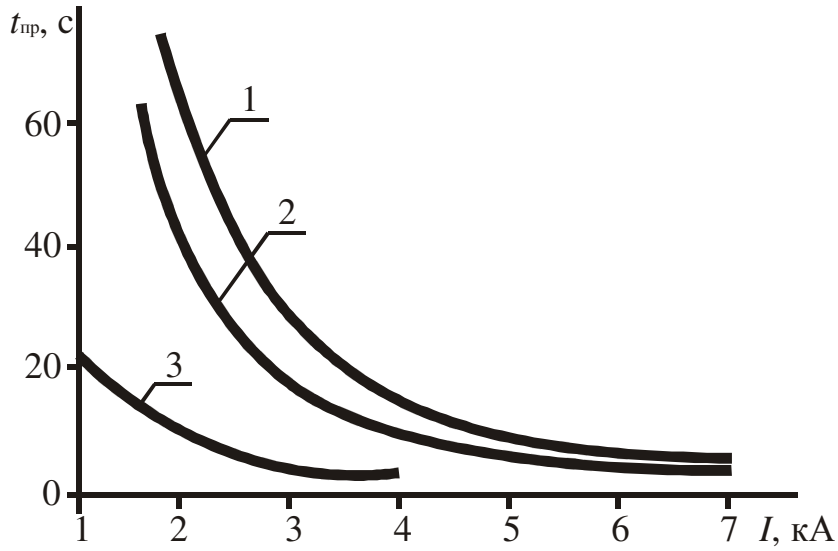


Рисунок 6.18 – Залежність терміну часу перепалу контактного проводу при нерухомому струмоприймачі від струму в ньому для різних контактних пар: 1 –МФ-100 з присадкою кадмію – металовуглецеві накладки; 2 – МФ-100– металовуглецеві накладки; 3 – МФ-100 – вугільні вставки [9]

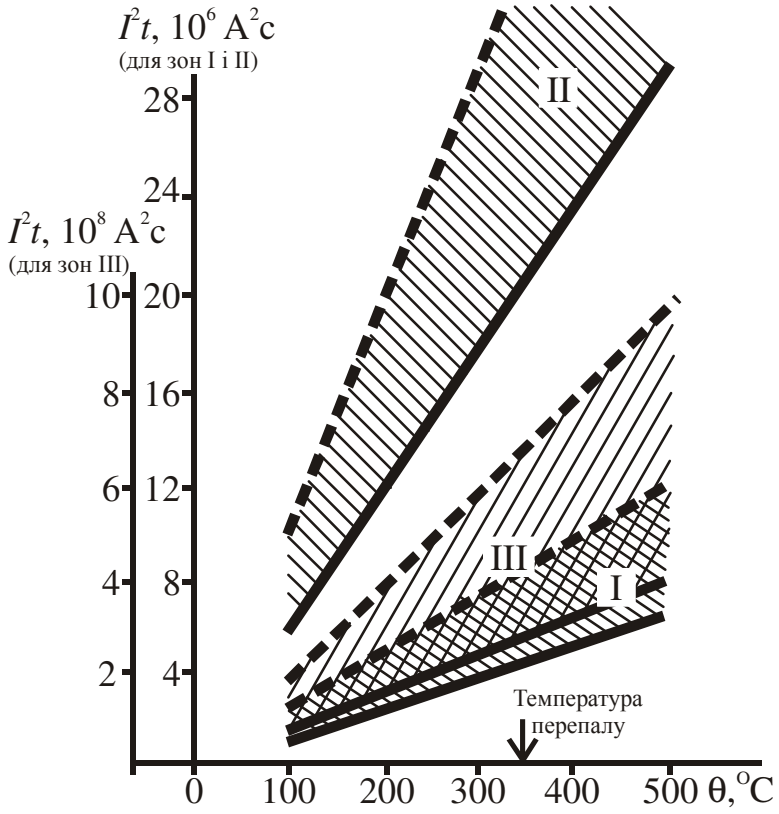


Рисунок 6.19 – Перевищення температури в місцях контакту в залежності від теплової енергії $I^2 \cdot t$, що виділяється в одному проводі при вугільних вставках типу А (область I), типу Б (область II) і мідних накладок (область III) у випадку незабрудненого (суцільна) і забрудненого (штрихова) контакту [9]

Таблиця 6.3

Кількісні показники виділеної в точці короткого замикання електрики Q і теплової енергії W (електровоз рухається на «С»-з'єднанні)

Розрахункова схема	За рис. 4.12			За рис. 4.24				За рис. 4.12 (при $l_{1к}=5\ км, l_{ек}=5\ км$)				
								ПП	ПЗ1	ПЗ2	ПЗ3	ПЗ4
$l_{ек},\ км$	0,5	9,5	18,5	18,5	14,0	9,0	1,0	5,0				
КЗ в точці	к-к'	к-к'	к-к'	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	к-к'				
$Q_к = \int i_к(t)dt,\ А\cdot с$	673,7	198,1	367,2	367,7	60,2	80,5	733	394,2	878,5	1281,6	1662	1933,4
$Q_г = \int i_г(t)dt,\ А\cdot с$	57,7	6,54	-	-	51,88	51,38	59,8	24,4	100,1	144,3	139,3	188,4
$W_к = \int i_к^2(t)dt,\ А^2\cdot с$	$2{,}06\cdot10^6$	$7{,}12\cdot10^5$	$1{,}23\cdot10^6$	$1{,}73\cdot10^6$	$4{,}15\cdot10^4$	$1{,}68\cdot10^5$	$2{,}32\cdot10^6$	$1{,}42\cdot10^6$	$3\cdot10^6$	$4{,}27\cdot10^6$	$5{,}32\cdot10^6$	$6{,}23\cdot10^6$
$W_г = \int i_г^2(t)dt,\ А^2\cdot с$	$2{,}7\cdot10^4$	839,5	-	-	$2{,}18\cdot10^4$	$2{,}25\cdot10^4$	$2{,}75\cdot10^4$	7555,1	58718	81410	55141	91914
$Q_г/Q_к,\ \%$	8,56	3,3	-	-	86,2	63,8	8,2	6,19	11,4	11,25	8,4	9,74
$W_г/W_к,\ \%$	1,33	0,119	-	-	53,4	13,7	1,18	0,532	1,95	1,91	1,04	1,47

Таблиця 6.4

Кількісні показники виділеної в точці короткого замикання електрики Q і теплової енергії W (електровоз рухається на «СП»-з'єднанні)

Розрахункова схема	За рис. 4.12			За рис. 4.24				За рис. 4.12 (при $l_{1к}=5\ км, l_{ек}=5\ км$)				
								ПП	ПЗ1	ПЗ2	ПЗ3	ПЗ4
$l_{ек},\ км$	0,5	9,5	18,5	18,5	14,0	9,0	1,0	5,0				
КЗ в точці	к-к'	к-к'	к-к'	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	к-к'				
$Q_к = \int i_к(t)dt,\ А\cdot с$	447,6	255	652,3	652,3	106,5	156,5	490,3	366,5	902,6	1391,1	1856,2	2143,9
$Q_г = \int i_г(t)dt,\ А\cdot с$	140,4	41,4	-	-	101,9	103	142,7	76,9	239,7	339,1	339,7	436,4
$W_к = \int i_к^2(t)dt,\ А^2\cdot с$	$2{,}16\cdot10^6$	$9{,}4\cdot10^5$	$1{,}66\cdot10^6$	$1{,}66\cdot10^6$	$1{,}17\cdot10^5$	$4{,}64\cdot10^5$	$2{,}36\cdot10^6$	$1{,}58\cdot10^6$	$3{,}66\cdot10^6$	$5{,}3\cdot10^6$	$6{,}52\cdot10^5$	$7{,}67\cdot10^6$
$W_г = \int i_г^2(t)dt,\ А^2\cdot с$	$3{,}27\cdot10^5$	$2{,}86\cdot10^4$	-	-	$9{,}86\cdot10^4$	$1{,}23\cdot10^5$	$3{,}06\cdot10^5$	$9{,}26\cdot10^4$	$3{,}95\cdot10^5$	$4{,}93\cdot10^5$	$3{,}37\cdot10^5$	$5{,}14\cdot10^5$
$Q_г/Q_к,\ \%$	31,4	16,2	-	-	95,6	65,8	29,1	20,97	26,6	24,4	18,3	20,3
$W_г/W_к,\ \%$	15,2	3,04	-	-	83,8	26,5	12,8	5,84	10,8	9,3	5,17	6,7

Таблиця 6.5

Кількісні показники виділеної в точці короткого замикання електрики Q і теплової енергії W (електровоз рухається на «П»-з'єднанні)

Розрахункова схема	За рис. 4.12			За рис. 4.24				За рис. 4.12 (при $l_{1к}=5\ км, l_{ек}=5\ км$)				
								ПП	ПЗ1	ПЗ2	ПЗ3	ПЗ4
$l_{ек},\ км$	0,5	9,5	18,5	18,5	14,0	9,0	1,0	5,0				
КЗ в точці	к-к'	к-к'	к-к'	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	к-к'				
$Q_к = \int i_к(t)dt,\ А\cdot с$	470,6	311,6	173,7	173,7	185,1	463,9	524	436,8	2144,2	4244,4	7764	8840,2
$Q_г = \int i_г(t)dt,\ А\cdot с$	315	94,56	167,9	167,9	171,6	216,7	316,9	170,15	780,1	2049,5	4831	5882
$W_к = \int i_к^2(t)dt,\ А^2\cdot с$	$5{,}39\cdot10^6$	$1{,}18\cdot10^6$	$1{,}79\cdot10^5$	$1{,}79\cdot10^5$	$2{,}42\cdot10^5$	$1{,}92\cdot10^6$	$5{,}19\cdot10^6$	$2{,}29\cdot10^6$	$9{,}6\cdot10^6$	$2{,}06\cdot10^7$	$4{,}35\cdot10^7$	$5{,}3\cdot10^7$
$W_г = \int i_г^2(t)dt,\ А^2\cdot с$	$2{,}63\cdot10^6$	$1{,}28\cdot10^5$	$1{,}67\cdot10^5$	$1{,}67\cdot10^5$	$2{,}12\cdot10^5$	$3{,}48\cdot10^5$	$2{,}1\cdot10^6$	$4{,}33\cdot10^5$	$2{,}34\cdot10^6$	$6{,}34\cdot10^6$	$1{,}84\cdot10^7$	$2{,}57\cdot10^7$
$Q_г/Q_к,\ \%$	66,9	30,3	96,7	96,8	92,7	46,7	60,5	39	36,4	48,3	62,2	66,5
$W_г/W_к,\ \%$	48,7	10,8	93,3	93,3	87,8	18,1	40,55	18,9	24,3	30,7	42,2	48,4

При всіх видах з'єднання ТЕД чим ближче знаходиться ЕРС до точки КЗ, тим більшу кількість електрики він генерує. Крім того, ця величина залежить також від з'єднання групи ТЕД: на «П»-з'єднанні більшу частку електрики генерує саме ЕРС, наприклад, із $Q_{\text{к}} = 470{,}6$ А·с з них тяговими двигунами виробляється $Q_{\text{г}} = 315$ А·с, а це майже 66,9%, у порівнянні на «С»- і «СП»-з'єднанні ця частка відповідно склала 8,56%, 31,4%. Найбільш небезпечними, з енергетичної точки зору, є режими КЗ в ТМ коли ЕРС рухається на послабленому збудженні.

Вже на ПЗ1 і «С»-з'єднанні ТЕД кількість електрики, що проходить крізь точку КЗ, складає $Q_{\text{к}} = 878{,}5$ А·с і для контактного проводу МФ-100 цієї величини достатньо для перепалу навіть при струмові через дугу, рівного 200 А. Найбільш небезпечним на послабленому збудженні є «П»-з'єднання ТЕД, величина $Q_{\text{к}}$ за розрахунками досягає значення 8840,2 А·с при ПЗ4. Порівнюючи види з'єднання ТЕД при послабленому збудженні, робимо висновок, що частка енергії, що генерована на «С»-з'єднанні, не перевищує 15 %, на «СП» коливається від 18,3% до 26,6%, а при «П» від 36,4% до 66,5%, що пояснюється так. У режимі ПЗ на будь-якій ступені на початку часового інтервалу (0,12…0,15 с) перехідного процесу спостерігається менша швидкість загасання $\Phi(t)$ (рис. 4.21), а, отже, і проти-е.р.с. Це пояснюється тим, що струм у контурі «обмотка збудження – шунтуюча вітка», підтримуючи $\Phi(t)$, в основному зменшує ступінь його загасання за рахунок «розряду» індуктивного шунта через ОЗ. В результаті зазначеного в режимах ПЗ створюється більшої тривалості і більша різниця між проти-е.р.с. ТЕД і напругою на струмоприймачі, що й обумовлює більш тривалий генераторний струм $i_{\text{г}}$ з більшим у 1,4…2,2 рази максимальним значенням (до 880 А на ПЗ4 проти 400 А на повному збудженні) (рис. 4.23).

Результати приведеного вище аналізу вимагають розробки методів і засобів, які переривають або не допускають виникнення режиму генерації. Ці засоби і методи повинні базуватись, виходячи із основної причини, що обу-

мовлює виникнення генераторного режиму, а саме, на характер і зміни в часі основного магнітного потоку $\Phi(t)$, точніше, на швидкості його зміни, яка повинна бути меншою швидкості зменшення напруги на струмоприймачі. Тобто, потрібно пришвидшити процес загасання основного магнітного потоку.

Для цього в цій роботі пропонується спосіб гасіння магнітного поля з використанням запираючого діода VD, увімкненого послідовно з шунтуючим резистором (рис. 6.20, а). Цей метод описано в роботах [277, 278] для обмеження генераторних струмів на електровозах змінного струму серії ВЛ60. Принцип роботи схеми рис. 6.20 полягає у наступному. При переході ТЕД в генераторний режим під час КЗ шунтуюча вітка заперта для генераторного струму тому струм практично від самого початку аварійного режиму змушений протікати по ОЗ головних полюсів: двигун веде себе як при повному збуджені. Напрям цього струму зустрічний за напрямком струму збудження, завдяки чому відбувається інтенсивне розмагнічення двигуна і величина генераторного струму зростає лише до невеликого значення.

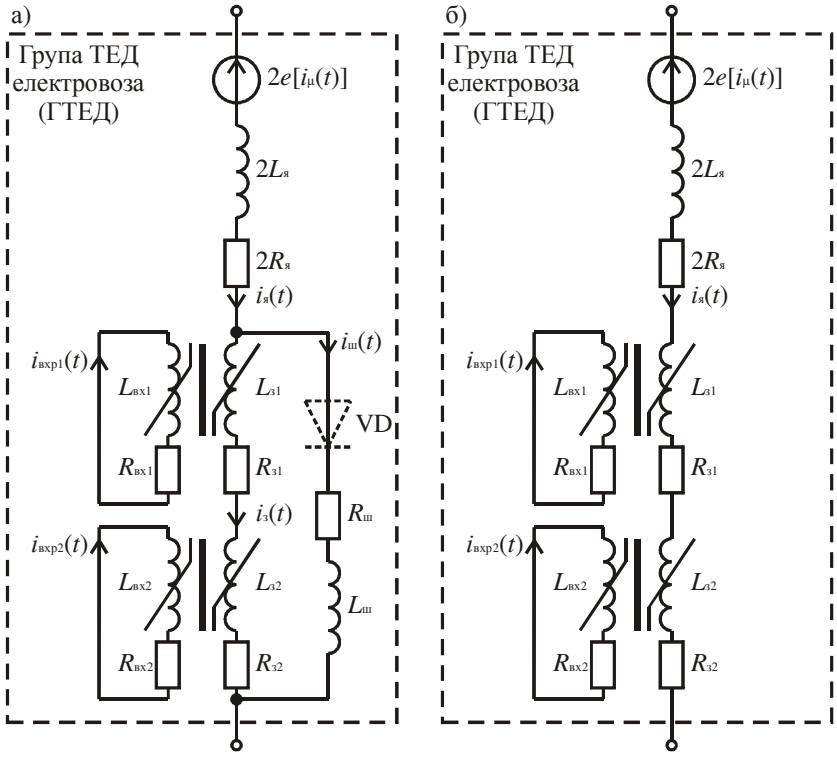


Рисунок 6.20 – Схема заміщення групи ТЕД ЕРС постійного струму: а – при послабленні збудження; б – при повному збудженні

Автором даної роботи створено математичну модель для перевірки ефективності роботи вищезазначеної схеми (з вмиканням діода) під час перехідного процесу в ЕРС постійного струму. При цьому прийнято, що діод ідеальний, а електровоз рухається при «СП»-з'єднанні ТЕД. Згідно методу миттєвих схем, моделювання проводили в 4 етапи. На першому етапі графічне представлення системи тягового електропостачання постійного струму в режимі КЗ (рис. 4.12) доповнюємо схемою заміщення групи двигунів (ГТЕД), представленій на рис. 6.20, розрахункову схему представлено на рис. 6.21. Розглядувану систему (4.14)-(4.18) диференціальних рівнянь, що описує електромагнітні процеси на першому етапі моделювання слід доповнити рівняннями ШВ (3.50)-(3.53) і рівняннями ЕРС (4.11)-(4.13).

В момент досягнення струмом шунтуючої вітки значення рівного 0, діод запирається і схема ГТЕД рис. 6.20, а змінюється на схему рис. 6.20, б. Відповідно для такої схеми система рівнянь (4.14)-(4.18) дещо змінюється, а саме, струм якоря протікає по обмотці збудження $i_з = i_я$, а також $i_ш = 0$. Математичну модель розраховано для послаблення збудження ПЗЗ.

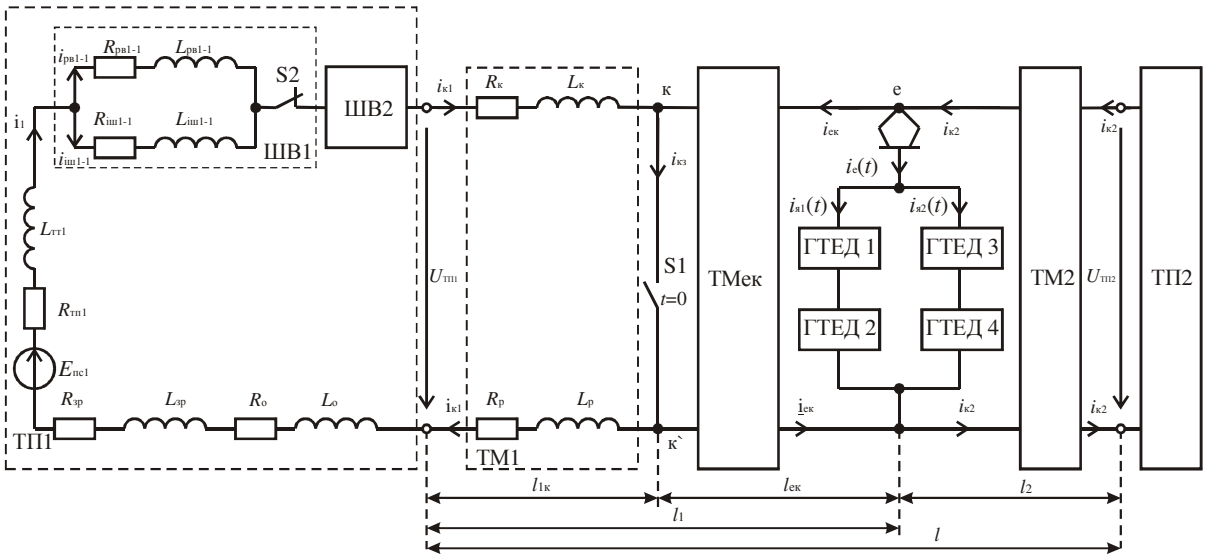


Рисунок 6.21 – Схема заміщення системи електричної тяги постійного струму в режимі короткого замикання в тяговій мережі

На рис. 6.22 приведено часові залежності струму електровозу при повному збудженні, послабленні збудження ПЗЗ і послабленні збудження ПЗЗ з

використанням запираючого діода VD (далі такі схеми будемо позначати ПП, ПЗЗ, ПЗЗ+VD відповідно) [279]. Порівнюючи часові залежності генераторного струму електровоза, а також чисельні значення кількості електрики, яка генерується в цих трьох випадках (таблиця 6.6), можна зробити висновок, що використання запираючого діода у шунтуючій вітці значно полегшує перебіг аналізованого аварійного перехідного процесу.

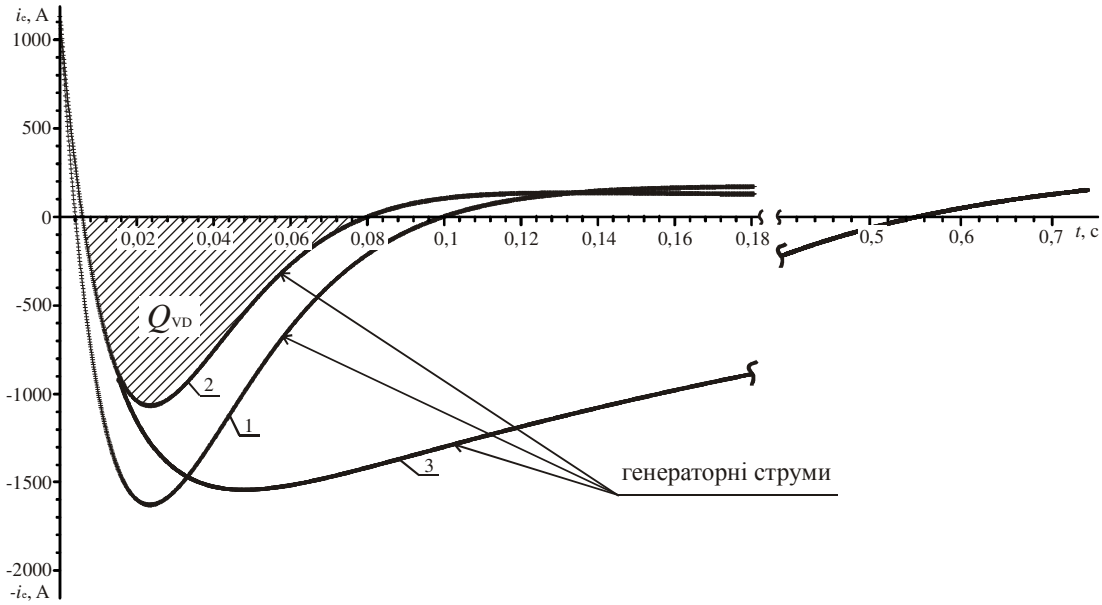


Рисунок 6.22 – Часові залежності генераторного струму електровозу при різних схемах збудження ТЕД: 1 – ПП; 2 – ПЗЗ+VD; 3 – ПЗЗ

Таблиця 6.6

Енергетичні параметри генераторного струму і струму в точці КЗ

Ступінь ПЗ / Кількість електрики і енергії	ПП	ПЗЗ	ПЗЗ+VD
$Q_к = \int i_к(t)dt,\ \text{А}\cdot\text{с}$	366,5	1856,2	288,4
$Q_г = \int i_г(t)dt,\ \text{А}\cdot\text{с}$	76,9	339,7	41,1
$W_к = \int i_к^2(t)dt,\ \text{А}^2\cdot\text{с}$	$1{,}58\cdot10^6$	$6{,}52\cdot10^5$	$1{,}2\cdot10^6$
$W_г = \int i_г^2(t)dt,\ \text{А}^2\cdot\text{с}$	$9{,}26\cdot10^4$	$3{,}37\cdot10^5$	$3{,}2\cdot10^4$
$Q_г / Q_к,\ \%$	20,97	18,3	14,6
$W_г / W_к,\ \%$	5,84	5,17	2,7

Кількість електрики Q_{VD}, яку генерує електровоз зі схемою ПЗ3+VD, майже в 10 разів менше кількості електрики за схемою ПЗ3 і навіть менше, ніж за схемою ПП. Тривалість генераторного режиму найменша за схемою ПЗ3+VD, що можна пояснити тим, що до виникнення КЗ магнітне поле ТЕД вже було послаблено на 57%, а після запирання діода схема ГТЕД змінилася (рис. 6.20, б) і процеси продовжили протікати як і при ПП. Слід зазначити, що зменшилася в $1856,2 \diagup 288,4 = 6,4$ разів і кількість електрики, що проходить через точку КЗ, тому практично малоймовірно, що виникне перепал КП.

Таким чином, схема послаблення збудження ГТЕД з використанням запираючого діода VD є достатньо дієвою і її можна застосовувати на ЕРС постійного струму з традиційною контакторно-реостатною системою керування серієсними ТЕД постійного струму.

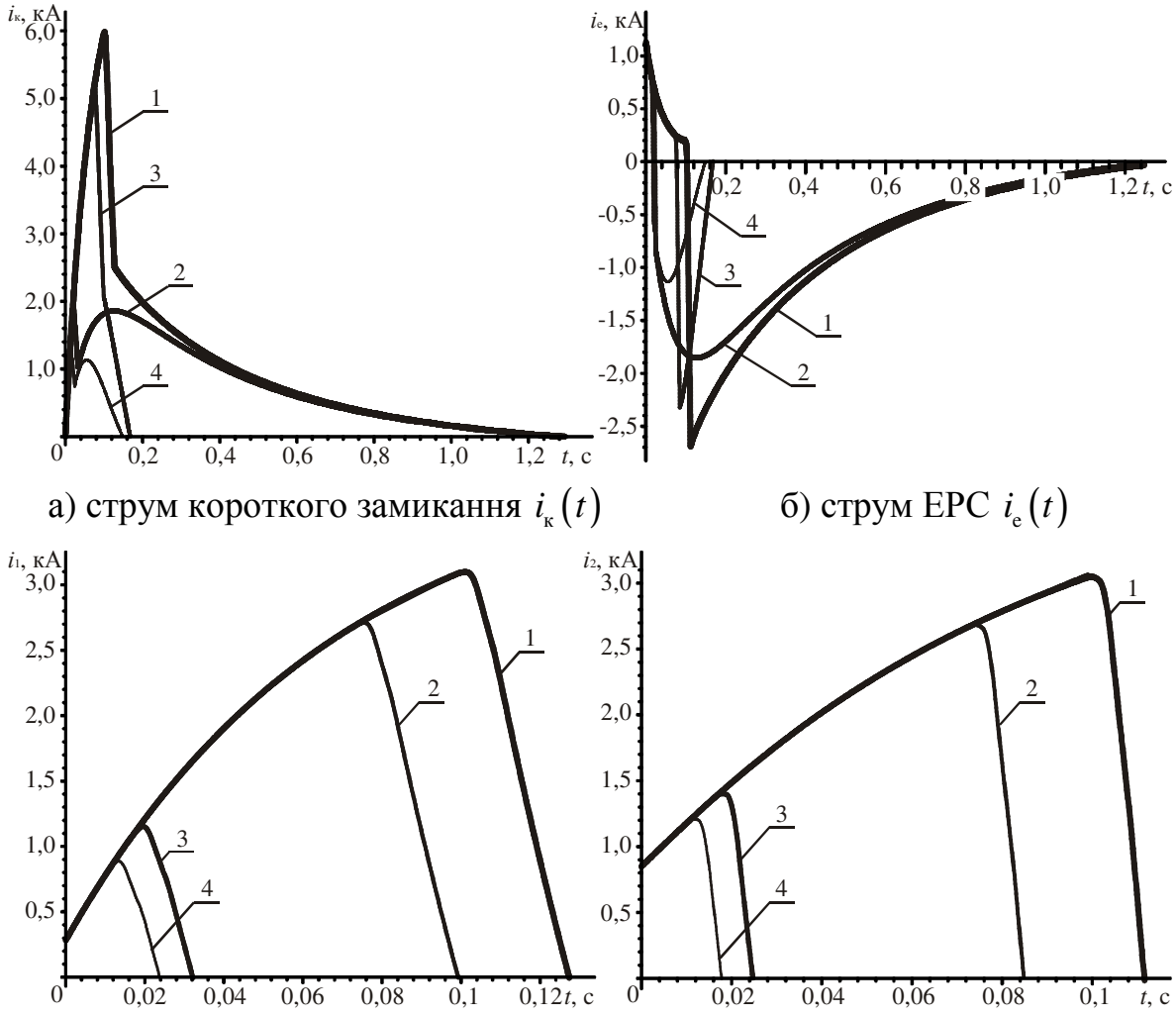
Для вирішення задачі зниження генераторних струмів в режимі КЗ, а також підвищення ефективності роботи СЕТ в інших аварійних режимах, автор роботи [15] запропонував ряд технічних та організаційних заходів. Слід зазначити, що деякі з них дуже важко реалізувати, а деякі суперечать принципам роботи сучасних залізниць. Однак є і такі, до яких працівникам залізниць варто дослухатися і починати в найкоротші терміни впроваджувати на електрифікованих ділянках.

Виконаємо оцінку енергетичних показників сумісної роботи двох запропонованих в дисертації засобів, а саме впровадження мікропроцесорної системи захисту за швидкістю зменшення фронту фідерного напруги і використання запираючого діода VD в шунтуючій вітці обмотки збудження ТЕД ЕРС Для оцінки кількості електрики до та після впровадження запропонованих засобів виконаємо математичне моделювання режиму КЗ в ТМ при наявності електровозу на фідерній зоні для у мов представлених в п. 6.1.5, з тією лише відмінністю, що електровоз ДЕ1 рухається на «СП»-з'єднанні при послаблені збудження ПЗ4.

Математичне моделювання було виконано при таких умовах:

- послаблення збудження ПЗ4 без впровадження будь-яких засобів (позначення на графіках «1» в таблиці і поясненнях «ПЗ4»);
- послаблення збудження ПЗ4 з впровадженням запираючого діода (позначення – «2» і «ПЗ4+VD»);
- послаблення збудження ПЗ4 з впровадженням мікропроцесорної системи за швидкістю зменшення струму (позначення – «3» і «ПЗ4+U»);
- послаблення збудження ПЗ4 з впровадженням одночасно обох засобів (позначення – «4» і «ПЗ4+VD+U»).

Результатами чисельних розрахунків моделі КЗ є часові залежності перехідних електричних величин. На рис. 6.23 представлено графіки перехідних струмів до та після впровадження запропонованих засобів.



а) струм короткого замикання $i_{к}(t)$ б) струм ЕРС $i_{е}(t)$

в) струм фідера ТП1 $i_1(t)$ г) струм фідера ТП2 $i_2(t)$

Рисунок 6.23 – Часові залежності перехідних струмів під час КЗ в ТМ з ЕРС на фідерній зоні: 1 – ПЗ4; 2 – ПЗ4+VD; 3 – ПЗ4+U; 4 – ПЗ4+VD+U

В таблиці 6.7 представлено чисельні значення енергетичних показників перехідних струмів.

Таблиця 6.7

Кількісні показники виділеної електрики Q і теплової енергії W в точці КЗ і в дугогасних камерах ШВ

Умови при яких було визначено енергетичні показники	Перехідні струми	Q, А·с	$Q_{ПЗ4+}/Q_{ПЗ4}$, %	$Q/Q_к$, %	W, $А^2 \cdot с$	$W_{ПЗ4+}/W_{ПЗ4}$, %
ПЗ4	$i_к(t)$	1286,8	-	-	$0{,}325 \cdot 10^7$	-
	$i_1(t)$	248,9	-	19,34	579257,2	-
	$i_2(t)$	236,9	-	18,41	554562	-
	$i_е(t)$	913,73	-	71,0	$0{,}121 \cdot 10^7$	-
ПЗ4+VD	$i_к(t)$	536,72	41,71	-	$0{,}214 \cdot 10^7$	65,7
	$i_1(t)$	240,2	96,5	44,75	547769,2	94,56
	$i_2(t)$	232,7	98,23	43,36	538864,6	97,17
	$i_е(t)$	159,5	17,46	29,72	212168,6	17,47
ПЗ4+U	$i_к(t)$	907,53	70,53	-	$0{,}11 \cdot 10^7$	33,88
	$i_1(t)$	23,14	9,296	2,549	19589,6	3,381
	$i_2(t)$	26,82	11,32	2,955	31097,8	5,607
	$i_е(t)$	892,44	96,67	98,34	$0{,}106 \cdot 10^7$	87,67
ПЗ4+VD+U	$i_к(t)$	112,68	8,756	-	$1{,}05 \cdot 10^6$	3,23
	$i_1(t)$	13,71	5,509	12,17	9108,15	1,572
	$i_2(t)$	17,21	7,264	15,27	17815,8	3,212
	$i_е(t)$	110,25	12,07	97,84	99285,7	8,175

Основні висновки по кожному окремому запропонованому заходу такі ж як і ті, що були зазначені вище. Проте із таблиці 6.7 слід виділити наступний висновок: при одночасному впроваджені і мікропроцесорної системи захисту за швидкістю зменшення фідерної напруги, і запираючого діода досягаємо найбільшого підвищення ефективності роботи СЕТ в аварійних

режимах. Це стосується, головним чином, зменшення пошкоджень елементів контактної підвіски і захисних апаратів тягових підстанцій. Кількість електрики, що проходить через точку короткого замикання, зменшилася у $Q_{\text{к ПЗ4}} / Q_{\text{к ПЗ4+VD+U}} = 1286,8 / 112,68 = 11,4$ рази. Кількість електрики у камерах фідерних ШВ ТП1 і ТП2 зменшилася у $Q_{\text{1 ПЗ4}} / Q_{\text{1 ПЗ4+VD+U}} = 248,9 / 13,71 = 18,2$ і $Q_{\text{2 ПЗ4}} / Q_{\text{2 ПЗ4+VD+U}} = 236,9 / 17,21 = 13,8$ рази відповідно. Кількість електрики, яку генерує електровоз, зменшилася у $Q_{\text{е ПЗ4}} / Q_{\text{е ПЗ4+VD+U}} = 913,73 / 110,25 = 8,3$ рази. Як результат такого підвищення ефективності буде продовження терміну роботи і менші термічні пошкодження елементів системи електричної тяги тощо.

6.4 Методи зниження кидків струму в режимі «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі

Режим короткочасного зняття напруги на струмоприймачі ЕРС з наступним її відновленням, на рівні з режимом короткого замикання в елементах системи електричної тяги, є найчастішим і найбільш небезпечним аварійним режимом. Як випливає з результатів досліджень, приведених в розділі 5, у цьому режимі виникають 3,5...4-кратні і навіть більші струмові перенавантаження ТЕД ЕРС, що призводять до колових вогнів на їх колекторах, а, отже, і до виходу із ладу самих двигунів. Одночасно, як показали експериментальні дослідження, у цьому режимі «зняття-відновлення» напруги, який спостерігається, наприклад, при відриві струмоприймача від контактного проводу з наступним його доторканням, мають місце також кидки і фідерних струмів у системі тягового електропостачання (рис. 5.56-5.58).

Як показано в розділі 5, основною причиною появи зазначених кидків струму в ЕРС, а, отже, і фідерних струмів є характер зміни в часі магнітного

потоку $\Phi(t)$ магнітопроводу ТЕД, а саме – недопущення його значного зменшення. Тобто, для зниження кидків струмів можливо використання одного із таких двох методів. Перший – недопущення значного зменшення магнітного потоку $\Phi(t)$ після втрати напруги (й тим самим зменшення струму $i_з(t)$ в ОЗ ТЕД до нуля). Другий – різке прискорення збільшення $\Phi(t)$ до його початкового усталеного значення після повного відновлення напруги на струмоприймачі.

На думку автора, існує практична можливість вирішити поставлену задачу за першим методом. Для цього треба паралельно обмотці збудження кожного ТЕД увімкнути ємнісний (конденсаторний) накопичувач С електроенергії (рис. 6.24) [280].

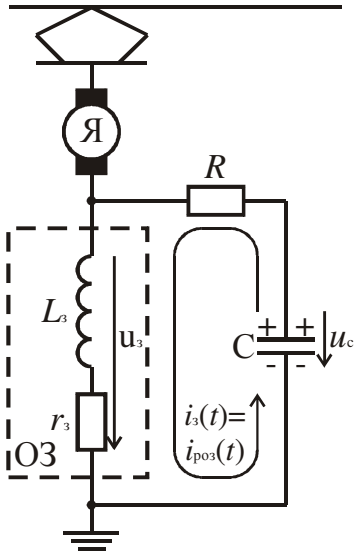


Рисунок 6.24 – Схема вмикання ємнісного накопичувача до ОЗ ТЕД

В останні 3...5 років ідея використання ємнісних накопичувачів в силових колах систем електричної тяги все частіше і у більшій степені цікавить дослідників, хоча публікацій ще замало. В [45, 281, 282] ємнісні накопичувачі пропонується використовувати для поліпшення тягових властивостей ЕРС шляхом збільшення сили тяги за зчепленням. Для зменшення розрахункової потужності ТП автор роботи [283] пропонує встановлювати на ЕРС «суперконденсаторні» батареї, накопичувати в них енергію електричного гальмування, а потім її передавати в тягову електромережу. Подібна пропо-

зиція міститься в роботі [284, 285], але конденсаторні накопичувачі планується встановлювати на ТП. Застосування конденсаторних накопичувачів для пуску і розгону ЕРС, а також для стабілізації тягового навантаження запропоновано в [249]. Як випливає із цього аналізу, про використання ємнісних накопичувачів в аварійному режимі «втрата-відновлення» напруги публікації відсутні. Тому розглянемо докладно функції конденсаторного накопичувача (рис. 6.24) на кожному з етапів явища «відриву-торкання» струмоприймача.

В нормальному усталеному режимі роботи ЕРС, коли струмоприймач торкається контактного провода, постійний струм (який дещо коливається, але з дуже низькою частотою) протікає по якорю і ОЗ, а конденсатор, зарядившись, має напругу $U_{\text{С}}$, яка дорівнює напрузі $U_{\text{з}}$ на обмотці збудження. Оскільки активний опір останньої $r_{\text{з}}$ малий, то і напруга на накопичувачі $U_{\text{С}}$ теж має невелике значення. При відриві струмоприймача від контактного провода напруга на струмоприймачі різко знижується до нуля (рис. 5.38); теж саме стосується і струму в якорі, в ОЗ (рис. 5.39) і напруги на ній. В результаті ємнісний накопичувач починає розряджатися через ОЗ (рис. 6.24) й тим самим підтримує майже незмінним магнітний потік $\Phi(t)$ за весь термін часу відриву струмоприймача. Для виконання зазначеного, потрібно здійснити вибір необхідного значення ємності конденсаторного накопичувача, враховуючи деякі умови, розглянемо їх.

Умова перша. Як відомо [162], при розряді ємності через котушку (rL–кола), в залежності від значень параметрів r, L, C, можливі три процеси розряду: аперіодичний, граничний і періодичний (коливальний). Виходячи із змісту поставленої задачі і характеру часової зміни перехідних величин у зазначених процесах [162], необхідно щоб процес розряду накопичувача через ОЗ ($r_{\text{з}}$, $L_{\text{з}}$ – коло) (рис. 6.24) був аперіодичним. Умовою такого розряду є те, щоб активний опір ОЗ $r_{\text{з}}$ перевищував критичний опір кола «накопичувач-ОЗ», який дорівнює $2\sqrt{\frac{L_{\text{з}}}{C}}$ [162], тобто

$$r_з > 2\sqrt{\frac{L_з}{C}}. \qquad (6.1)$$

Звідки перша умова для визначення ємності C накопичувача полягає в тому, що

$$C > 4\frac{L_з}{r_з^2}. \qquad (6.2)$$

Умова друга. Для утворення і підтримки практично незмінного магнітного потоку $\Phi(t)$ на протязі всього терміну часу зняття $t_{зн}$ напруги в цей інтервал часу через ОЗ повинен протікати перехідний розрядний струм $i_з(t) = i_{роз}(t)$ (рис. 6.24). А для цього тривалість перехідного процесу $T_{пп}$ розряду ємності C через ОЗ повинна бути більшою, ніж $t_{зн}$, чи дорівнювати найбільшому значенню цього інтервалу часу:

$$T_{пп} \geq t_{зн}^{max} \approx 1{,}5...2{,}0\, c. \qquad (6.3)$$

Як відомо [162], тривалість будь-якого перехідного процесу $T_{пп}$ визначається як

$$T_{пп} = (4...5)\tau, \qquad (6.4)$$

де τ – стала часу електричного кола, в якому протікає досліджуваний перехідний процес.

Визначимо τ для кола рис. 6.24, користуючись відомою методикою [162].

Комплексний опір кола

$$\underline{Z}(j\omega) = r_з + j\omega L_з + \frac{1}{j\omega C}.$$

Змінимо оператор $j\omega$ на оператор p, маємо

$$Z(p) = r_з + pL_з + \frac{1}{pC}.$$

Звідки характеристичне рівняння буде

$$r_з + pL_з + \frac{1}{pC} = 0, \qquad (6.5)$$

або $p^2 + p\frac{r_з}{L_з} + \frac{1}{L_з C} = 0$.

Розв'язавши отримаємо корені:

$$p_{1,2} = -\frac{r_з}{2L_з} \pm \sqrt{\left(\frac{r_з}{2L_з}\right)^2 - \frac{1}{L_з C}}\,. \qquad (6.6)$$

Якщо коло має один реактивний елемент, тоді корінь буде один (p) і тоді стала часу дорівнює:

$$\tau = 1\Big/|p|. \qquad (6.7)$$

В нашій задачі два реактивних елементи і тому два кореня: p_1, p_2 що визначаються за (6.6). Тоді, користуючись формально формулами (6.3), (6.4), (6.6) і (6.7), можна записати

$$t_{зн}^{max} \le \frac{5}{\left|-\frac{r_з}{2L_з} + \sqrt{\left(\frac{r_з}{2L_з}\right)^2 - \frac{1}{L_з C}}\right|}, \qquad (6.8)$$

а, також

$$t_{зн}^{max} \le \frac{5}{\left|-\frac{r_з}{2L_з} - \sqrt{\left(\frac{r_з}{2L_з}\right)^2 - \frac{1}{L_з C}}\right|}. \qquad (6.9)$$

Формули (6.8), (6.9) є виразами другої умови вибору величини С, який потрібно здійснювати методом «перебору варіантів» (тобто значень до виконання нерівностей (6.8) і (6.9)).

Умова третя. В паралельному контурі рис. 6.24 не повинен виникати режим резонансу струмів, умовою якого є рівність реактивних провідностей паралельних віток: $B_{L0} = B_{C0}$ [286], тобто

$$\frac{\omega_0 L_з}{\left(\omega_0 L_з\right)^2 + r_з^2} = \omega_0 C\,, \qquad (6.10)$$

де ω_0 – кутова резонансна частота.

Далі треба діяти одним із таких двох підходів.

Перший. Вибираємо значення ємності за першої і другої умовами і, підставивши це значення в (6.10), знаходимо резонансну частоту ω_0. Далі, виконуємо спектральний аналіз струму $i_з(t) = i_{роз}(t)$, що протікає через ОЗ, і аналізуємо та порівнюємо гармоніки цього струму з ω_0 на предмет можливості виникнення резонансу на певній частоті.

Другий. Виходячи із (6.10), робимо висновок, що резонанс струмів не виникне, якщо ємність буде [286]

$$C \neq \frac{\omega_0 L_з}{(\omega_0 L_з)^2 + r_з^2}. \qquad (6.11)$$

Також виконуємо спектральний аналіз струму $i_з(t)$, знаходимо його гармоніки і почергово підставляючи їх в (6.11), визначаємо, при якій *C* буде виконуватись нерівність (6.11).

Вибравши значення ємності, треба реально переконатись, по-перше, що режим розряду буде аперіодичним, а не коливальним і, по-друге, визначити часову залежність потоку $\Phi(t)$, що дасть можливість встановити, чи дійсно він майже не змінюється за термін часу $t_{зн}$ зняття напруги. Для цього запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа для миттєвих величин для розрядного контура рис. 6.24.

$$r_з \cdot i_з(t) + L_з \frac{di_з}{dt} + u_C(t) = 0. \qquad (6.12)$$

Враховуючи, що $i_з(t) = i_{роз}(t) = C\frac{du_C}{dt}$, після деяких простих перетворень, отримаємо:

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{r_з}{L_з} \cdot \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{L_з C} u_C(t) = 0. \qquad (6.13)$$

Розв'язавши рівняння (6.13) при заданій початковій умові $u_C(t) = r_з I$, знаходимо часову залежність зміни напруги $u_C(t)$ на ємності у перехідному процесі розряду накопичувача за відомим виразом

$$i_з(t) = i_{роз}(t) = C\frac{du_C}{dt}. \qquad (6.14)$$

Визначаємо струм в ОЗ $i_з(t)$. Далі, для заданого певного двигуна ЕРС маємо криву намагнічення $\Phi(i_з)$. Перебудовуємо криві $i_з(t)$ і $\Phi(i_з)$, отримаємо $\Phi(t)$.

В якості ємнісного накопичувача пропонується використовувати іоністори або суперконденсатори. Згідно [287], розглядається застосування іоністорів типу ЭСМА серії 300, які випускаються серійно, мають ККД, рівний 0,86 і питому енергоємність $17{,}25\cdot10^3$ Дж/кг. Перспективними є також іоністори, що розроблені в лабораторіях ІОНХ ім. Вернадського [287]. Їх питома ємність складає $10\,Ф/см^3$, енергоємність $45\,Дж/кг$, виготовлені на ємність 240...300 Ф і витримують мільйони циклів заряд-розряд при температурі від -50º до 70º.

В [45] в якості накопичувачів пропонуються суперконденсатори, які можуть мати ємність $1\ldots10^4$ Ф, до 107 циклів заряд-розряд без втрати ємності, напругу окремого елемента до 2,3 В. Промисловість виготовляє модулі з послідовним з'єднанням окремих елементів.

Автор роботи [281] пропонує використання конденсаторів типу 20ЭК404, які мають габарити 330×346×249 мм, масу 25 кг, ємність 500 Ф, напругу 15 В і внутрішній опір 2,5 мОм.

Певно, з часом будуть розроблятися нові типи конденсаторів з покращеними параметрами і тому питання вибору типу накопичувача буде розв'язуватися простіше.

Виконаємо вибір величини ємності С та розрахунку $i_з(t)$, $\Phi(t)$, для тягового електродвигуна типу ЕД141У1 електровоза ДЕ1; дані його обмотки збудження: $r_з = 25{,}3$ мОм, $L_з = 4{,}9$ мГн (при $I_{ном}$) (таблиця Д.2 додатку Д). Спектри миттєвих графіків тягового струму електровозів в їх нормальному режимі роботи приведені на рис. 6.25.

Для визначення резонансної частоти ω_0 в аварійному режимі «зняття відновлення» напруги на струмоприймачі скористаємося дискретним перетворенням Фур'є [170], а також теорією інтергармонік [288, 289]. Для перехідного струму якоря, представленого на рис. 5.39, дискретний спектр має вигляд рис. 6.26.

Як випливає із рис. 6.25 та 6.26 найбільш значимі гармоніки коливаються у межах частот $f = \left(5 \cdot 10^{-4} ... 15\right)$ Гц. Для уникнення резонансу струмів на цих частотах, дотримуючись умов (6.2), (6.8), (6.9), (6.11), нами було визначено, що значення ємності С повинно бути більше 30 Ф. Для реалізації вітки накопичення для розглядуваного вище типу двигунів було обрано накопичувач 20ЭК404 з ємністю $C = 500\,\Phi$.

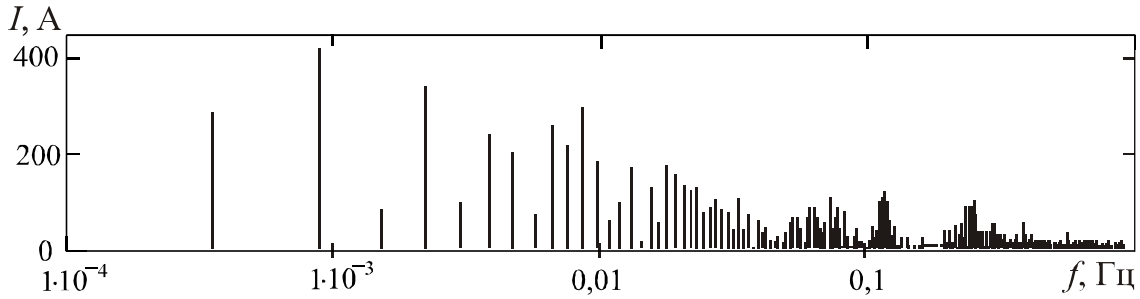


Рисунок 6.25 – Спектри миттєвих графіків тягового струму електровозу ДЕ1 [249]

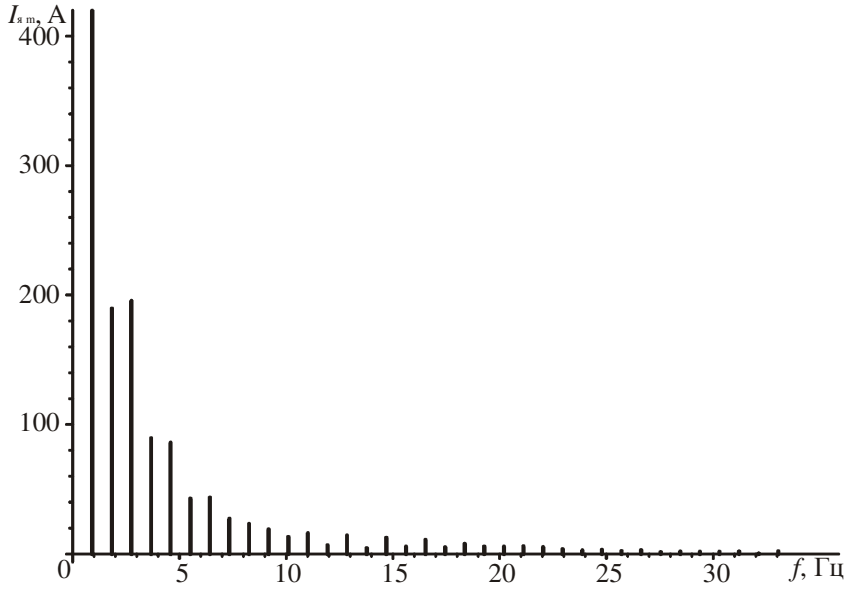


Рисунок 6.26 – Спектрограма струму якоря ТЕД в режимі «відрив-торкання» струмоприймача

Для уникнення значних кидків струму в початковий момент часу заряду і розряду конденсатора послідовно з суперконденсатором увімкнено резистори. Схема увімкнення вітки накопичення Н1…Н8 паралельно обмоткам збудження ОЗ1…ОЗ8 для «СП» з'єднання представлена на рис. 6.27.

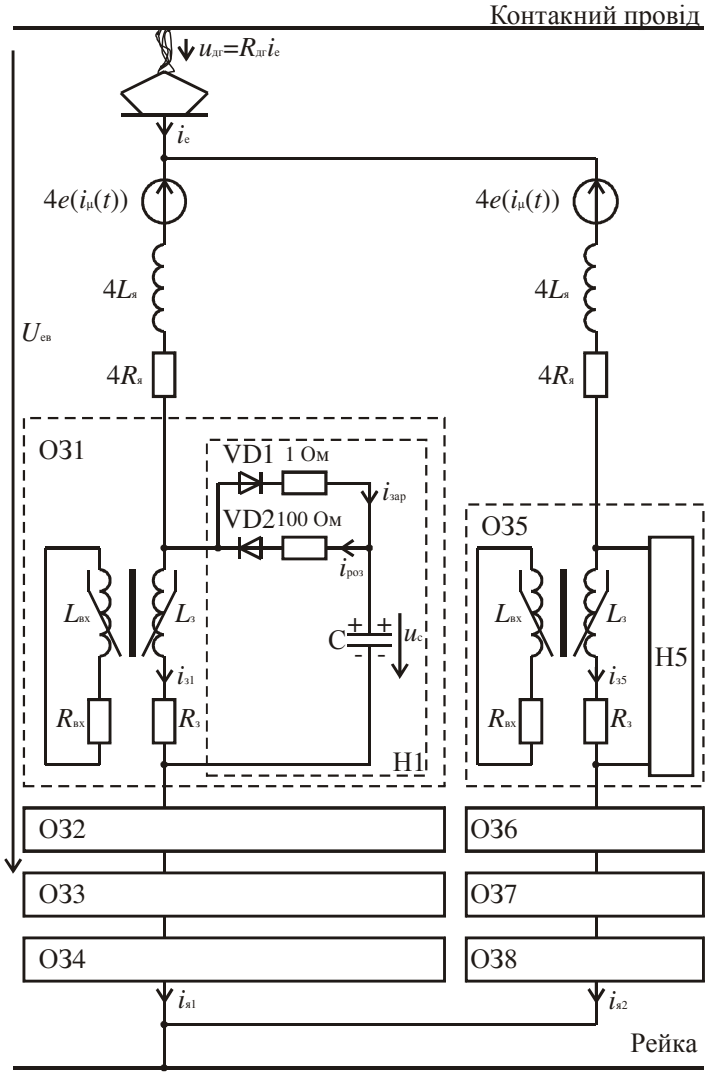


Рисунок 6.27 – Схема увімкнення вітки накопичення до ОЗ

Під час заряду конденсатора відкритий діод VD1, заряд відбувається через резистор опором 1 Ом, для обмеження струму заряду. Під час різкого спаду магнітного потоку при відриві струмоприймача, конденсатор розряджається через резистор опором 100 Ом, оскільки діод VD2 відкритий, а VD1 закритий. Вибір значення опору останнього резистора пояснюється налаштуванням на частоту $f = 2{,}5 \cdot 10^{-5}\ Гц$, яка знаходиться поза межами області значень найбільш впливових частот.

Для підтвердження практичної реалізації метода за схемою заміщення рис. 6.27, автором було створено математичну модель процесу «відрив-торкання» струмоприймача до контактного проводу. Вихідними даними математичного моделювання були основні параметри ТЕД ЕД-141У1 (таблиця Д.2 додатку Д) і напруга на струмоприймачі $U_{\text{е}} = 3000\,B$. Напругу заряду конденсатора визначено як незалежну початкову умову $U_{\text{С}} = 15\,B$; струм якоря на 40-й ходовій позиції «СП» з'єднання вантажного електровозу ДЕ1 прийнято $I_{\text{я}} = 565\,A$ (встановлюється машиністом, під час руху електровозу). Значення кутової частоти та магнітного потоку для проти-е.р.с. ТЕД було отримано за електромеханічними характеристиками локомотива.

Часові залежності магнітного потоку $\Phi(t)$ ТЕД і струму електровоза $i_{\text{е}}(t)$ з накопичувачем і без нього зведені в одних площинах і представлені відповідно на рис. 6.28 і 6.29 [280], з яких випливає таке.

1. Магнітний потік $\Phi(t)$ при наявності конденсаторного накопичувача спадає лише на $\Delta\Phi_{C} = 0{,}5\,мВб$, в той час як його спад без накопичувача дорівнює $\Delta\Phi = 1{,}8\,мВб$;

2. Наслідками п. 1 є значне зменшення кидка струму електровоза $\Delta i_{\text{е}}$, який у колі без накопичувача у $^{417}\!/_{78} \approx 5{,}3$ рази перевищує максимальне значення струму електровозу з вітками накопичення енергії.

Таким чином, наслідком увімкнення вітки накопичення паралельно ОЗ, буде значне покращення потенціального стану на колекторі ТЕД, а це, у свою чергу, зменшить кількість аварійних режимів перекриття колекторних пластин коловим вогнем.

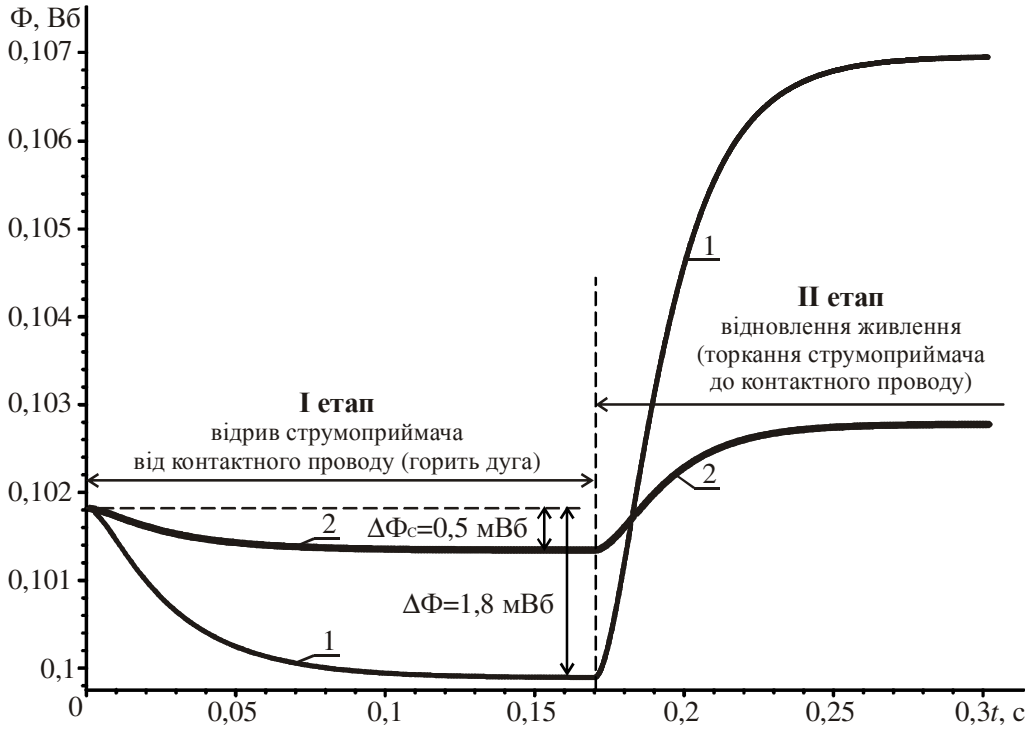


Рисунок 6.28 – Часові залежності зміни магнітного потоку ТЕД в режимі «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі: 1 – без ємнісного накопичувача; 2 – з суперконденсатором

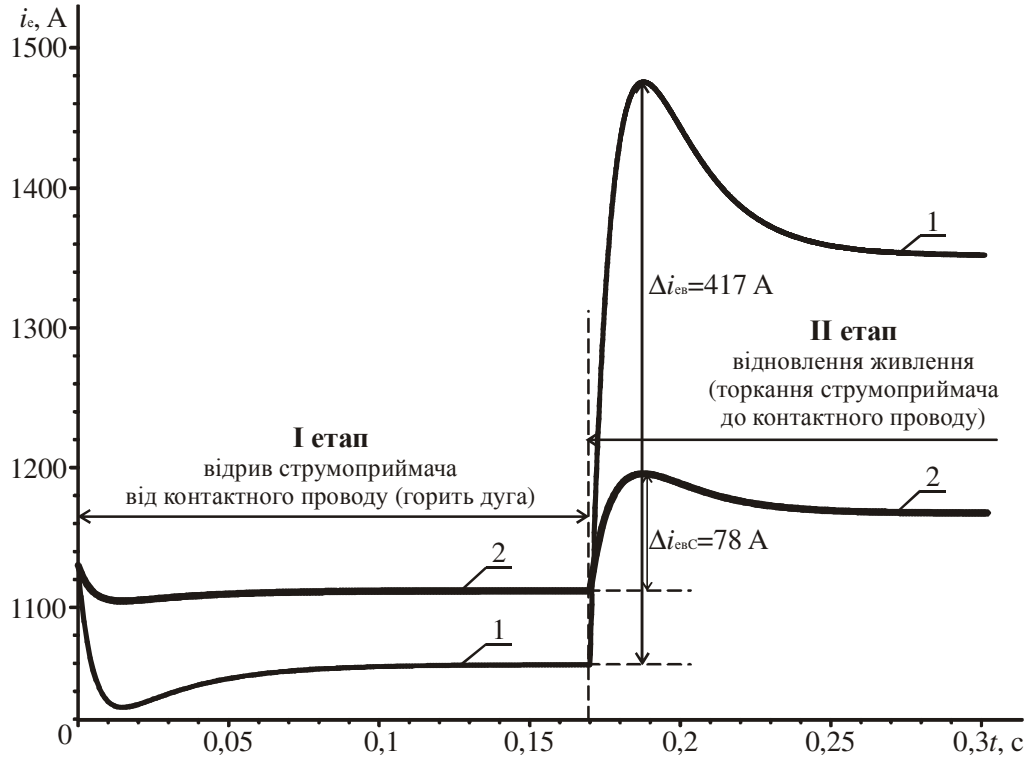


Рисунок 6.29 – Часові залежності зміни струму електровозу в режимі «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі: 1 – без ємнісного накопичувача; 2 – з суперконденсатором

6.5 Розробка системи, що реалізує захист за приростом фідерного струму

Найбільш об'єктивну оцінку властивостей існуючих ШВ ТП дають, *характеристики спрацьовування* (ХС) ШВ [51]. Ці характеристики – граничні лінії, що поділяють область спрацьовування і не спрацьовування ШВ при певному законі зміни струму. Під *оптимальною захисною характеристикою* (ОЗХ) будемо розуміти комплекс характеристик спрацьовування, які забезпечують максимальну захищеність фідерної зони при допустимій імовірності хибних спрацьовувань ШВ [53].

Зміна струму фідера 3,3 кВ при навантаженні і КЗ відбувається за законом, що наближено описується виразом:

$$i(t) = I_0 + \Delta I\left(1 - e^{-\frac{t}{T_c}}\right), \qquad (6.15)$$

де $\Delta I = I_к - I_0$ – приріст струму, визначається як різниця кінцевого $I_к$ і початкового I_0 значення перехідного струму фідера (рис. 6.30); T_c – стала часу зміни струму; I_0 – попереднє значення струму до початку перехідного процесу.

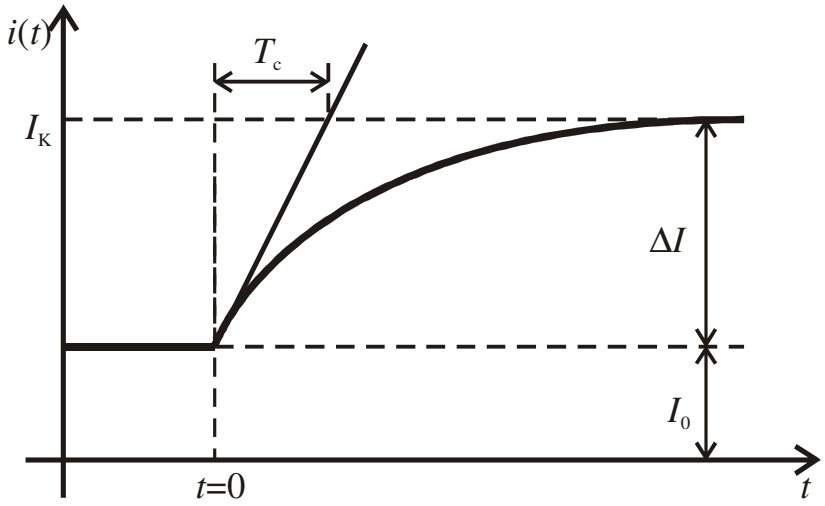


Рисунок 6.30 – Перехідний струм фідера при перенавантаженні чи короткому замиканні

Вираз (6.15) може бути представлено і через швидкість зростання струму. Використовуючи залежності $\left(\frac{di(t)}{dt}\right)_{max} = \left(\frac{di(t)}{dt}\right)_{t=0} = v_I = \frac{\Delta I}{T_c}$, отримаємо:

$$i(t) = I_0 + \Delta I\left(1 - e^{-\frac{t}{I}v_I}\right). \qquad (6.16)$$

Таким чином, згідно (6.15) і (6.16), струм фідера є функцією трьох параметрів: I_0, ΔI, T_c (v_I). Параметри I_0, ΔI характеризують усталену величину струму до та після зміни поточного значення перехідного струму $i(t)$, а третій, T_c (v_I) – характеризує зміну перехідного струму.

У відповідності з [51], ХС є залежність стрибка струму ΔI, що викликає спрацьовування ШВ, від величини попереднього струму навантаження I_0 при $T_c = const$, тобто це є залежність $\Delta I = f(I_0)$. Двома граничними значеннями ХС є статична і динамічна уставки ШВ. *Статична* уставка $I_{\text{у}}$ визначається спрацьовуванням ШВ при повільній зміні струму по виразу (6.15), тобто визначає спрацьовування ШВ від усталеного струму. *Динамічна* уставка $\Delta I_{\text{у}}$ визначає мінімальний стрибок струму, який викликає спрацьовування ШВ при $T_c = const$ і $I_0 = 0$, тобто визначає спрацьовування від зміни струму.

Як показано в роботі [51], ХС (залежність $\Delta I = f(I)$) є пряма лінія, що з'єднує відрізки $\Delta I_{\text{у}}$ і $I_{\text{у}}$, відкладені відповідно по вісі ординат і абсцис (рис. 6.31). Таким чином, довільна проміжна точка ХС при відомих $\Delta I_{\text{у}}$ і $I_{\text{у}}$, а також відомому I_0, визначається виразом:

$$\Delta I = \Delta I_{\text{у}} \frac{I_{\text{у}} - I_0}{I_{\text{у}}}. \qquad (6.17)$$

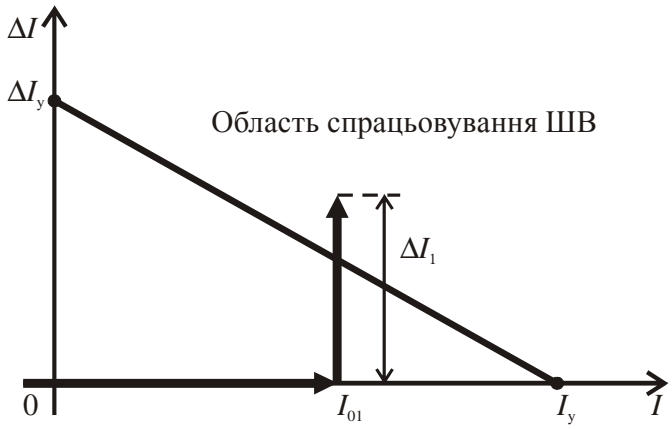


Рисунок 6.31 – Характеристика спрацьовування (ХС) швидкодіючого вимикача

Область спрацьовування вимикача лежить вище ХС. Визначаючи ΔI_y для всіх можливих значень T_c, яке змінюється у межах $0 \le T_c \le \infty$ при одному й тому ж значенні I_y, можемо побудувати сімейство характеристик спрацьовувань ШВ, за допомогою яких легко встановити поведінку ШВ при стрибкові струму величиною ΔI_1, якщо відома стала часу T_{c1} і значення попереднього струму навантаження I_{01}. Відклавши спочатку по вісі абсцис величину I_{01}, а тоді з її кінця вверх величину ΔI_1, встановити де закінчується відрізок ΔI_1 відносно ХС. Якщо кінець відрізка знаходиться в області над характеристикою, то ШВ від розглядуваного стрибка спрацює, якщо ж під характеристикою – не спрацює.

Слід зауважити, що навіть для одного й того ж фідера параметри I_0, ΔI, T_c (v_I) є величинами змінними, які залежать від конкретної ситуації в момент зміни струму навантаження чи КЗ. Параметр I_0 залежить від кількості електровозів, що знаходяться на фідерній зоні і режимів їх ведення до моменту перехідного процесу, ΔI – від характеристик перехідних процесів: пуск електровоза; перехід електровоза на іншу позицію; відрив-торкання струмоприймача; КЗ на електровозі; КЗ поза електровозом; прохід струмоприймача ізольованої вставки. Параметри T_c (v_I) залежать від параметрів ТМ і ЕРС в момент КЗ.

Аналіз зміни струму фідерів тягової мережі 3,3 кВ дозволяють встановити, що [53, 245]:

- величина стрибків струму ΔI навантаження мало змінюється в залежності від попереднього струму навантаження I_0;

- величина стрибків струму ΔI КЗ знаходиться в зворотній залежності від величини попереднього струму навантаження I_0, тобто зменшується із збільшенням I_0;

- стала часу T_c і швидкість зміни v_I струму навантаження і КЗ залежать від величини попереднього струму навантаження і діапазони їх зміни співрозмірні, достатньо вузькі і знаходяться у межах: $T_c \approx 0{,}01...0{,}05\,c$; $v_I \approx 30...120\,{кА}/{с}$. Тобто, відрізнити зміну струму навантаження фідерів 3,3 кВ від зміни струму КЗ по швидкості зростання струму неможливо.

Перший і другий пункти висновків аналізу спрацьовування ШВ, на основі математичного моделювання системи електричної тяги в різних експлуатаційних режимах, дозволяє стверджувати: у тих випадках коли максимальні стрибки пускового струму менше мінімальних стрибків струму КЗ, ця залежність дуже корисна, оскільки при відповідних характеристиках ШВ дає можливість селективно вимикатися при струмах КЗ, величина яких менше $I_{\text{у}}$.

Розглянемо спрощено приклад (рис. 6.32), в якому для кожного наступного стрибка усталений струм дорівнює сумі приросту струму від усіх попередніх стрибків. Останній третій стрибок викликає хибне спрацьовування ШВ. Якщо аналогічна ситуація на фідері повторюється часто, то експлуатація ШВ при такому його налаштовуванні стає неможливим, тобто така ХС ШВ є далекою до оптимальної. Крім того, зміна навантаження (з метою досягнення ОЗХ) вимагає зміни ХС.

На рис. 6.32, показана усереднена ХС ШВ і стрибкоподібна зміна навантаження від нуля до $I_{\text{н max}}$. Статична уставка ШВ при цьому обирається у

відповідності з діючими нормами, тобто, $I_{\text{у}} \le I_{\text{к min}} - 300$, таким чином значення мінімального струм КЗ лежать справа від $I_{\text{у}}$.

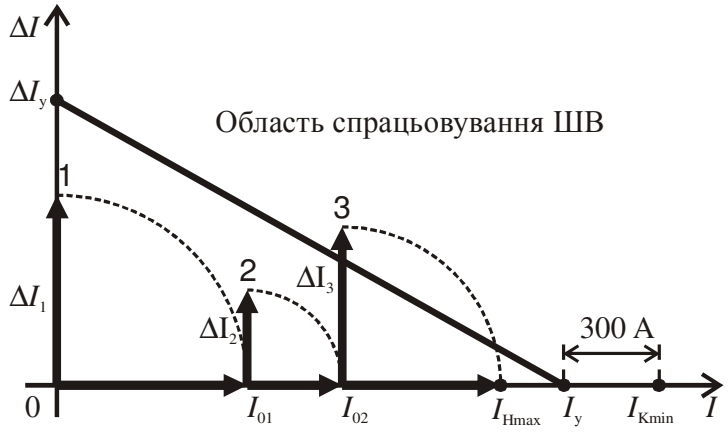


Рисунок 6.32 – Характеристики спрацювання при тяговому навантаженні

Розглядаючи попередню ХС, можна визначити вимоги до ОЗХ: повинна мінімально, але з достатньою надійністю, охоплювати область площини $\Delta I(I)$, в якій розміщено стрибки струму навантаження і її максимальні значення; повинна робити фідер, на якому реалізується, максимально захищеним за всіма параметрами, на які реагує ШВ з шунтом при умові надійного налаштовування від хибних спрацьовувань; ОЗХ визначається не типом ШВ, а властивостями ТМ, тобто реалізація ОЗХ має бути здійснена для кожного окремого фідера, з урахуванням умов його роботи, пропускної здатності та експлуатованого ЕРС.

Враховуючи вищезазначене, в роботі [53] було запропоновано ОЗХ вигляду рис. 6.33.

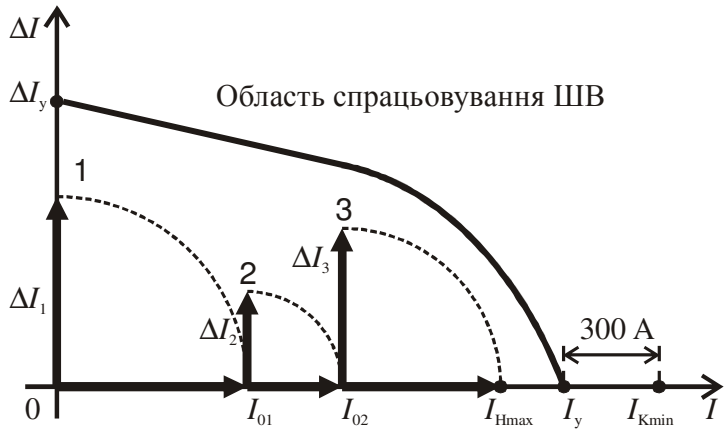


Рисунок 6.33 – Оптимальна характеристика спрацювання при тяговому навантаженні

Щоб забезпечити імпульсний захист фідера уставка вимикача повинна бути менше еквівалентного вимикаючого струму при всіх можливих сполученнях навантаження на фідері і приросту струму КЗ і більше еквівалентних струмів фідерів при самих різких приростах навантаження з урахуванням початкової умови. Таким чином, повинно бути виконана умова [290]:

$$I_{\text{н max}} + \Delta_1 \le I_{\text{у}} \le I_{\text{к min}} - \Delta_2, \qquad (6.18)$$

де $I_{\text{н max}}$ – максимальний еквівалентний струм навантаження, який не викликає вимикання ШВ; $I_{\text{к min}}$ – мінімальний еквівалентний струм вимикання ШВ від КЗ; Δ_1, Δ_2 – запас по струму, який забезпечує необхідну надійність і чутливість захисту ($\Delta_1 = 100A$, $\Delta_2 = 300...350A$ [17]).

По відношенню до самого ШВ імпульсна уставка $\Delta I_{\text{у}}$ повинна мати значний запас по відношенню до максимального імпульсу струму навантаження $\Delta I_{\text{н max}}$ і мінімального імпульсу струму КЗ з врахуванням струму генерації локомотивів $\Delta I_{\text{к min}}$, тобто задовольняти нерівність [12]:

$$\Delta I_{\text{н max}} << \Delta I_{\text{у}} << \Delta I_{\text{к min}}.$$

Тоді для імпульсної уставки вираз (6.26) можна переписати у вигляді:

$$\Delta I_{\text{н max}} + \Delta I_1 \le \Delta I_{\text{у}} \le \Delta I_{\text{к min}} - \Delta I_2. \qquad (6.19)$$

Величини $\Delta I_{\text{н max}}, \Delta I_{\text{к min}}$ визначаються шляхом математичного моделювання різних режимів роботи системи електричної тяги постійного струму. Величина запасу уставки ΔI_1, ΔI_2 повинна визначатися з точки зору імовірності можливих хибних спрацьовувань захисту при заданій уставці.

Питання вибору $\Delta I_{\text{у}}$ досить складне. З однієї сторони, бажаним є максимальне наближення $\Delta I_{\text{у}}$ до $\Delta I_{\text{н max}}$. Але при наближенні $\Delta I_{\text{у}}$ до $\Delta I_{\text{н max}}$ збільшується імовірність хибних вимикань. З іншої сторони, збільшення $\Delta I_{\text{у}}$ не може бути безмежним, оскільки при $\Delta I_{\text{у}} \approx \Delta I_{\text{к min}}$ порушується селективна робота системи захисту фідерів.

За результатами математичного моделювання, виконаних у попередніх розділах 3, 4, встановлено наступні показники захисних характеристик (таблиця 6.8) [291].

Таблиця 6.8

Показники захисних характеристик імпульсного захисту

Напруга на затискачах тягової підстанції, U_0, В	Стала часу електротягової мережі, T_C, с	Струм статичної уставки, ΔI, А	Максимальний стрибок струму навантаження, $\Delta I_{\text{н max}}$, А	Мінімальний стрибок струму КЗ, $\Delta I_{\text{к min}}$, А
3300	0,005...0,03	3000...4000	600..850	1200...1700

На рис 6.34 представлено ХС для $\Delta I_y = 700...1000$ А і $I_y = 3000$ А.

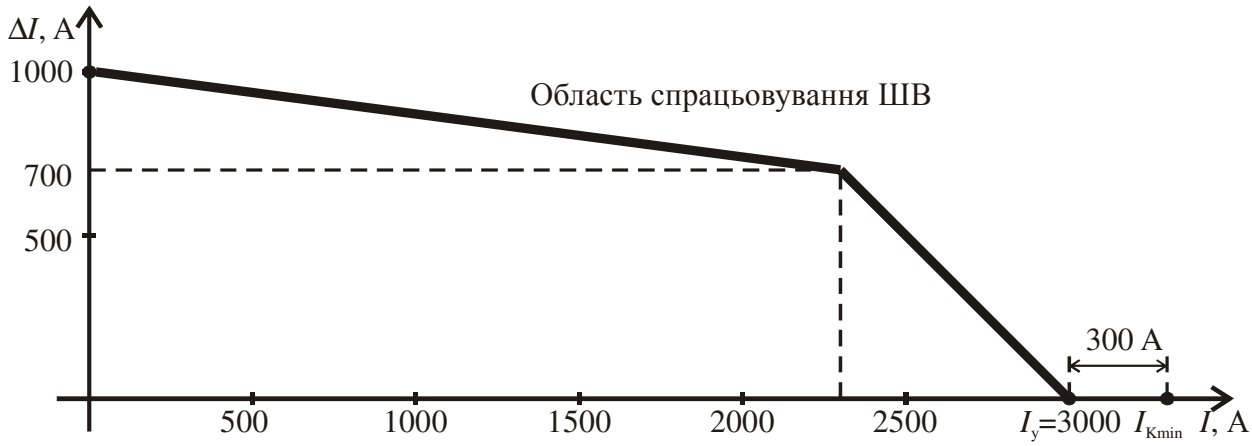


Рисунок 6.34 – Реалізована оптимальна характеристика спрацювання

Методика визначення уставки з врахуванням режимів роботи ЕРС полягає у наступному.

1. За даними графіку руху поїздів обирають розрахункові схеми для зосередженого і розподіленого навантаження.

2. Знаючи діапазон коливання напруги на фідері, тип і характеристику ЕРС, параметри фідерів і ТП, виконують моделювання СЕТ в перехідних аварійних і робочих режимах.

3. На основі моделювання СЕТ в робочих перехідних режимах виділяють найбільший приріст перехідного струму навантаження фідера $\Delta I_{\text{н max}}$.

4. На основі моделювання СЕТ в аварійних перехідних режимах виділяють найменший приріст перехідного струму КЗ фідера $\Delta I_{\text{к min}}$.

5. За існуючою методикою визначають перехідний струм фідера при КЗ у найвіддаленішій точці фідерної зони, а за умовою (6.18) визначають струм уставки ШВ $I_{\text{у}}$.

6. Знаючи $\Delta I_{\text{н max}}$, $\Delta I_{\text{к min}}$, $I_{\text{у}}$, будують ЗХ розглядуваного фідера.

7. Захисну характеристику фідера представляють у вигляді апроксимованої характеристики, виконують оцифровку (представлення у бінарному коді) отриманої ЗХ. ЗХ представлену у двоїчному коді заносять у пам'ять мікропроцесорної системи захисту у вигляді масиву даних.

Схемотехнічно спроектована система представлена в додатку Ж.

6.6 Оцінка економічної ефективності застосування нових засобів багато параметричного захисту, нових принципів захисту, методики вибору уставок

В роботі [33] було зазначено, що впровадженням сучасних багатопарметричних мікропроцесорних систем захисту повністю виключити помилкові вимикання ШВ неможливо. Розрахунок собівартості багатопарметричних мікропроцесорних систем захисту приведено в додатку З. Також зазначено, що кількість помилкових неселективних вимикань захисних апаратів ТП повинне зменшитися приблизно на 50% у порівнянні з кількістю вимикань до модернізації фідерних чарунок.

Економічна ефективність від зниження помилкових і неселективних вимикань ШВ ТП визначається наступними причинами:

1. підвищенням загального ресурсу роботи ШВ ТП за рахунок зниження кількості зазначених вимикань;
2. підвищенням безпеки руху за рахунок зниження вимикань ШВ ТП;

3. зменшенням експлуатаційних витрат на заробітну плату, на капітальні й поточні ремонти ШВ і дугогасних камер, на виготовлення контактів ШВ і лабіринтів дугогасних камер, на матеріали, запасне устаткування, сировину, електроенергію, інструмент.

Розрахунок проведемо для ТП з шістьома фідерами, що живлять головні шляхи з встановленими ШВ типу ВАБ-43 (по два послідовно ввімкнених на кожному фідері); розрахунки здійснювали в цінах 2011 р.

Суму річного економічного ефекту визначали за формулою:

$$E = \left[\left(C_1 + Є \cdot K_1 \right) - \left(C_2 + Є \cdot K_2 \right) \right] \cdot A ,$$

де C_1, C_2 – собівартість робіт, пов'язаних з ремонтом і заміною устаткування до й після застосування мікропроцесорних систем захисту ТП; K_1, K_2 - питомі капітальні витрати на ШВ ТП до та після застосування мікропроцесорних систем захисту ТП; $Є$ - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних витрат; A - кількість фідерів ТП.

Собівартість робіт, пов'язаних з ремонтом і заміною устаткування, складається з:

$$C_1 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 ;$$

$$C_2 = A_1' + A_2' + A_3' + A_4' ,$$

де A_1, A_1' - вартість ремонту ШВ на одній підстанції в рік після вичерпання їхнього ресурсу відповідно до та після застосування мікропроцесорних систем (враховуючої експлуатаційні умови даних ділянок); A_2, A_2' - вартість заміни вимикачів, що були пошкоджені, і іншого устаткування підстанції, що пов'язані з невимиканням фідерних струмів КЗ відповідно до та після застосування мікропроцесорних систем; A_3, A_3' - вартість відновлювальних робіт і заміни ушкодженого устаткування ШВ на одній ТП на рік, відповідно до й після застосування мікропроцесорних систем; A_4, A_4' - вартість відновлювальних робіт і затримки поїздів через перегорання проводів контактної мережі в результаті поломки ШВ у рік на одну підстанцію відповідно до та після застосування мікропроцесорних систем;

Величини A_1, A_1' можуть бути визначені з обліком: експлуатаційних витрат на ремонт ШВ типу ВАБ-43 (див. таблицю 6.9); середньої кількості вимикань ШВ одного фідера ТП у рік – 300; середньої кількості фідерів на одну підстанцію - 6; ресурсу роботи (кількістю допустимих вимикань) дугогасної камери автомата в режимі вимикання струмів КЗ при здвоєних ШВ складає 150; допущення, що терміну служби ШВ після застосування мікропроцесорних систем збільшиться в 1,2 рази [33].

Згідно таблиці 6.9, експлуатаційні витрати на ремонт ШВ і дугогасних камер (з урахуванням вищевикладених позицій) до застосування мікропроцесорних систем становлять $A_1 = 6322{,}8$ грн.

Відповідно, після застосування:

$$A_1' = \frac{6322{,}8}{1{,}2} = 5269 \text{ (грн).}$$

Таблиця 6.9

Статті експлуатаційних витрат на ремонт ШВ ТПС

Операції	Тарифні розцінки, $\frac{грн}{год}$	Час на одиницю, люд.-год.	Кількість ШВ, шт.	Вартість, грн
Капітальний ремонт ВАБ-43	Ел. Механік - 10,16 Ел. Монтер 5-го розр. - 12,13	7,18	12	1920,5
Поточний ремонт ВАБ-43	Ел. Механік - 10,16 Ел. Монтер 4-го розр. - 9,77	3,56	12	851,4
Капітальний ремонт дугогасних камер	Ел. Механік - 10,16 Ел. Монтер 3-го розр. - 9,43	8,85	12	2040
Поточний ремонт дугогасних камер	Ел. Механік - 10,16 Ел. Монтер 4-го розр. - 9,77 Ел. Монтер 3-го розр. - 9,43	1,3	12	458
Разом:				5269,4
Доплата за роз'їзний характер роботи	20 % від окладу			1053,8
Разом:				6322,8

Величини A_2 A_2' можуть бути визначені на основі оцінки вартості заміни пошкоджених ШВ ТП.

За статистичним даними по всій мережі доріг постійного струму в перерахуванні на одну підстанцію відзначається, приблизно, 0,05 випадків пошкодження вимикачів на рік. Вартість найбільш розповсюдженого на залізницях України вимикача ВАБ-43 складає 137000 (грн) (вартість нового перспективного ВАБ-206 – 200000 грн). З урахуванням вартості відновлення іншого устаткування, пошкодженого при аваріях, можна орієнтовно прийняти:

$$A_2 = \left(2 \cdot 137000 + 5000\right) \cdot 0,05 = 13950 \text{ (грн).}$$

Після застосування мікропроцесорного захисту додаткові витрати складуть:

$$A_2' = \frac{13950}{1,2} = 11625 \text{ (грн).}$$

Величини A_3, A_3' можуть бути визначені з обліком: вартості замінного швидкодіючого вимикача - 137000 (грн); витрат на відновлювальні роботи, які орієнтовно можна прийняти (з урахуванням роботи бригади із двох чоловік: електромеханік - 10,16 $^{грн}/_{год}$, електромонтер 4-го розряду - 9,77 $^{грн}/_{год}$ при нормі часу на вимірник 0,7 люд.-год.).

$$A_3 = \left(137000 + \left(\left(10,16 + 9,77\right) \cdot 0,7 \cdot 12\right)\right) \cdot 0,02 = 2743 \text{ (грн);}$$

$$A_3' = \frac{2743}{1,2} = 2285,8 \text{ (грн).}$$

Проаналізувавши роботи [3-8] було встановлено, що, наприклад, по ДП «Придніпровська залізниця» в середньому на рік спостерігається 4 перепали проводів. У середньому по мережі електрифікованих доріг кількість перепалів контактних проводів у перерахуванні на одну тягову підстанцію становить близько 0,1 випадки на рік.

На відновлювальні роботи витрачаються як матеріальні так і людські ресурси. Під людськими ресурсами будемо розуміти використання певної кількості виконавців на проведення робіт.

Техніко-економічний розрахунок відновлювальних робіт приведемо, наприклад, для ділянки тягової мережі між тяговими підстанціями Нижньодніпровськ-Вузол – Ілларіонове. Цю ділянку обслуговує район контактної мережі ЕЧК-13.

Під час відновлення контактного проводу залучаються бригади працівників ЕЧК, що складаються мінімум з п’яти членів. Склад бригади і калькуляція фонду оплати праці відновлювальних робіт на ТМ приведені в таблиці 6.10.

Таблиця 6.10

Калькуляція фонду оплати праці за проведені відновлювальні роботи

Посада	Оклад, грн/год	Вислуга		Премія		Кількість годин, год		Заробітна платня, грн
		%	грн	%	грн	Підготовчі роботи	Основні роботи	
Начальник	19,33	40	7,732	15	2,8995	0,5	4	119,85
Старший електромеханік	17,65	40	7,06	15	2,6475	0,5	4	109,43
Електромонтер 5 розряду	11,97	40	4,788	25	2,9925	0,5	4	79,002
Електромонтер 6 розряду	14,06	30	4,218	25	3,515	0,5	4	87,172
Машиніст автомотриси	13,39	40	5,356	25	3,3475	0,5	4	88,374

Для доставки бригади до місця, а також безпосередньо для виконання робіт бригаді відновлювальників необхідна автомотриса з гідравлічним лейтером, на ЕЧК-13 використовується автомотриса типу АГВ-437 вартість її використання без амортизації приведена в таблиці 6.11.

Таблиця 6.11

Розрахунок вартості використання засобів механізації

Засіб механізації	Вартість дизельного пального, грн/л	Витрати палива, л/мотогод	Кількість годин		Загальна вартість, грн
			Підготовчі роботи, год	Основні роботи, год	
Автомотриса АГВ-437	9,7	15,5	0,5	4	676,575

Для відновлення контактного проводу необхідно застосовувати вставки з проводу МФ-100 вартість якого 147,3 $^{грн}/_{кг}$ довжина вставки згідно технічних вимог не може бути менше 5,3 м вага одного метра контактного проводу МФ-100 0,89 $^{кг}/_{м}$. Оскільки в контакті з струмоприймачем 2 проводи то вартість такої подвійної вставки складає 1389,62 грн. Крім того, для поєднання вставки з тяговою мережею необхідні з'єднувачі, розрахунок їх вартості приведено в таблиці 6.12

Таблиця 6.12

Розрахунок вартості з'єднувачів

З'єднувачі	Вартість, $^{грн}/_{шт}$	Кількість, шт	Загальна вартість, грн
Стиковка КС-056	116,53	4	466,12
Струнові затискачі КС-046	23,95	6	143,7

Крім того, даний розрахунок доповнимо також економічними втратами від простою потягів під час ремонту контактної підвіски (таблиця 6.13).

Таблиця 6.13

Розрахунок витрат від простою поїздів на перегонах під час відновлення контактного проводу

Доова завантаженість напрямку, пар поїздів	Кількість колій	Добова завантаженість на колію, поїздів	Завантаженість колії на годину, поїздів	Кількість годин простою (ремонту ТМ)		Вартість простою на перегоні, грн	Загальна вартість простою під час ремонту, грн.
				Підготовчі роботи, год	Основні роботи, год		
124,1	2	62,05	2,59	0,5	4	504,56	23613,41

Для усунення однієї такої аварії згідно економічних розрахунків необхідно 25383,63 грн. Зменшення кількості перепалів контактних проводів, наприклад, по ДП «Придніпровська залізниця» на 50 %, від запропонованих

автором дисертації засобів, зменшить витрати на їх відновлення контактного проводу дасть економічний ефект ця величина зменшиться 50767,26 грн. Крім того, уникнення зламу, по причині обриву контактного проводу, щонайменше 2 струмоприймачів зменшить витрати на їх відновлення у розмірі 40 тис. грн.

Таким чином, збиток від поломки фідерного ШВ, який привів до одного перегорання контактного проводу на рік, віднесеному до однієї ТП, може бути прийнятий рівним

$$A_4 = 25383{,}63 \cdot 0{,}1 = 2538{,}36 \text{ (грн).}$$

У випадку, коли із впровадженням запропонованих засобів захисту 50% помилкових вимикань усуваються, то остання складова визначається так:

$$A_4' = 25383{,}63 \cdot 0{,}05 = 1269{,}18 \text{ (грн).}$$

Сума мінімального річного економічного ефекту від застосування запропонованих засобів захисту на одній підстанції може скласти

$$E = \big((6322{,}8 + 13950 + 2743 + 2538{,}36) -$$

$$-(5269 + 11625 + 2285{,}8 + 1269{,}18)\big) \cdot 6 = 30631{,}08 \text{ (грн)}$$

На один вимикач фідерів ТП економічний ефект в середньому складе 2552,6 грн. На прикладі ДП «Придніпровська залізниця» кількість ТП, що здійснюють живлення електрифікованих ділянок, складає 83. Тоді на Придніпровську залізницю економічний ефект від впровадження мікропроцесорних систем захисту, основаних на запропонованих автором нових методів визначення аварійного режиму, складе 2542379,6 грн.

Остаточно економічний ефект від впровадження нових засобів багато параметричного захисту фідерів 3,3 кВ, технічних пропозицій щодо модернізації силових кіл електровозів, нового методу вибору уставки, який враховує поїзну ситуацію на фідерній зоні, наприклад, по ДП «Придніпровська залізниця» складатиме ~2,63 млн. грн.

6.7 Висновки до розділу 6

1. Головним напрямком у проблемі модернізації існуючих систем захисту фідерів 3,3 кВ тягової мережі постійного струму є створення багатопараметричних, високочутливих, селективних, гнучких установок. Основою таких систем мають бути мікропроцесорні технології та сучасний рівень теоретичних знань, що базується на результатах математичного моделювання та накопиченому досвіді експлуатації систем тягового електропостачання постійного струму.

2. Розроблена нова мікропроцесорна система захисту фідерів +3,3 кВ, принцип дії якої оснований на крутизні фронту лінійного зменшення фідерної напруги, на відміну від існуючих систем, дозволяє:

- розрізняти нормальний режим від режиму короткого замикання;
- розпізнавати вид короткого замикання;
- володіє високою швидкістю реагування на виникнення аварійної ситуації (вона складає лише 0,104 мс). що дозволяє ліквідувати аварійний режим, коли струм короткого замикання ще буде на достатньо низькому рівні, тим самим полегшується комутація фідерних вимикачів;
- ліквідувати «мертві зони» існуючих захисних пристроїв.

3. Впровадження мікропроцесорної інформаційної системи, розробленої на ознаці «залишкова напруга», дозволить, по-перше, прискорити роботу енергодиспетчера з локалізації місця короткого замикання в тяговій мережі та усуненню аварійного режиму, і, по-друге, узгодити дії енерго- та поїздного диспетчерів. Система може бути використана на тягових підстанціях постійного струму з напругою живлення електропостачання 3,3 кВ.

4. Запропонований спосіб «запираючого діода» в шунтуючій вітці тягового електричного двигуна суттєво полегшує протікання перехідного процесу в аварійних режимах генераторного струму: кількість електрики, яку генерує електровоз, зменшується майже в 10 разів; у 6,4 рази зменшується

кількість електрики, яка проходить через точку короткого замикання, що різко зменшує імовірність перепалу контактного провода; тривалість генераторного режиму скорочується з 0,55 до 0,08 с.

5. Метод вмикання паралельно обмотці збудження тягових двигунів ємнісного накопичувача є ефективним методом недопущення значного зниження основного магнітного потоку $\Phi(t)$ тягових електричних двигунів в період втрати напруги на струмоприймачі, що у 5,3 рази зменшує (у порівнянні зі схемою без накопичувача) максимальні значення кидків струму електровозу у період відновлення напруги. В результаті спостерігається значне покращення потенціального стану на колекторі ТЕД, а це, у свою чергу, зменшує кількість аварійних режимів перекриття колекторних пластин коловим вогнем.

6. Розроблена мікропроцесорна система, що реалізує захист фідерів +3,3 кВ за приростом фідерного струму, разом з новою методикою вибору уставки максимального імпульсного захисту на основі використання оптимальної захисної характеристики володіють наступними основними перевагами перед існуючими системами захисту: високою швидкодією (термін часу реакції алгоритму захисту складає від 1,2 до 1,28 мс); високою точністю сприйняття вимірювальної інформації; гнучкістю підсистеми; можливістю надавати поточну інформацію на верхні рівні керування; високими показниками експлуатаційної надійності застосованої елементної бази.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема підвищення ефективності функціонування системи електричної тяги постійного струму на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень в аварійних режимах її роботи. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертації полягають у наступному.

1. Найбільш частими аварійними режимами, що виникають на електрифікованих ділянках постійного струму, є режими: короткого замикання; «зняття-відновлення» напруги в результаті «відриву-доторкання» струмоприймача з контактним проводом; аварійні кидки напруги. На сьогодні кількість вимикань підстанційних швидкодіючих вимикачів через коротке замикання в тяговій мережі становить не менше 60 вимикань за рік на один фідер, при 6…8 фідерах на кожній тяговій підстанції. Кількість перепалів та обривів контактного проводу над струмоприймачем в результаті його відриву (чи опускання) – складає від 0,24 до 0,46 випадків за рік на кожні 100 км розгорнутої довжини лінії контактної мережі. В середньому на окремій залізниці, електрифікованій на постійному струмі, цей показник складає 22,9 % від загальної кількості усіх пошкоджень контактної мережі (8 і більше випадків на рік). Стрибкоподібні зміни (поштовхи) напруги на електрорухомому складі з імовірністю 0,8 спостерігаються в інтервалах: від 209 до 861 В – поштовхи-спадання і від 214 до 990 В – поштовхи зростання.

Близько третини усіх вимикань захисних автоматів відбувається з невизначених причин, інші 31 % комутацій – з причини пошкодження силових кіл електрорухомого складу. На кожному автоматичному вимиканні фідерних захисних апаратів втрачається до 15 хв. на з’ясування причини вимикання. При цьому існуюча система фідерного захисту, що базується на максимальному струмовому захисті, володіє рядом недоліків, а електромеханічне обладнання цієї системи, зокрема швидкодіючі вимикачі АБ-2/3, АБ-2/4, ВАБ-2, ВАБ-28, застаріло як фізично, так і морально.

Зазначені аварійні режими роботи, пошкодження контактної мережі і струмоприймачів у період з 2005 по 2011 роки по Донецькій залізниці обумовили в середньому 68 випадків затримок поїздів, при цьому середня тривалість простою поїздів склала 96,6 годин, а на Придніпровській залізниці ці значення відповідно склали 106 випадків і 122,9 годин.

Встановлено відсутність експериментальних досліджень аварійних режимів роботи усієї системи електричної тяги постійного струму на електрифікованих залізницях України, а в існуючих наукових публікаціях з математичного моделювання електромагнітного стану навіть окремих підсистем електротяги в аварійних режимах автори нехтують багатьма реально діючими факторами.

2. Результати експериментальних досліджень аварійних режимів, виконаних автором на ряді діючих електрифікованих ділянках залізниць, свідчать про адекватність (похибка не перевищує 6…8 %) розроблених в дисертації математичних моделей електромагнітних процесів в системі електричної тяги постійного струму.

3. У випадках відсутності електрорухомого складу на фідерних зонах при короткому замиканні в тяговій мережі:

– швидкість зростання і максимальне значення імпульсу струму короткого замикання, головним чином, залежить від відстані $l_{\text{ПК}}$ між тяговою підстанцією і точкою короткого замикання. При односторонньому живленні струм короткого замикання дорівнює струму фідера і його максимальне значення і швидкість збільшення дорівнюють 3900 А і $1{,}32 \cdot 10^5 \, \text{А}/\text{с}$ при $l_{\text{ПК}} = 2$ км і 3200 А та $0{,}8 \cdot 10^5 \, \text{А}/\text{с}$ – при 10 км;

– у випадку двостороннього живлення струм в точці короткого замикання складається із струмів обох тягових підстанцій і тому його максимальне значення може перевищувати 7 кА, що обумовить велику імовірність пошкодження контактної підвіски;

– «найповільнішим» захисним апаратом, що найдовше вимикає струм короткого замикання, є швидкодіючий вимикач, який знаходиться як найдалі від місця короткого замикання, а найбільш небезпечним для тягової мережі у разі виникнення дуги є режим ближнього короткого замикання, струм якого досягає найбільшого значення;

– імпульси перехідних величин містять гармонійні складові, у межах 15…2000 Гц. Амплітуди основної гармоніки (15…50 Гц) і вищих гармонік фідерного струму і напруги змінюються в широких межах ($I_{m(1)} = 67{,}6$ А для $f_{(1)} = 50$ Гц) і можуть негативно впливати як на кодові, так і на тональні рейкові кола.

4. Режими короткого замикання в тяговій мережі (чи в електрорухомому складі) постійного струму супроводжуються різким зниженням напруги на струмоприймачі електровоза, в результаті чого його тягові двигуни, що рухається, переходять в генераторний режим, які, являючись джерелом електроенергії, віддають до місця короткого замикання енергію руху, й тим самим збільшують об’єм термічних і механічних пошкоджень контактної мережі. Імовірність такого переходу, максимальне значення і тривалість генераторних струмів зростають в залежності від відстані від електрорухомого складу до точки короткого замикання в тяговій мережі, а точніше, від спаду напруги на цій ділянці; наприклад, при вузловій схемі живлення, на «СП»-з’єднанні тягових двигунів ці величини відповідно склали: 1300 А і 0,037 с при відстані 18,5 км і 4800 А та 0,07 с – при 1 км.

5. Найбільш небезпечний, з точки зору імовірності перепалу контактного проводу, генераторний режим виникає при роботі на «П»-з’єднанні тягових двигунів, на якому електровоз, по-перше, незалежно від відстані між ним і точкою короткого замикання, завжди переходить в цей аварійний режим і, по-друге, кидок генераторного струму досягає великих значень: на ходовій позиції «П»-з’єднання електровозу ДЕ1 струм короткого замикання досягає 16,8 кА, а кількість електрики, що генерує електровоз (на ПЗ4) дося-

гає 5882 А·с, що достатньо для перепалу контактного провода. Максимальне значення і генераторних струмів, і струмів короткого замикання у нових електровозів ДЕ1, 2ЕЛ4 і ВЛ10 у 3,5…4,5 разів більше, ніж у ВЛ8. Генераторні струми у режимах послаблення збудження ПЗ1…ПЗ4, у порівнянні з повним полем, у 3…6 разів триваліші і у 1,5…2,5 рази більші за максимальним значенням.

Запропонований в дисертації ефективний спосіб зменшення генераторних струмів, спосіб «запираючого діода», у вітці шунта тягового двигуна, майже в 10 разів зменшує кількість електрики, яку генерує електровоз. При цьому кількість електрики, що проходить через точку короткого замикання, зменшується в 6,4 рази, а тривалість генераторного режиму скорочується з 0,55 до 0,08 с.

6. У випадку короткого замикання в тяговій мережі поблизу (~0,5 км) однієї тягової підстанції, наприклад ТП1, фідерний струм цієї підстанції, незалежно від схеми живлення, серії електровоза і схеми з'єднання тягових двигунів, за термін часу 0,025…0,03 с досягає уставки (3000 А) і швидкодіючий вимикач ТП1 вимикається, а швидкодіючий автомат ТП2 залишається увімкненим. При цьому:

– при паралельній схемі живлення ця ТП2 разом з електрорухомим складом, що перейшов в генераторний режим, продовжують підтримувати коротке замикання в тяговій мережі, що призводить до значних термічних пошкоджень контактної підвіски, оскільки струми короткого замикання (в закоротці) мають великі значення: 6600 А; 9100 А і 16800 А відповідно схем «С», «СП», «П»;

– у випадку вузлової схеми живлення, окрім вимикання швидкодіючих вимикачів ТП1, через 0,013…0,02 с спрацьовують і автомати постів секціонування, а струм короткого замикання досягає 10200 А;

– у схемі живлення з постами секціонування і пунктами паралельного з'єднання спочатку вимикаються швидкодіючі вимикачі ТП1, потім, через 0,025 с, – вимикачі постів, а потім і пунктів паралельного з'єднання.

7. В режимах короткого замикання в тяговій мережі спостерігається різко коливальний характер зміни підстанційних напруг тривалістю 0,04…0,05 с з максимальним значенням: до 9100 В при вузловій схемі живлення і 7100 В – з постами секціонування і пунктами паралельного з'єднання (тривалість цих імпульсів 3…5 мс).

Однак в початковий інтервал часу, тривалістю 1,2…3 мс, аварійного режиму фідерна напруга з боку тягової мережі завжди має лінійний характер зменшення зі швидкістю 2000…4000 $кВ/с$ у випадку близького короткого замикання, 1000…1700 $кВ/с$ – середнього і 400…900 $кВ/с$ – дальнього. Ця ознака, яка вперше виявлена в цій дисертації, стала основою (новим принципом) для розробки нової мікропроцесорної системи релейного захисту, що на відміну від існуючих систем: розрізняє нормальні та аварійні режими роботи системи електропостачання; розпізнає вид короткого замикання; дозволяє ліквідувати «мертві зони» тягової мережі, яка захищається існуючими захисними пристроями.

8. Однозначної відповіді про переваги певного дослідженого у цій роботі швидкодіючого вимикача тягової підстанції, у порівнянні з іншими, при вимиканні струмів короткого замикання у всіх режимах дати не можна: в режимі далекого короткого замикання найбільш ефективно і надійно працює вимикач 2×ВАБ-43; в режимі середнього короткого замикання – вимикачі 2×ВАБ-43, 2×ВАБ-49; в режимі близького короткого замикання – вимикачі 2×ВАБ-43, 2×ВАБ-49, ВАБ-206.

9. При одночасному впроваджені мікропроцесорної системи захисту за швидкістю зменшення фідерної напруги і «запираючого діода» досягнуто найбільшого ефекту від зменшення пошкоджень елементів контактної підвіски і захисних апаратів тягових підстанцій. Кількість електрики, що проходить через точку короткого замикання, зменшується у 11,4 рази до 112,68 А·с після впровадження запропонованих заходів. Кількість електрики у камерах фідерних швидкодіючих вимикачів тягових підстанцій зменшилася

у 13,8…18,2 рази, кількість електрики, яку генерує електровоз, зменшилася у 8,3 рази. Результатами такого ефекту буде зменшення термічних та електричних пошкоджень і, як наслідок, продовження терміну роботи елементів системи електричної тяги.

10. Режим внутрішнього короткого замикання тягового двигуна електрорухомого складу є занадто небезпечним для якоря закороченого двигуна, але не створює небезпеки для елементів системи тягового електропостачання, що обумовлено наступним:

– на «СП»-з'єднанні на повному збуджені при розташуванні електровозу на 0,5 км від тягової підстанції струм в закороченому двигуні через 0,0025 с після короткого замикання досягає значної величини, 5600 А, струм електровоза (з урахуванням в моделі системи тягового електропостачання, на відміну від існуючих робіт) зростає лише до 1450 А при уставці швидкодіючого вимикача електровоза 2500 А, тому цей швидкодіючий автомат не спрацьовує і електровоз продовжує живитись від тягової підстанції. Фідерні струми не змінюються різко (напруги теж) і максимальні значення не перевищують 1200 А. У режимі послаблення збудження ПЗ4 спостерігається значно більша нестаціонарність зміни напруг на тягових підстанціях і її амплітуди зростають до 6400 В (ТП1) і 5500 В (ТП2), але струм електровоза менший уставки, струм короткого замикання збільшується до 12080 А;

– режим «П»-з'єднання є більш небезпечним, ніж «С» і «СП», бо струм короткого замикання зростає до 27500 А, струм електровоза зростає до 2500 А і його швидкодіючий вимикач вимикається, також спостерігаються різкі зміни, за 0,01 с, напруги на електровозі з кидком до 5200 В.

11. При зовнішньому короткому замиканні в тяговому двигуні в найнебезпечнішому режимі працює якорь двигуна, послідовно з'єднаний із закороченим: в електровозах ДЕ1 і 2ЕЛ4 в цьому якорі через 2,2 мс після короткого замикання струм зростає до уставки 1900 А і швидкодіючий вимикач електровоза вимикається, в електровозі ВЛ10 уставка 3100 А і вона не досягається. Струм в закороченому якорі всіх електровозів (окрім ВЛ8) на

повному збуджені досягає 1900 А, а в закоротці: 4600 А – в ДЕ1, 5000 А – 2ЕЛ4, 2200 А – ВЛ8.

Фідерні і підстанційні струми за максимальними значенням не перевищують 1400…2200 А, тобто, уставки не досягаються, однак спостерігаються різкі коливання напруги на тягових підстанціях: з амплітудою 6100 В на ТП1 (що знаходиться на відстані 0,5 км від ЕРС) і 4900 В – ТП2.

12. Режим «зняття-відновлення» напруги при відриві-торканні струмоприймача електрорухомого складу:

– є безпечним як для тягової мережі, так і для електровозу у випадку наявності одного поїзда на фідерній зоні і пуску електровоза на «С»-з'єднанні тягових двигунів, оскільки кидки струму електровоза не перевищують 660 А, а фідерні струми – 500 А, але при цьому виділяється теплоти 7279 $А^2$·с, якої достатньо для пошкодження поверхні контакту контактний провід - накладка полозу струмоприймача;

– у режимі електровозу на «СП»-з'єднанні при тривалості зняття напруги 0,5…1,5 с і відстані електровоза до тягової підстанції 10…2 км можливе виникнення електричної дуги між струмоприймачем і контактним проводом з протіканням через неї від 466 до 1113 А·с, що може спричинити перепал контактного проводу при одночасному спрацюванні швидкодіючого вимикача електровозу, оскільки кидки його струму досягають 3000…3450 А (кидки струму фідера – 2300 А);

– запропонований в дисертації метод вмикання паралельно обмотці збудження тягового двигуна ємнісного накопичувача дозволяє у 5,3 рази зменшити максимальні значення кидків струму електровоза.

13. Розроблений вперше в дисертації метод селективного визначення електротягової підсистеми з коротким замиканням (тягова мережа чи електрорухомий склад), так званий метод «залишкової напруги», дозволив створити сучасний інформаційно-діагностичний комплекс, який підвищує ефективність роботи системи електричної тяги за рахунок швидкого визначення місця аварійного режиму.

14. Удосконалений спосіб захисту фідерів тягової мережі за приростом струму разом з розробленою новою в роботі методикою вибору уставки, що базується на використанні оптимальної захисної характеристики $\Delta I(I)$, дозволяють отримати високочутливі, селективні і гнучкі системи захисту, параметри яких легко налаштовуються під умови кожного конкретного фідера з його типовими ситуаціями; час реакції алгоритму цієї системи складає від 1,2 до 1,28 мс.

15. Вперше теоретично обґрунтовано, що ознаками перехідного процесу вимикання швидкодіючих вимикачів, на основі яких можливо встановлення, було перевантаження тягової мережі чи коротке замикання в ній є: максимальне значення напруги на швидкодіючому вимикачі тягової підстанції $U_{\text{д max}}$ безпосередньо після його вимикання та тривалість цього вимикання $t_{\text{вим}}$; при перевантаженні $U_{\text{д max}}$ і $t_{\text{вим}}$ менші, ніж при короткому замиканні.

16. Результати роботи прийняті до впровадження на підприємствах Придніпровської та Донецької залізниць. Передбачуваний середньорічний економічний ефект від комплексного впровадження запропонованих засобів підвищення ефективності роботи системи електричної тяги при аварійних режимах, наприклад, на ДП «Придніпровська залізниця» складе близько 2,6 млн. грн.

ЛІТЕРАТУРА

1. Корниенко, В. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. Аналитический обзор [Текст] / В. В. Корниенко, А.В. Котельников, В.Т. Доманский. – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с.

2. Данильченко, В. І. Розвиток господарства електропостачання Укрзалізниці на період до 2020 року [Текст] / В. І. Данильченко, І. І. Лагута, В. О. Фітін // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Электрификация железнодорожного транспорта», «Трансэлектро-2010», – Днепропетровск, 2011. – С. 61-68.

3. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2005 році [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2006. – 226 с.

4. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2007 році [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2008. – 197 с.

5. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2008 році [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2009. – 243 с.

6. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2009 році [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2010. – 226 с.

7. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2010 році [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2011. – 269 с.

8. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2011 році [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2012. – 323 с.

9. Сердинов, С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог [Текст] / С. М. Сердинов.– М.: Транспорт, 1985. – 301 с.

10. Корниенко, В. В. Тенденции развития хозяйства электрификации и электроснабжения железных дорог [Текст] / В. В. Корниенко // Материалы первого международного симпозиума «Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движениена железнодорожном транспорте». – С-П., 2001. – С. 41-45.

11. Корниенко, В. В. Комплексная диагностика устройств электроснабжения [Текст] / В. В. Корниенко, С. Я. Карпенко, В. Т. Доманский, С. В. Попкович // Залізничний транспорт України. – 2006. – № 1. – С. 7-8.

12. Кучма, К. Г. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети [Текст] / К. Г. Кучма, Г. Г. Марквардт, В. Н. Пупынин.– М.: Трансжелдориздат, 1960. – 303 с.

13. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст]/ К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

14. Фигурнов, Е. П. Релейная защита [Текст] / Е. П. Фигурнов. – К.: Транспорт Украины, 2004. – 565 с.

15. Векслер, М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания [Текст] / М. И. Векслер. – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.

16. Радченко, В. Д. Перенапряжения и токи короткого замыкания в устройствах электрифицированных железных дорог постоянного тока [Текст] / В. Д. Радченко, С. Д. Соколов, Н. Д. Сухопрудский. – М.: Трансжелдориздат, 1959. – 328 с.

17. Пупынин, В. Н. Защита и отключение тяговых сетей в аварийных режимах: диссертация доктора технических наук [Текст] / В. Н. Пупынин.– М.: МИИТ, 1986. –340 с.

18. Косарев, Б. И. Исследование условий электробезопасности обслуживания рельсовых путей и соединенных с ними устройств при нестационарных процессах в тяговых сетях магистральных железных дорог: диссертация доктора технических наук [Текст] / Б. И. Косарев.– М.: МИИТ, 1974. – 326 с.

19. Гречишников, В. А. Разработка многопараметрической микропроцессорной защиты фидеров тяговой сети постоянного тока 3,3 кВ с использованием методов математического моделирования и натурного эксперимента: диссертация кандидата технических наук [Текст] / В. А. Гречишников.– М.: МИИТ, 2000. –199 с.

20. Бей, Ю. М. Тяговые подстанции [Текст] / Ю. М. Бей, Р. Р. Мамошин, В. Н. Пупынин, М. Г. Шалимов. – М.: Транспорт, 1986. – 319 с.

21. Хариков, В. Ф. Защита контактной сети постоянного тока от коротких замыканий [Текст] / В. Ф. Хариков. – М.: Транспорт, 1987. – 93 с.

22. Saxen, R. Модернизация контактной сети под движение поездов с более высокой скоростью [Текст]/ R. Saxen // Железные дороги мира. – 2000. – №7. – С. 40-43.

23. Biesenack, H. Grundlagen-Kontakt zwischen Fahrdraht und Schleifleiste-Ausgangspunkte zur Bestimmung des elektrischen Verschleisses [Текст] / H. Biesenack, F. Pintscher // Elektrische Bahnen. – 2005. – No3. –S. 138-146

24. Auditeau, G. Usure du fil de contact caténaire: Influence des bandes en carbone pur et en carbone imprégné cuivre [Текст] / G. Auditeau, A. Collina, E. Tanzi // Revue générale des Chemins de Fer Elektrische Bahnen. – 2010. – No200. –S. 9-19

25. Deutzer, M. Beurteilung der Kontaktqualitat zwischen Fahrdraht bzw. Stromschiene und Schleifkontakt mit Hilfe der Thermographieuntersuchung [Текст] / M. Deutzer // Elektrische Bahnen. – 2009. – No3. – S. 128-134

26. Векслер, М. И. Некоторые причины ненадежной работы защиты контактной сети постоянного тока [Текст] / М. И. Векслер // Сб. трудов ВЗИИТа. – 1965. – Вып. 17. – С. 5-28.

27. Пупынин, В. Н. Расчет напряжений, наводимых в проводах, идущих паралельно электрической железной дороге постоянного тока, при переходном процессе короткого замыкания в тяговой сети [Текст] / В. Н. Пупынин // Труды МИИТа.– 1969. – Вып. 302. – С. 168-181.

28. Соколов, С. Д. Исследование внутренних и внешних перенапряжений на тяговых подстанциях [Текст] / С. Д. Соколов // Труды ВНИИЖТа. – 1956. – Вып. 123. – С. 13-55

29. Косарев, Б. И. Влияние поверхностного эффекта в рельсах на переходые процесы в тяговых сетях постоянного тока: диссертация кандидата технических наук [Текст] / Б. И. Косарев. – М.: МИИТ, 1967. – 160 с.

30. Косарев, Б. И. Исследование токов и напряжений переходного режима в тяговых сетях постоянного тока [Текст]/ Б. И. Косарев // Труды МИИТа. – 1965. – Вып. 233. – С. 131-138.

31. Дудин, Б. А. Совершенствование токовых защит тяговых сетей постоянного тока электрифицированных железных дорог: диссертация кандидата технических наук [Текст] / Б. А. Дудин.– М.: МИИТ, 1989. –168 с.

32. Волобринський, С. Д. Расчет тока короткого замыкания в тяговой сети с учетом активного сопротивления питающей сети [Текст] / С. Д. Волобринський // Труды ЛИИЖТа. Энергоснабжение, электрический подвижной состав, энергетика. – 1955. – Вып. 149. – С. 54-72.

33. Анисов, А. Н. Повышение эффективности работы защиты фидеров контактной сети на основе исследования переходных процессов токов короткого замыкания в тяговой сети и на подвижном составе: диссертация кандидата технических наук [Текст] / А. Н. Анисов.– М.: МИИТ, 2000. – 138 с.

34. Котельников, А. В. Учет проводимости земли при расчетах токов короткого замыкания в тяговых сетях постоянного тока [Текст] / А. В. Котельников // Труды ЦНИИ МПС. – 1976. – Вып. 558. – С. 33-37

35. Behrends, D. Catenaries and pantographs in the European high-speed network / D. Behrends, A. Brodkorb, M. Semrau // Elektrische Bahnen. – 1999. – No 10. – S. 333-339

36. Карш, Н. А. Переходные процессы в силовых цепях тяговых двигателях, работающих с ослабленным полем: автореферат диссертации кандидата технических наук [Текст] / Н. А. Карш. – Л.: ЛИИЖТ, 1953. – 18 с.

37. Лозановский, А. Л. Исследование нестационарных токовых режимов в силовых цепях электровозов методом физического моделирования [Текст] / А. Л. Лозановский // Сб. трудов НИИ Электровозостроения. – 1965. – Том 2. – С. 35-59.

38. Лозановский, А. Л. Исследование токовых нестационарных режимов в силовых цепях электровозов методом физического моделирования: автореферат диссертации кандидата технических наук [Текст] / А. Л. Лозановский. – М.: ВНИИЖТ, 1963. – 20 с.

39. Наболдян, Д. Б. Переходные процессы в силовых цепях электровоза постоянного тока с регулируемыми характеристиками при резких колебаниях

напряжения на токоприёмнике: автореферат диссертации кандидата технических наук [Текст] / Д. Б. Набалдян. – Л.: ЛИИЖТ, 1963. – 19 с.

40. Вольф, А. М. Исследование влияния отклонения напряжения в контактной сети от номинальной величины на нагревание тяговых двигателей электровозов постоянного тока: автореферат диссертации кандидата технических наук [Текст] / А. М. Вольф. – М.: ВНИИЖТ, 1963. – 20 с.

41. Медлин, Р. Я. Потенциальные условия на коллекторе тягового двигателя постоянного тока при переходных процессах и некоторые причины возникновения кругового огня: автореферат диссертации кандидата технических наук [Текст] / Р. Я. Медлин. – Омск.: ОМИИТ, 1964. – 19 с.

42. Жиц, М. З. Анализ переходных процессов в машинах постоянного тока [Текст] / М. З. Жиц // Электротехника. –1965. – № 9. – С. 14-16.

43. Жиц, М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока [Текст] / М. З. Жиц. – М.: Энергия, 1974. – 112 с.

44. Логинов, И. Я. Исследование переходных процессов в системах электровозов при толчкообразном изменении напряжения: автореферат диссертации кандидата технических наук [Текст] / И. Я. Логинов. – Ростов-на- Дону: РИИЖТ, 1972. – 19 с.

45. Широченко, Н. Н. Конденсаторные накопители энергии для электроподвижного состава [Текст] / Н. Н. Широченко, Е. Н. Алексеев, И. В. Ванин // Локомотив. – 2008. – № 8. – С. 31-33.

46. Міщенко, Т. М. Підвищення ефективності роботи системи захисту силових кіл електровозів ДЕ 1 на основі досліджень перехідних аварійних електромагнітних процесів: диссертация кандидата технических наук [Текст] / Т. М. Міщенко.– Д.: ДНУЗТ, 2007. –219 с.

47. Соколов, С. Д. Пережог контактного провода открытой дугой [Текст] / С. Д. Соколов // Вестник ВНИИЖТа. – 1962. – № 3. – С. 11-15.

48. Защита от отжигов проводов контактной сети постоянного тока [Текст] / И. О. Набойченко, и другие // Локомотив. – 1996. – № 9. – С. 24-28.

49. Бялонь, А. Система защиты от токов короткого замыкания на землю с групповыми заземлениями опор контактной сети польских железных дорог

[Текст] / А. Бялонь, З. Кульхавик // Вестник ВНИИЖТа. – 2003. – № 1. – С. 43-47.

50. Абрамян, К. Г. Защита контактной сети от токов короткого замыкания: автореферат диссертации кандидата технических наук [Текст] / К. Г. Абрамян.– М.: МИИТ, 1952. –13 с.

51. Пупынин, В. Н. Полная теория работы и характеристик паралельных индуктивных шунтов быстродействующих выключателей типов ВАБ-2, АБ-2/3, АБ-2/4 и реле-диференциальных шунтов выключателей ВАБ-28 [Текст] / В. Н. Пупынин // Труды МИИТа. – 1965. – Вып. 213. – С. 61-85.

52. Беньяш, Ю. Л. Быстродействующая защита от малых токов короткого замыкания [Текст] / Ю. Л. Беньяш // Труды МИИТа. – 1979. – Вып. 626. – С. 76-80.

53. Пупынин, В. Н. Реализация оптимальных защитных характеристик быстродействующего выключателя постоянного тока [Текст] / В. Н. Пупынин // Труды МИИТа. – 1971. – Вып. 380. – С. 26-44.

54. Пупынин, В. Н. Оптимальные защитные характеристики быстродействующего выключателя постоянного тока [Текст] / В. Н. Пупынин // Электротехника. – 1973. – № 1. – С. 35-38.

55. Заторская, А. П. Модернизация защиты фидеров [Текст] / А. П. Заторская // Мир транспорта. – 2007. – № 4. – С. 72-76.

56. Лащевский, И. М. Двухзонная защита контактной сети [Текст] / И. М. Лащевский, Б. М. Яковлев // Электрическая и тепловозная тяга. – 1968. – № 7. – С. 16-17.

57. Савченко, В. А. Совершенствование защиты тяговой сети постоянного тока [Текст] / В. А Савченко, В. Ф. Хариков, Н. Ю. Наумов, Л. Д. Старчекно // Электрификация и энергетическое хозяйство. Обзорная информация. – 1989. – Вып. 6. – 22 с.

58. Данилов, О. А. Реалізація двозонного захисту фідерів тягових підстанцій постійного струму 3,3 кВ на мікропроцессорному комплекті [Текст] / О. А. Данилов, Б. А. Рябокінь // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 2. – С. 41-43.

59. Голев, В. А. Совершенствование защиты тяговых сетей постоянного тока от токов короткого замыкания: автореферат диссертация кандидата технических наук [Текст] / В. А. Голев.– М.: ВНИИЖТ, 1986. – 25 с.

60. Зайцева, Л. А. Защита тяговой сети постоянного параллельного соединения с использованием новых признаков: автореферат диссертации кандидата технических наук [Текст] / Л. А. Зайцева.– М.: ВНИИЖТ, 1991. – 12 с.

61. Niekamp, K. Anlagen ausbaue strategie der DB Energie [Текст] / K. Niekamp // Elektrische Bahnen. –2000. – No10. – S. 347-353.

62. Menuet, J.-P. Panorama des installations existantes et perspectives pour le futur [Текст] / J.-P. Menuet // Revue générale des chemins de fer. –2001. – No4. – pp. 9-14

63. Зимаков, В. А. Надежность защиты от коротких замыканий повышена [Текст] / В. А. Зимаков // Локомотив. – 1995. – № 2. – С. 35-36.

64. Mochinaga, Y. Recent Trend of Power Feeding Technique for Electric Railways. [Текст] / Y. Mochinaga // Quarterly Report of RTRI. –2000. – No4. –P. 144-147

65. Совершенствование электрической тяги постоянного тока железных дорог Украины для скоростного пассажирского движения [Текст] / Н. В. Хворост та ін. // Залізничний транспорт України. – 2008. – № 3. – С. 47-48.

66. Куделька, О. В. Модернизація фідерної автоматики на тяговій підстанції постійного струму [Текст] / О. В. Куделька, В. М. Ляшук // Електрифікація транспорту.– 2011. – № 1. – С. 39-41.

67. Данилов, О. А. Аналіз та порівняння мікропроцесорніх захистів фідерів контактної мережі постійного струму [Текст] / О. А. Данилов, Б. А. Рябокінь // Материалы V Международной научно-практической конференции «Электрификация железнодорожного транспорта», «Трансэлектро-2011», – Днепропетровск, 2011. – С. 27.

68. Данилов, О. А. Розрахунок уставок по швидкості наростання струму для мікропроцесорних захистів ЦЗАФ-3,3 [Текст] / О. А. Данилов, Ю. Э. Кружнова // Матеріали IV Международної науково-практичної конференції

«Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті», – Днепропетровск, 2011. – С. 23-24.

69. Цифровые терминалы для систем электроснабжения железных дорог [Текст]/ В. П. Герасимов и др. // Железные дороги мира. – 2007. – №1. – С. 48-57.

70. Андреев, В. Ю. Отключений тяговых подстанций стало меньше. Опыт Куйбышевской дороги [Текст] / В. Ю. Андреев, А. А. Деревянский, С. А. Серегин // Локомотив. – 2011. – №7. – С. 43-44.

71. Михаліченко, П. Є. Характеристика видів і кількості вимикань швидкодіючої апаратури захисту фідерів 3,3 кВ тягових підстанцій постійного струму [Текст] / П. Є. Михаліченко, В. Г. Дзюман // Залізничний транспорт України. – 2007. – № 5. – С. 90-92.

72. Пупынин, В. Н. Сравнение фидерных выключателей постоянного тока 2×ВАБ-49-3200/3-Л и GERapid 4207 2×4 [Текст] / В. Н. Пупынин, С. Х. Дарчиев // Железные дороги мира. – 2006. – №5. – С. 64-71.

73. Зубенко, В. А. Защита инвертора силового активного фильтра тяговых подстанцый постоянного тока при аварийных режимах в тяговой сети [Текст] / В. А. Зубенко, В. Г. Сыченко // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Силова електроніка та енергоефективність» – 2009. – Ч. 1. – С. 43-47.

74. Данильченко, В. І. Розвиток господарства електропостачання Укрзалізниці на період до 2020 року [Текст] / В. І. Данильченко, І. І. Логута, В. О. Фітін // Материалы IV международной конференции «Электрификация железнодорожного транспорта (Трансэлектро-2010)», Днепропетровск – Мисхор. – 2010, – С. 61-68.

75. Сиченко, В. Г. Наукові основи підвищення електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму залізничного транспорту: диссертация доктора технических наук [Текст] / В. Г. Сиченко.– Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2011. – 516 с.

76. Гультяев, А. В. Визуальное моделирование в среде MATLAB [Текст] / А. В. Гультяев. – СПБ.: Питер, 2000. – 432 с.

77. Шалыгин, А. С. Прикладные методы статистического моделирования [Текст] /А. С. Шалыгин, Ю. И. Палагин. – Л. : Машиностроение, 1986. – 320 с.

78. Марквардт, Г. Г. Модель электрической железной дороги переменного тока [Текст] / Г. Г. Марквардт, Е. Ф. Белов // Сб. трудов ВЗИИТа. – 1969. – Вып. 41. – С. 18-39.

79. Дидух, Ю. И. Модель для исследования переходных процессов в системе энергоснабжения железной дороги постоянного тока [Текст] / Ю. И. Дидух // Сб. трудов ВЗИИТа.– 1971. – Вып. 51. – С. 45-47.

80. Марквардт, Г. Г. Моделирование электровозов постоянного тока в устройстве для восспроизведения нестационарных режимов в системе энергоснабжения электрических железных дорог [Текст] / Г. Г. Марквардт, Р. В. Шиловская, Ю. И. Дидух // Сб. трудов ВЗИИТа.– 1973. – Вып. 65. – С. 5-12.

81. Дидух, Ю. И. Методика определения основных параметров модели электрической железной дороги постоянного тока [Текст] / Ю. И. Дидух // Сб. трудов ВЗИИТа.– 1973. – Вып. 65. – С. 13-31.

82. Дидух, Ю. И. Измерение токов коротких замыканий на моделирующей установке [Текст] / Ю. И. Дидух // Сб. трудов ВЗИИТа.– 1975. – Вып. 74. – С. 45-50.

83. Марквардт, Г. Г. Применение гибридного устройств для расчета системы энергоснабжения электрических железных дорог [Текст] / Г. Г. Марквардт, В. П. Ильяшенко // Сб. трудов ВЗИИТа.– 1976. – Вып. 86. – С. 5-10.

84. Фукс, Н. Л. Аналого-цифровое вичислительное устройство для расчета режимов и параметров устройств єлектроснабжения [Текст] / Н. Л. Фукс, В. Д. Бардушко // Труды ВЗИИТа.– 1981. – Вып. 115. – С. 12-19.

85. Antonacci, G. A. The low impedance short circuit on traction vehicles si ipplied by 3.6 kVdc plants. Experimental findings, numerical simulation aspects ai ad considerations on the evaluations of electromagnetic disturbances. [Текст] / G. A. Antonacci // Inge. gneria Ferroviaria. –1994. – P. 459-474.

86. Dreßler, T. Dynamisches Verbal ten von elektrischen Kenngröpen bei Kurzschltissen in Gleichstrom-Bahnenergiev-ersorgungsnetzen mit rück speisefähigen Fahrzeugen. [Текст] / T. Dreßler, T. Lösel, S. Röhling // Electrie. –1994. – No11/12. – S. 468-474.

87. Dreßler, T. Problems in short circuit detection in DC railway traction networks with regenerative braking motor vehicles [Текст] / T. Dreßler, T. Lösel, S. Röhling. // Elektrische Bahnen. – 1995. – No4. – S. 134-139.

88. Кириевский, Е. В. Моделирование аварийных режимов машин постоянного тока для оценки релейных защит [Текст] / Е. В. Кириевский, Г. Н. Степанов, Г. П. Фоменко // Электричество. – 1976. – №2. – С. 43-47.

89. Gunnar, N. Real-time simulator for the testing of protection equipment. [Текст] / N. Gunnar, L. Wertil. // Power Technology International. –1989. – No7. – S. 111-116.

90. Anailiza pradirw zwarcia w sieci trakcyjnej pradu sta-tego z poiaezeniami. poprzecznymi przy uwzglednenu bocz-nikujaeego wptywu ziemi: [Ref.j 5 Konf. nauk. SEMTRAK'92 «Trakeja elek. Wybr. prob!.», Janowiec, 22 – 24 paidz., 1992 // Monogr. PKRAK. – 1992. – № 137. – С. 75 – 82.

91. Von Lingen, J. Bahn elektro energieversorgung und Eisenbahn betrieb [Текст] / Von Lingen J., Schmidt P. // Elektrische Bahnen. – 1998. – No 1-2. – S. 15-20.

92. Применение вычислительных машин для расчета системы энергоснабжения. Труды ВЗИИТа [Текст] / за ред. Г. Г. Марквардт. – М.: ВЗИИТ, 1969. – 232 с.

93. Андреев, В. В. Вычислительная и микропроцессорная техника в устройствах электрических железных дорог [Текст] / В. В. Андреев, П. Б. Куликов, Г. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1989. – 287 с.

94. Марквардт, Г. Г. Определение числа выбросов токов и напряжений на тяговых подстанциях электрических железных дорог [Текст] / Г. Г. Марквардт // Труды МИИТа.– 1965. – Вып. 213. – С. 4-16.

95. Марквардт, Г. Г. Исходные положения по созданию мтематической модели процесса работы устройств энергоснабжения электрических желез-

ных дорог [Текст] / Г. Г. Марквардт // Труды ВЗИИТа.– 1969. – Вып. 37. – С. 47-52.

96. Марквардт, Г. Г. Методика расчета избыточного тока рекупирации [Текст] / Г. Г. Марквардт // Труды ВЗИИТа.– 1971. – Вып. 51. – С. 30-34.

97. Марквардт, Г. Г. Статистические характеристики напряжения на тяговых подстанциях [Текст] / Г. Г. Марквардт // Труды ВЗИИТа.– 1971. – Вып. 53. – С. 5-19.

98. Марквардт, Г. Г. Определение экспериментальных значений при проэктировании и эксплуатации системы энергоснабжения электрических железных дорог [Текст] / Г. Г. Марквардт, Р. В. Шиловская // Труды ВЗИИТа.– 1975. – Вып. 74. – С. 5-16.

99. Марквардт, Г. Г. Определение тока фидера тяговой подстанции по нагрузке плеча [Текст] / Г. Г. Марквардт, Э. С. Бржозовский// Труды ВЗИИТа. – 1978. – Вып. 96. – С. 13-16.

100. Марквардт, Г. Г. Применение метода наложения для определения средних и среднеквадратичных токов фидеров [Текст] / Г. Г. Марквардт, Э. С. Бржозовский // Труды ВЗИИТа. – 1980. – Вып. 107. – С. 17-23.

101. Марквардт, Г. Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системах энергоснабжения [Текст] / Г. Г. Марквардт.– М.: Транспорт, 1972. – 223 с.

102. Марквардт, Г. Г. Метод производства тяговых расчетов на ЄВМ с учетом изменяющегося напряжения на токоприемнике электровоза [Текст] / Г. Г. Марквардт, Г. И. Гатальский // Труды ВЗИИТа. – 1975. – Вып. 74. – С. 59-63.

103. Соколов, С. Д. Повышение надежности преобразовательных агрегатовтяговых подстанций [Текст] / С. Д. Соколов // Труды ВНИИЖТа.– 1965. – Вып. 209. – 182 с.

104. Дудин, Б. А. Совершенствование токовых защит тяговой сети постоянного тока электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. А. Дудин.– М.: МИИТ, 1989. – 168 с.

105. Моченов, И. Г. Переходные процессы при регулировании напряжения [Текст] / И. Г. Моченов // Труды ВНИИЖТа. – 1961. – Вып. 206. – С. 4-33.

106. Кручинин, В. П. Разработка и исследование защиты контактной сети постоянного тока: автореферат диссертация кандидата технических наук [Текст] / В. П. Кручинин. – Растов-на-Дону: РИИЖТ, 1970. – 25 с.

107. Пупынин, В. Н. Синтез схемы замещения тяговой сети постоянного тока в переходном режиме по ее частотной характеристике [Текст] / В. Н. Пупынин // Труды МИИТа. – 1970. – Вып. 340. – С. 113-125.

108. Осанов, Т. К. Схема замещения тяговой сети постоянного тока в переходном режиме [Текст] / Т. К. Осанов // Труды МИИТа. – 1977. – Вып. 574. – С. 66-76.

109. Семенчук, В. П. Амплутудно-частотная харакетристика как инструмент расчета влияния системы электроснабжения постоянного тока на смежные каналы связи [Текст] / В. П. Семенчук // Труды МИИТа. – 1978. – Вып. 604. – С. 146-153.

110. Смирнов, Д. Б. Совершенствование методики расчета распределенной системы тягового электроснабжения: автореферат диссертация кандидата технических наук [Текст] / Д. Б. Смирнов.– С-П.: ПГУПС, 2010. –18 с.

111. Сербиненко, Д. В. Качество єлектрической єнергии и степень взаимного влияния тяговых подстанций железных дорог постоянного тока и системы внешнего электроснабжения: автореферат диссертация кандидата технических наук [Текст] / Д. В. Сербиненко.– М.: ВНИИЖТ, 2003. – 24 с.

112. Щуров, Н. И. Электромагнитная совместимость электроподвижного состава железнодорожного транспорта [Текст] / Н. И. Щуров, Филиппов В. Б. // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 35-40.

113. Лагута, И. И. Моделирование системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока [Текст]/ И. И. Лагута, Ю. П. Ганчаров, В. В. Замаруев, А. В. Лобко, Н. В. Панасенко, В. В. Божко, В. Н. Козачок // Тезисы научно-технической конференции «Трансэлектро-2010». – 2010. – С. 97.

114. Рябоконь, Б. А. Моделювання роботи розрядного пристрою тягової підстанції постійного струму [Текст]/ Б. А. Рябоконь, В. А. Зубенко, З. В. Голик // Тезисы научно-технической конференции «Трансэлектро-2010». – 2010. – С. 106-107.

115. Сиченко, В. Г. Моделювання процесу відриву струмоприймача [Текст] / В. Г. Сиченко, О. В. Крупка, В. Л. Ларюшкін // Тезисы научно-технической конференции «Трансэлектро-2010». – 2010. – С. 115-116.

116. Моделювання системи тягового електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами залізниць постійного струму [Текст]/ І. І. Лагута та ін. // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2011. – Ч. 2. – С. 258-264.

117. Лукьянов, П. Ю. Модели энергозбережения в контактной сети и рельсовых цепях [Текст] / П. Ю. Лукьянов // Мир транспорта. – 2003. – № 6. – С. 32-36.

118. Лукьянов, П. Ю. Математические модели рельсовых цепей и контактной сети [Текст] / П. Ю. Лукьянов, А. Г. Машкин // Мир транспорта. – 2003. – № 7. – С. 16-21.

119. Гаврилюк, В. І. Аналіз електромагнітного впливу тягового електропостачання на роботу рейкових кіл і моделювання протікання тягового струму в рейках [Текст] / В. І. Гаврилюк // Вісник ДНУЗТ – 2003. – Вип. 1. – С. 6-10.

120. Гаврилюк, В. І. Аналіз впливу тягового електропостачання на роботу рейкових кіл [Текст] / В. І. Гаврилюк, А. В. Завгородній // Залізнични транспорт України – 2005. – № 2. – С. 37-39.

121. Гаврилюк, В. І. Електромагнітний вплив тягових мереж на рейкові кола. Частина 1. Моделювання тягового кола в рейковій лінії [Текст] / В. І. Гаврилюк, А. В. Завгородній // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – 2007. – № 4. – С. 53-57.

122. Сердюк, Т. Н. Взаимодействие системы тягового электроснабжения постоянного тока рельсовыми цепями [Текст] / Т. Н. Сердюк, В. І. Гаврилюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – 2007. – № 4. – С. 108-112.

123. Пузанов, Н. Я. Расчёт системы энергоснабжения на ЭЦВМ с учётом влияния уровня напряжения в тяговой сети на работу электрического подвижного состава. [Текст] / Н. Я. Пузанов // Труды ВНИИЖТа. – 1967. – Вып. 338. – С. 38-59.

124. Рамлов, В. А. Аналоговое моделирование процессов в силовой схеме электровоза ЧС 2 при переключении группового аппарата [Текст] / В. А. Рамлов, В. В. Привалов // Труды ВНИИЖТа. – 1971. – Вып. 153. – С. 119-129.

125. Рунов, Ю. А. Исследование электромагнитных переходных процессов в тяговых двигателях электроподвижного состава [Текст] / Ю. А. Рунов // Труды ЦНИИ МПС. Повышение надёжности и совершенствование ремонта электровоза. –1974. – Вып. 516. – С.79-92.

126. Математическое моделирование динами электровозов [Текст] / под ред. А. Г. Никитенко. – М.: Высшая школа, 1998. – 274 с.

127. Кедря, М. М. Математическая модель тягового привода постоянного тока [Текст] / М. М. Кедря, И. В. Чумак // Вісник ДНУЗТ – 2004. – Вип. 4. – С. 39-43.

128. Баранов, В. А. Улучшение тяговых свойств электровозов постоянного тока [Текст] / В. А. Баранов // Вестник ВНИИЖТа. – 2008. – Вып. 6. – С. 29-32.

129. Баранов, В. А. Математическое моделирование єлектромагнитных процессов в силовой цепи электровоза постоянного тока при последовательно-независимом возбуждении тяговых двигателей [Текст] / В. А. Баранов // Вестник ВНИИЖТа. – 2009. – Вып. 2. – С. 43-47.

130. Сиченко, В. Г. Моделювання електротягового навантаження у задачах електомагнітної сумісності електрифікованих залізниць постійного струму [Текст] / В. Г. Сиченко, Є. М. Гайсьонок // Технічна електродинаміка. Тематичний Вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 2 – С. 185-188.

131. Босий, Д. О. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем

електропостачання електричного транспорту змінного струму [Текст] / Д. О. Босий, В. Г. Сиченко // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2009. – Ч. 4. – С. 86-89.

132. Мищенко, Т. Н. Математическая модель системы «тяговая сеть – электровоз». Режим холостого хода тягового трансформатора [Текст] / Т. Н. Мищенко // Тезисы научно-технической конференции «Трансэлектро-2010». – 2010. – С. 100-101.

133. Міщенко, Т. М. Математичне моделювання перехідних процесів в системі змінного струму «тягова мережа – електровоз». 1. Вмикання силового трансформатора електровоза в режимі холостого ходу [Текст] / Т. М. Міщенко // Вісник ДНУЗТ. – 2011. – Вип.36. – С. 100-101.

134. Poetsch, G. Simulation der Wechselwirkung zwischen Stromabnehmer und Oberleitung [Текст] / G. Poetsch, W. Baldauf, T. Schulze // Elektrische Bahnen. – 2001. – No9. – S. 386-392.

135. Brunner, C. U. Simulation of energy consumption for tractive and passenger transport rolling stock [Текст] / C. U. Brunner, T. Pelli // Elektrische Bahnen. – 1998. – No8. – S. 346-354.

136. Kontcha, A. Gleis-Erde-Spannungen und Elektrosicherheit im Bereich von Hochleistungs-Gleichstrombahnen [Текст] / A. Kontcha, P. Schmidt // Der Eisenbahningenieur. – 2000. – No2. – S. 44-50.

137. «Правила технічної експлуатації залізниць України», затверджені наказом Міністерства транспорту України від 20.12.96 №411, зареєстрованим у Міністерстві юстиції України 25.02.97 за №350/1854.

138. «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів», затверджені наказом Міністерства палива та енергетики України від 25.07.2006 №258, зареєстрованим у Міністерстві юстиції України 25.10.06 за №1143/13017.

139. НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів», затверджені наказом Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 09.01.98 № 4, зареєстровані в Міністерстві юстиції України 10.02.98 за N 93/2533.

140. ПУЭ «Правила устройств електроустановок». Шестое издание, М: Энергоатомиздат, 1985", затверджені Міністерством енергетики та електрифікації СРСР 04.07.84.

141. ЦЕ-0009 «Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України», затверджені наказом Укрзалізниці від 24.12.2004 №1010-ЦЗ.

142. ЦЕ-0020 «Інструкція з оперативного обслуговування тягових підстанцій електрифікованих залізниць» затверджена наказом Укрзалізниці 03.10.2007 №469-Ц.

143. ДНАОП 5.1.11-1.48-00 «Правила безпеки для працівників залізничного транспорту на електрифікованих лініях», затверджені наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 31.05.2000 №120 та зареєстровані в Міністерстві юстиції України 08.06.2000 за №340/4561

144. ЦЕ-0005 «Інструкція енергодиспетчеру залізниць України», затверджена наказом Укрзалізниці від 31.10.2002 №46-ЦЗ.

145. ЦЕ/4173 «Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах», затверджена Міністерством шляхів сполучення СРСР 16.12.83.

146. Борц, Ю. А. Контактная сеть.: Иллюстрированное пособие [Текст] / Ю. А. Борц, В. Е. Чекулаев – М.: Транспорт, 1981. – 223 с.

147. ЦЭ–4816 «Инструкции по технике безопасности для єлектромонтеров контактной сети››.

148. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правила технической безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей [Текст] – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.

149. Суханов, Е. В. Цифровой запоминающий осциллограф АСК-3106 [Текст] / Е. В. Суханов // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2008. – №1. – С. 22-26.

150. Справка программы OcilloscopePro. Руководство по эксплуатации. [Текст]. – М.: Актаком, 2009. – 115 с.

151. Дьяканов, В. П. Maple 9,5/10 в математике, физике, образовании [Текст] / В. П. Дьяканов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2006. – 720 с.

152. Михаліченко, П. Є. Застосування пакету MATLAB/Simulink для комп'ютерного моделювання перехідних аварійних режимів в системі тягового електропостачання залізниць України [Текст] / П. Є. Михаліченко // Технічна електродинаміка. Тематичний Вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2011. – Ч. 2 – С. 210-214.

153. Дьяканов, В. П. MATLAB 6.5 SP1/7.0 + SIMULINK 5/6. Основы применения [Текст] / В. П. Дьяканов. – М.: Солон-пресс, 2005. – 800 с.

154. Саенко, Ю. Л. Имитационное моделирование процеса потребления реактивной мощности вентильними преобразователями в бреде MATLAB [Текст]/ Ю. Л. Саенко// Сб. научн. тр. Вестник Приазовського госуниверситета. – 2002. – № 12. – С. 202-206.

155. Михаліченко, П. Є. Особливості визначення початкових умов при моделюванні електромагнітних процесів системи електричної тяги постійного струму [Текст] / П. Є. Михаліченко, Т. В. Михаліченко // Материалы V Международной научно-практической конференции «Электрификация железнодорожного транспорта», «Трансэлектро-2011», – Днепропетровск, 2011. – С. 51-52.

156. Михаліченко, П. Є. Результати експериментальних досліджень режимів короткого замикання у тяговій мережі постійного струму [Текст] / П. Є. Михаліченко // Вісник ДНУЗТ. – 2012. – Вип. 2(41). – С. 81-85.

157. Михаліченко, П. Є. Порівняльна характеристика швидкодіючих вимикачів тягових підстанцій системи електричної тяги постійного струму [Текст] / П. Є. Михаліченко, М. О. Костін // Залізничний транспорт України – 2011. – № 5 – С. 40-42.

158. Корниенко, Д.В. Создание быстродействующего аппарата защиты для электрооборудования постоянного тока [Текст] / Д. В. Корниенко, А. Л. Худояров// «Электрификация, инновационные технологи, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте» Материалы V Международного симпозиума. – С-П., 2010. –С. 184-190.

159. «Про застосування нових типів швидкодіючих вимикачів на фідерах контактної мережі тягових підстанцій постійного струму 3 кВ» № ЦЕТ-3-10 від 03.06.2010 р.

160. «О защите контактной сети и предупреждении ее пережогов на участках постоянного тока» № П-160/86 від 4.09.1986 р.

161. Основы теории цепей [Текст] / за ред. Зевеке Г.В.– М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

162. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки [Текст] / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна – Д.: Видавництво ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна, 2007. – Т. 2. – 368 с.

163. Харкевич, А. А. Спектры и анализ [Текст] / А. А.Харкевич. – М.: Гос. изд. физ-мат. лит., 1962. – 236 с.

164. Page, C. H. Instantaneous power spectra [Текст] / C. H. Page. // J.Apple. phys – 1952. – P. 103-106.

165. Михаліченко, П. Є. Розвиток теорії спектрів та її адаптація до задач аналізу перехідних аварійних режимів роботи систем електричної тяги [Текст] / П. Є. Михаліченко, М. О. Костін // Вісник ДНУЗТ. – 2012. – Вип. 40. – С. 87-89.

166. Петров, А.В. Методи спектрального аналізу випадкових коливань напруги та струму фідера тягової підстанції постійного струму [Текст] / А.В. Петров // Вісник ДНУЗТ. – 2010. – Вип. 34. – С.52-56.

167. Саблин, О. И. Спектральный анализ случайных функций тягового тока и напряжения на токоприемнике электроподвижного состава [Текст] / О. И. Саблин // Вісник ДНУЗТ. – 2007. – Вип. 15. – С. 41-47.

168. Разанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) [Текст] / Ю. К. Разанов, М. В. Рябчицкий // Электротехника. – 1998. – Вип. 3. – С. 10-17.

169. Михаліченко, П. Є. Спектральний аналіз перехідних електричних величин системи тягового електропостачання постійного струму в аварійних режимах її роботи [Текст] / П. Є. Михаліченко // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2011, – Вип. 3(25). – С. 46-51.

170. Костін, М. О. Гармонійний склад фідерних напруг та струмів при аварійних режимах тягової мережі [Текст] / М. О. Костін, П. Є. Михаліченко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи – 2011, – № 4. – С. 85-90

171. Михаліченко, П. Є. Гармонійний склад фідерних струмів при аварійних вимиканнях швидкодіючими вимикачами різних типів [Текст] / П. Є. Михаліченко // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорту – 2011, – Вип. 2. – С. 27-32.

172. Костін, М. О. Гармонійний склад фідерних напруг та струмів при аварійних режимах тягової мережі [Текст] / М. О. Костін, П. Є. Михаліченко // Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика». – Кременчуг, 2011, – Вип. 1(1). – С. 164-165.

173. Гумен, М. Б. Основи теорії електричних кіл. Аналіз лінійних електричних кіл частотна область [Текст] / М. Б. Гумен, А. М. Гуржій, В. М. Співак – К.: Вища школа, 2004. – Кн. 2. – 358 с.

174. Маевский, О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей [Текст] / О. А. Маевский – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

175. Зиновьев, Г. С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей [Текст] / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск: изд-во Новосиб. ун-та, 1990. – 220 с.

176. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроенергии и их контроль на промышленых предприятиях [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко – М.: Энергогатомиздат, 2000. – 252 с.

177. Жежеленко, И. В. Вопросы качества электроенргиии в электроустановках [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – 173 с.

178. Михаліченко, П. Є. Методи визначення енергетичних показників системи електричної тяги в перехідних режимах її роботи. 1. Теоретичне обґрунтування [Текст] / П. Є. Михаліченко, М. О. Костін // Вісник ДНУЗТ – 2011. – Вип. 38. – С. 99-104.

179. Михаліченко, П. Є. Методи визначення енергетичних показників системи електричної тяги в перехідних режимах їх роботи [Текст] / П. Є. Михаліченко // Тези доповідей 71 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвиткузалізничного транспорту», - Дніпропетровськ, 2011. – С. 115.

180. Михаліченко, П. Є. Показники якості електроенергії та енергетичні характеристики систем електричної тяги в перехідних режимах [Текст] / П. Є. Михаліченко // Гірнича електромеханіка та автоматика – 2011, – Вип. 86 – С. 30-35.

181. Жежеленко, И. В. Учет нагрузок в расчетах несинусоидальных режимов систем электроснабжения [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко // Сб. научн. тр. Вестник Приазовського госуниверситета. – 1998. – № 6. – С. 268-273.

182. Костін, М. О. Зниження непродуктивних втрат електроенергії – найважливіша задача підвищення ефективності електроспоживання системами електричної тяги [Текст] / М. О. Костін, П. Є. Михаліченко, А. В. Петров // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 2. – С. 43-44.

183. Fryse, S. Wirk – Blind – und Scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nichtsinusformigen Verfaf von Strom und Spannung // Elektrotechn. Z. – 1932. – 25. – S. 596-599;V.26. – S. 625-627;V. – S. 700-702.

184. Денисюк, С. П. Оцінка точності вимірювання складових електроенергії в системах з перетворювачами електроенергії [Текст] / С. П. Денисюк, В. О. Кравцов // Технічна електродинаміка. Тематичний Вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – ч. 1. – С. 61-66.

185. Компенсация неактивных составляющих полной мощности в цепях несинусоидального тока и напряжения [Текст] / В. Е. Тонкаль и др. // Технічна електродинаміка. – 1989. – № 5. – С. 26-29.

186. Денисюк, С. П. Реактивная мощность как критерий оценкипотерь при передаче электроэнергии [Текст] / С. П. Денисюк, Ю. А. Яценко // Силовые полупроводниковые преобразователи и электрооборудование для энергосберигающих технологий. – 1988. – С. 173-177.

187. Костін, М. О. Методи визначення потужностей в системах зі стохастичними електроенергетичними системами [Текст] / М. О. Костін // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Проблеми сучасної електротехніки» – 2006. – Ч. 6. – С. 3-8.

188. Костин, Н. А. Методы определения составляющих полной мощности в системах электрической тяги [Текст] / Н. А. Костин, А. В. Петров // Технічна електродинаміка. – 2011. – Вип. 5. – С. 39-43.

189. Хворост, М. В. Моделювання режимів роботи силових схем електронних трансформаторів постійної напруги для пунктів живлення тягової мережі метрополітенів [Текст] / М. В. Хворост // Вестник НТУ «ХПИ», «Проблемы автоматезированого электропривода. Теория и практика». – 2008. – Вып. 30. – С. 385-386.

190. Пивняк, Г. Г. Оптимизация тягового преобразователя частоты [Текст] / Г. Г. Пивняк, С. И. Выпанасенко // Техническая электродинамика. – 1985. – № 1. – С. 29-33.

191. Пивняк, Г. Г. Повышение энергетических показателей тяговых преобразователей частоты [Текст] / Г. Г. Пивняк, С. И. Выпанасенко // Электротехника. – 1985. – № 5. – С. 34-35.

192. Прохорский, А. А. Тяговые и трансформаторные подстанции [Текст] / А. А. Прохорский. – М.: Транспорт, 1983. – 496 с.

193. ГОСТ 2585-81. Выключатели автоматические быстродействующие постоянного тока. Общие технические условия [Текст]. – М.: Госстандарт, 1981. – 29 с.

194. Михаліченко, П. Є. Математичне моделювання перехідних аварійних електромагнітних процесів в системі електричної тяги постійного струму [Текст]/ П. Є. Михаліченко, М. О. Костін // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 2. – С. 31-35

195. Черных, И. В. Simulink среда создания инженерных приложений [Текст]/ И. В. Черных. – М.: Диалог-Мифи, 2004. – 491 с.

196. Сиченко, В. Г. Оцінка функціонування пасивних згладжуючи фільтрів тягових підстанцій [Текст] / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко // Вісник ДНУЗТ. – 2008. – Вип. 25. – С. 63-68.

197. Щербак, Я. В. Анализ эффективности работи пассивных энергетическифильтровтяговых подстанций постоянного тока [Текст] / Я. В. Щербак, И. В. Слободчиков // Інформаціно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. – № 6. – С. 27-31.

198. Hofmann, G. AC-bahn ruckleitungs systeme-booster transformatoren auf AC-Bahnen [Текст] / G. Hofmann, A. Kontcha // Elektrische Bahnen. – 2000. – No 3. – S. 95-99.

199. Кузнецов, С. М. Экспериментальные исследования переходных процессов при отсутствии заземления опор на рельсы [Текст] / С. М. Кузнецов, С. Д. Соколов // ЦНИИ МПС. – 1976. – Вып. 319 – С. 15-20.

200. Плешаков, Ю. В. О защите тяговой сети постоянного тока при отказе от заземлений опор на рельсы [Текст] / Ю. В. Плешаков, А. Н. Захаров // Сб. науч. трудов ЛИИЖТа. – 1968. – Вып. 77. – С. 35-38.

201. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. –М.: Наука, 1984. – 832 с.

202. Анго, А. Справочник для электро и радио инженеров [Текст] / Андре Анго – М.: Наука, 1967. – 650 с.

203. Костин, Н. А. Математическое моделирование переходных аварийных електромагнитных процессов в системе электрической тяги постоянного тока. 1. Короткое замыкание без тяговой нагрузки [Текст] / Н. А. Костин, П. Е. Михаліченко // Вісник ДНУЗТ. – 2007. – Вип. 17. – С. 66-71.

204. Кузнецов, С. М. Защита тяговой сети от токов короткого замыкания [Текст] / С. М. Кузнецов. – Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2000. - 75 с.

205. Быков, Е. И. Тяговые сети метрополитенов [Текст] / Е. И. Быков, Б. В. Панин, В. Н. Пупынин. –М.: Транспорт, 1987.- 330 с.

206. Косарев, Б. И. Расчет первичных параметров тяговой сети в протяжённых тоннелях [Текст] / Б. И. Косарев, Г. М. Косолапов, А. И. Кушнир // Вестник ВНИИЖТа. – 1982. – № 1. – С. 15-18.

207. Palecek, J. Me sverfahren fuer den Ableitungsbelag bei oberirdisehen [Текст] / J. Palecek, L. Ivanek, C. Henzl // Elektrische Bahnen. – 1999. – No 7. –S. 244-246.

208. Михаліченко, П. Є. Вплив пасивних фільтрів на електромагнітний стан в режимі короткого замикання в системі тягового електропостачання постійного струму [Текст] / П. Є. Михаліченко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 2 – С. 195-200.

209. Лозановский, А. Л. Исследование токовых нестационарных режимов в силовых цепях электровозов методом физического моделирования: дисертация кандидата технических наук [Текст] / А. Л. Лозановский. – Новочеркаск: НИИ «Электровозостороение», 1963. – 213 с.

210. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники [Текст] / Г. И. Атабеков. – М.-Л.: Энергия, 1964. – Ч. 1. – 312 с.

211. Туник, В. Ф. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах з зосередженими параметрами. Класичний, операторний методи і метод інтеграла Дюамеля [Текст] / В. Ф. Туник. – Д.: ДНУЗТ, 2002. – 90 с.

212. Демирчан, К. С. Теоретические основы электротехники [Текст] / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2004. – Том 2. – 576 с.

213. Овчиніков, П. П. Вища математика [Текст] / П. П. Овчиніков, В. М. Михайленко – К.: Техніка, 2004. – Ч. 2. – 792 с.

214. ЦЕ-0024. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць [Текст]. – К.: Укразалізниця, 2008. – 125 с.

215. ЦЕ-0023. Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць [Текст]. – К.: Укразалізниця, 2008. – 207 с.

216. Михаліченко, П. Є. Особливості чисельного розрахунку під час моделювання системи електричної тяги в аварійних режимах [Текст] / П. Є. Михаліченко // Материалы V Международной научно-практической конференции «Электрификация железнодорожного транспорта», «Трансэлектро-2011», – Днепропетровск, 2011. – С. 47-48.

217. Михаліченко, П. Є. Порівняння режиму короткого замикання в системі електричної тяги постійного струму з різними схемами живлення фідерної зони [Текст] / П. Є. Михаліченко // Вісник ДНУЗТ. – 2012. – Вип. 42. – С. 110-116.

218. Kostin, N. Mathematical modelling of transitional emergency processes in traction power networks of railway transport [Текст] / N. Kostin, T. Mishchenko, O. Reutskova, P. Mikhalichenko // 12th International Workshop «Computational Problems of Electrical Engineering», Kostryno, Trans-Carpathian region, Ukraine. – 2011. – P. 41.

219. Костін, М. О. Релейний мікропроцесорний захист системи тягового електропостачання, оснований на новому ознаку. 1. Теорія роботи. [Текст] / М. О. Костін, П. Є. Михаліченко // Вісник ДНУЗТ. – 2011. – Вип. 37. – С. 84-88.

220. Експериментальні та теоретичні дослідження аварійних електричних режимів роботи тягової мережі системи електропостачання постійного струму: звіт з НДР [Текст], № д/р 0110U006289. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна. – 2011. – 185 с.

221. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 29 с.

222. Мищенко, Т. Н. Вероятностные характеристики случайной функции напряжения на токоприемнике первого украинского электровоза ДЭ1 [Текст] / Т. Н. Мищенко, П. Е. Михаличенко, Н. А. Костин // Электротехника и Электромеханика. – 2003. – № 2. – С. 43-45.

223. Данилов, О. А. Розробка алгоритму мікропроцесорного захисту по швидкості зростання струму [Текст] / О. А. Данилов, Б. А. Рябокінь // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Электрификация железнодорожного транспорта», «Трансэлектро-2012», – Днепропетровск, 2012. – С. 17.

224. Михаліченко, П. Є. Релейний мікропроцесорний захист системи тягового електропостачання, оснований на новій ознаці. 2. Схемне рішення [Текст] / П. Є. Михаліченко, М. О. Костін // Електрифікація транспорту. – 2011. – Вип. 1. – С. 57-63.

225. Михаліченко, П. Є. Математичне моделювання перехідних аварійних електромагнітних процесів в системі електричної тяги постійного струму. 2. Коротке замикання з електрорухомим складом [Текст] / П. Є. Михаліченко // Вісник ДНУЗТ. – 2010. – Вип. 32. – С. 175-179.

226. Электродвигатели постоянного тока тяговые ЭД 141У1, ЭД 141АУ1. Технические условия. БИЛТ 652341.002 ТУ, Харьков: ГП завод «Электротяжмаш», 1994 –12 с.

227. Протокол испытаний. Квалификационные испытания тягового электродвигателя типа ЭД 141У1 для магистрального [Текст] – Харьков: НИИ «Электротяжмаш», 1996 – 89 с.

228. Электровоз магистральный ДЭ1. Руководство по експлуатации 3ТП.000.020 РЭ1 [Текст]. – Д.: УЭлНИИ. – ч.1. 2002. – 321 с.

229. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги: монография [Текст] / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. Т. 2 – 364 с.

230. Электровоз 2ЭС4К. Руководство по эксплуатации. Описание и работа. Электрические схемы. ИДМБ.661141.004РЭ1 (3ТС.000.003 РЭ1) [Текст]. – Новочеркаск.: НЕВЗ, 2006., книга 1. – 136 с.

231. Электровоз 2ЭС4К. Руководство по эксплуатации. Описание и работа. Электрические машины. ИДМБ.661141.004РЭ3 (3ТС.000.003 РЭ3) [Текст]. – Новочеркаск.: НЕВЗ, 2006., книга 3. – 42 с.

232. Электровоз 2ЭС4К. Руководство по эксплуатации. Описание и работа. Электрические аппараты и оборудование. ИДМБ.661141.004РЭ4 (3ТС.000.003 РЭ4) [Текст]. – Новочеркасск.: НЕВЗ, 2006., книга 4. – 191 с.

233. Двигатель тияговый типа ДТК-800 КЭ У1 для электровоза ЭП2К. Руководство по експлуатации ОБС.461.017 РЭ [Текст]. – Новочеркасск.: НЕВЗ, 2005. –89 с.

234. Протокол квалификационных испытаний тягового электродвигателя типа ДТК-800А [Текст] – Смела: НИИ «Электротяжмаш», 2006 – 33 с.

235. Раков, В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог советского союза. 1956-1965 [Текст] / В.А. Раков – М.: Траноспорт, 1966. – 248 с.

236. Раков, В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог советского союза. 1966-1975 [Текст] / В.А. Раков – М.: Траноспорт, 1979. – 212 с.

237. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизельпоездам [Текст] / под ред. А. И. Тищенко – М.: Траноспорт, 1976. Т. 1. – 432 с.

238. Элекровозы ВЛ10 и ВЛ10у. Руководство поэксплуатации [Текст] / под ред. О. А. Кикнадзе. – М.: Траноспорт, 1976. – 519 с.

239. Элекровоз ВЛ8. Руководство поэксплуатации [Текст]. – М.: Траноспорт, 1982. – 320 с.

240. Находкин, М. Д. Тяговые двигатели типов ДПЭ-400 и НБ-406А [Текст] / М. Д. Находкин. – М.: Трансжелдориздат, 1960. – 147 с.

241. Иоффе, А. Б. Тяговые электрические машины [Текст] / А. Б. Иоффе. – М.: Энергия, 1965. – 232 с.

242. Карш, Н. А. Расчет нестационарных режимов тягового двигателя при ослабленном поле [Текст] / Н. А. Карш // Труды ЛИИЖТа. Энергоснабжение, электрический подвижной состав, энергетика.–1955. – Вып. 149. – С. 3-18.

243. Михаліченко, П. Є. Генераторні струми електрорухомого складу в аварійних режимах тягової мережі [Текст] / П. Є. Михаліченко // Тези допо-

відей 72 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми розвитку залізничного транспорту». – Днепропетровск, 2012. – С. 96-97.

244. Жиц, М. З. Исследование процесов самовозбуждения сериесных тяговых двигателей на подвижном составе [Текст] / М. З. Жиц // Электричество.– 1953. – № 4. – С. 55-61.

245. Векслер, М. И. Экспериментальные исследования тяговой нагрузки на формирование токов короткого замыкания и работу импульсной защиты питающих фидеров [Текст] / М. И. Векслер // Труды ВЗИИТа. – 1968. – Вып. 30. – С. 49-62

246. Михаліченко, П. Є. Генераторні струми під час коротких замикань в пристроях системи електричної тяги [Текст] / П. Є. Михаліченко // Электротехника и Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 56-60.

247. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт [Текст] / под. ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра, 1990. – 245 с.

248. Хворост, М. В. Аналітична методика розрахунку струмів короткого замикання трифазних тягових асинхронних двигунів у системі частотнорегуюємого електропривода з інверторами напруги [Текст] / М. В. Хворост, В. А. Чумак, Н. М. Панасенко // Праці ІЕД НАН України. – 2004. – № 3(9). – С. 70-78.

249. Саблин, О. И. Повышение эффективности электропотребления электроподвижного состава постоянного тока: дисертація кандидата технічних наук [Текст] / О. И. Саблин. – Д.:2009. – 190 с.

250. Мищенко, Т. Н. Математическое моделирование влияния толчков случайной функции напряжения на токоприёмнике на переходные электромагнитные процессы в электровозе ДЭ 1 [Текст] / Т. Н. Мищенко // Вісник ДНУЗТ. – 2005. – Вип. 9. – С. 61-68.

251. Михаліченко, П. Є. Вплив режиму короткого замикання в тяговій мережі постійного струму на перехідні електромагнітні процеси в електрорухомому складі [Текст] / П. Є. Михаліченко, Т. М. Міщенко, М.О. Костін // Електротехніка і Електромеханіка. – 2010. – № 4. – С. 63-66.

252. Справочник по локомотивам железных дорог советского союза [Текст] / под ред. Е. Н. Боброва.– М.: Трансжелдориздат, 1956. – 236 с.

253. Лозановский, А. Л. Классификация переходных режимов, возникающих в силовых цепях электроподвижного состава [Текст] / А. Л. Лозановский // Электровозостроение. –1965. – Том 6. –С. 79-83.

254. Тихменев, Б. Н. Подвижной состава электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты [Текст] / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.

255. Калинин, В. К. Электровозы и электропоезда [Текст] / В. К. Калинин – М.: Транспорт, 1991. – 480 с.

256. Радченко, В. Д. Высоковольтные апараты защиты постоянного тока [Текст] / В. Д. Радченко, А. В. Фарафанов // Весник ВНИИЖТа. – 1971. – Вип. 448. – 144 с.

257. Рюденберг, Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах [Текст] / Р. Рюденберг – М.: Издательство иностранной литературы, 1959. – 20 с.

258. Саенко, Н. Л. Об условиях перехода коммутационного искрения тягового электродвигателя [Текст] / Н. Л. Саенко // Электровозостроение. –1976. –Том 16. –С. 21-27.

259. Михаліченко, П. Є. Нові принципи побудови системи фідерного захисту та інформаційних систем тягового електропостачання постійного струму [Текст] / П. Є. Михаліченко, М.О. Костін // Залізничний транспорт України. – 2012. – № 1. – С. 57-61.

260. Михаліченко, П. Є. Математичне моделювання «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі електровозів постійного струму [Текст] / П. Є. Михаліченко // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 111-112.

261. Корниенко, В. В. Эксплуатационные показатели и надежность контактных сетей переменного тока железных дорог Украины [Текст] / В. В. Корниенко, И. В. Доманский // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 4. – С. 22-27.

262. Корниенко, В. В. Критерии качества токосъема, определяющие ресурсозбережение [Текст] / В. В. Корниенко, И. В. Доманский // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 5. – С. 18-21.

263. Auditeau, G. Pantographes pour matériels pendulaires [Текст] / G. Auditeau, M. Cabirol // Revue générale des chemins de fer. – 2001. – No4. – P. 79-84.

264. Schmidt, H. Stromabnahme im Hochgeschwindigkeitsverkehr [Текст] / H. Schmidt, A. Schmieder // Elektrische Bahnen. – 2005. – No 4-5. – S. 231 – 236.

265. Ganshorn, R.-D. Light-weight section insulator for overhead contact lines [Текст] / R.-D. Ganshorn, R. Matthes // Elektrische Bahnen. – 2005. – No7. – S. 338-345.

266. Соколов, С. Д. Пережог и перегрев провода в месте контакта с полозом неподвижного пантографа [Текст] / С. Д. Соколов // Вестник ВНИИЖТа. – 1963. – № 1. – С. 21-24.

267. Михаліченко, П. Є. Етапи і наслідки режиму «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі електровозів [Текст] / П. Є. Михаліченко, М. О. Костін // Материалы V Международной научно-практической конференции «Электрификация железнодорожного транспорта», «Трансэлектро-2011», – Днепропетровск, 2011. – С. 50-51.

268. Сердинов, С. М. Анализ работы и повышение надежности устройств энергоснабжения электрифицированных железных дорог [Текст] / С. М. Сердинов. – М.: Транспорт, 1975 – 365 с.

269. Костин, Н. А. Стохастические переходные электромагнитные процессы в силовых цепях электровозов при резком изменении напряжения на токоприёмнике [Текст] / Н. А. Костин, Т. Н. Мищенко, О. И. Гилевич // Електротехніка і Електромеханіка. – 2005. – № 4. – С. 73-78.

270. Kostin N. Stachastic transient electromagnetic processes in power circuits of locomotives at a sharp change of voltage on a voltage on a current collector // seventh International Conference «Modern Electric Traction in integrated XXIst Century Evrope», Poland, Warsaw, 2005. – P. 227-232.

271. Михаліченко, П.Є. Дослідження перехідних електромагнітних процесів колекторних тягових двигунів електровозів постійного струму при аварійному режимі «зняття-відновлення» напруги на його струмоприймачі [Текст] / П.Є. Михаліченко // Электротехнические и компьютерные системы. – 2012. – № 05(81). – С. 93-100.

272. Костін, М. О. Режим «зняття відновлення» на струмоприймачі при пуску електровоза і наборі позицій до ходової на «С»-з'єднанні [Текст] / М. О. Костін, П. Є. Михаліченко // Материалы V Международной научно-практической конференции «Электрификация железнодорожного транспорта», «Трансэлектро-2011», - Днепропетровск, 2011. – С. 34-35.

273. Михаліченко, П. Є. Моделювання аварійного режиму «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі електровозів постійного струму [Текст] / П. Є. Михаліченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. – № 2. – С. 73-79.

274. Захарченко, Д. Д. Подвижной состав электрических железных дорог [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков, П. Н. Шляхто. – М.: Транспорт, 1968 –296 с.

275. Михаліченко, П. Є. Переваги використання мікропроцесорного захисту фідерів 3,3 кВ системи тягового електропостачання залізниць постійного струму [Текст] / П. Є. Михаліченко // Збірник праць VI міжнародної науково-технічної конференції «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств». – 2008. –С. 395-397.

276. Михаліченко, П. Є. Мікропроцесорна система захисту, яка оцінює залишкову напругу фідера для визначення виду короткого замикання [Текст] / П. Є. Михаліченко, Ю. І. Хмарський // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2012. – Вип. 89. – С. 28-32.

277. Тушканов, Б. А. Магистральные электровозы переменного тока ВЛ60 и ВЛ80 [Текст] / Б. А.Тушканов, В. И Бочаров, В. В. Крузе.– М.: Транспорт, 1964. – 555 с.

278. Марченко, Ю. В. Обслуживание и эксплуатацияэлектровозов ВЛ60 и ВЛ80 [Текст] / Ю. В. Марченко.– М.: Транспорт, 1965. – 255 с.

279. Михаліченко, П. Є. Вплив генераторних струмів електрорухомого складу на імовірність перепалу контактного проводу [Текст] / П. Є. Михаліченко // Залізничний транспорт України. – 2012. – № 3/4. – С. 52-55.

280. Михаліченко, П. Є. Спосіб зниження кидків струму в системі електричної тяги в аварійному режимі «зняття відновлення» напруги на струмоприймачі [Текст] / П. Є. Михаліченко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2012. – № 4. – С. 60-64.

281. Охотников, Н. С. Повышение тяговых свойств электроподвижного состава при помощи [Текст] / Н. С. Охотников // Вестник ВНИИЖТа. – 2009. – №3. – С. 27-31.

282. Охотников, Н. С. Использование накопителей энергии для повышения тяговых свойств электровозов [Текст] / Н. С. Охотников // Вестник ВНИИЖТа. – 2010. – №5. – С. 33-36.

283. Евстафьев, А. М. Применение емкостных накопителей на электрическом подвижном составе [Текст] / А. М. Евстафьев // Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте. Материалы 5-го Международного симпозиума. Eltrans 2009. Росийские железные догори. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 537-545.

284. Хворост, М. В. Накопитель энергии для тяговой сети метрополитена [Текст] / М. В. Хворост, Г. В. Омельяненко, В. Е Бондаренко // Вісник НТУ «ХПІ».– 2005. – № 36. – С. 47-56.

285. Колб, А. А. Аккумулирование энергии рекуперации электрифицированного транспорта с помощью емкостных энергонакопителей [Текст] / А. А. Колб // Вісник ДНУЗТ. – 2010. – Вип. 31. – С. 89-94.

286. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки [Текст] / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна – Д.: Видавництво ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна, 2006. – Т. 1. – 368 с.

287. Оцінка єфективності застосування накопичувачів електроенергії в енергетичній установці дизель-поїзда ДЕЛ-02[Текст] / М. І. Сергієнко та ін. //Залізничний транспорт України. – 2011. – №4. – С. 29-35.

288. Жежеленко, И. В. Интергармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко// Сб. научн. тр. Вестник Приазовского гостехуниверситета. – 1999. – № 8. – С. 170-175.

289. Жежеленко, И. В. Спектральный аналіз тока загрузки источников интергармоник в промышленных электрических сетях [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко // Сб. научн. тр. Вестник Приазовского гостехуниверситета. – 2002. – № 12. – С. 194-201.

290. Векслер, М. И. Методика расчета импульсных уставок и параметров индуктивных шунтов быстродействующих выключателей постоянного тока [Текст] / М. И. Векслер // Сборник трудов ВЗИИТа. – 1968. – Вып. 30. – С. 63-71.

291. Михаліченко, П. Є. Методика вибору уставки швидкодіючих вимикачів фідерів 3,3 кВ постійного струму з мікропроцесорними системами захисту [Текст] / П. Є. Михаліченко // Вісник ДНУЗТ. – 2010. – Вип. 31. – С. 95-99.

292. Хмарский, Ю. И. О построении микропроцессорной системы защиты тяговой сети от аварийных ситуаций [Текст] / Ю. И. Хмарский, П. Є. Михаліченко, А. В. Бельдий // Тези міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні технології на транспорті в промисловості та освіті» - Дніпропетровськ, 2008. – С. 44-45.

293. Михаліченко, П. Є. Мікропроцесорні системи захисту фідерів 3,3 кВ тягової підстанції постійного струму [Текст] / П. Є. Михаліченко // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2009. – Вип. 83. – С. 66-71.

294. Михаліченко, П. Є. Схемотехнічна база сучасних мікропроцесорних комплексів захисту фідерів тягової мережі залізниць україни [Текст] / П. Є. Михаліченко // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2009. – Вип. 84. – С. 58-63.

295. Микропроцесоры. Средства сопряжения. Контролирующие и информационно-управляющие системы: учебн для втузов [Текст] / за ред. Л. Н. Преснухина. – М.: Высш. школа, 1986. – 383 с.

296. AD7656_7657_7658_6_chan_16_bit. http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD7656_7657_7658.pdf.

297. XA-G49. XA 16-bit microcontroller family. http://www.nxp.com/ acrobat_download/ datasheets/ XA-G49_5.pdf.

298. HCPL-4562. HCNW4562. High Bandwidth, Analog/Video Optocouplers. http://www.avagotech.com/assets/downloadDocument.do?id=1723&Source =SearchResultPage.

299. Розробка комплексів багатопараметричного захисту систем електропостачання на тягових підстанціях постійного струму: звіт з НДР [Текст], № д/р 0108U010669. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна. – 2008. – 136 с.

300. Михаличенко, П. Е. О динамических показателях качества электроэнергии в системах электрической тяги [Текст] / П. Е. Михаличенко, Н. А. Костин // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Электрификация железнодорожного транспорта», «Трансэлектро-2010», – Мисхор, 2010. – С. 99.

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

На правах рукопису

МИХАЛІЧЕНКО Павло Євгенович

УДК 621.33: 629.423.3

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ

ДОДАТКИ

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

ДИСЕРТАЦІЯ
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант –
доктор технічних наук, професор
КОСТІН Микола Олександрович.

Дніпропетровськ – 2013

ЗМІСТ

ДОДАТОК А. 3
ДОДАТОК Б. 9
ДОДАТОК В. 12
ДОДАТОК Г 14
ДОДАТОК Д 43
ДОДАТОК Е 51
ДОДАТОК Є 55
ДОДАТОК Ж 58
ДОДАТОК З 67

ДОДАТОК А

АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник служби електропостачання

ДП «Придніпровська залізниця»

_____О.О.САМКОВ

«____» січня 2012 р.

АКТ

використання результатів докторської дисертації Михаліченка Павла Євгеновича

Цим підтверджуємо, що результати докторської дисертації Михаліченка П.Є. прийняті до використання при аналізі та налаштуванні експлуатаційної роботи фідерів тягових підстанцій ділянок електропостачання залізниці.

Особливо важливими, і тому практично корисними, вважаємо такі розробки і результати, що отримані в дисертаційній роботі:

- теоретичне обґрунтування нового принципу релейного захисту, що базується на крутизні зменшення фідерної напруги на її лінійній ділянці після вимикання струму короткого замикання;

- розроблений варіант системи мікропроцесорного фідерного захисту, що базується на новій ознаці;

- результати експериментальних і теоретичних, шляхом математичного моделювання, досліджень режиму короткого замикання в тягових мережах, які дозволили здійснити порівняльну характеристику підстанційних швидкодіючих вимикачів типів ВАБ-43, ВАБ-49, ВАБ-206 і СЕШЕРОН;

- метод «залишкової напруги», на якому може бути розроблена і побудована інформаційна система для розпізнавання підсистеми (тягова мережа чи електрорухомий склад), в якій відбулося коротке замикання;

- результати докладних досліджень режиму «зняття-відновлення» напруги на струмоприймачі електрорухомого складу, що дають можливість встановлювати імовірність перепалу контактного провода.

Зазначені результати можуть бути використані при модернізації електрифікованих ділянок систем постійного струму усіх залізниць України.

Перший заступник
начальника служби «Е» Горбач О.С.

Головний інженер
служби «Е» Погорілий В.В.

Нач. дорожньої
електротехнічної лабораторії Кордін О.П.

Нач. тягової підстанції ЕЧЕ-15
«Нижньодніпровськ Вузол» Лебединський О.М.

МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПИЄМСТВО
"ДОНЕЦЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ"

СЛУЖБА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

83001, м. Донецьк, вул. Артема, 68 тел. (062) 319-40-60, факс 319-46-21

«16» 10 2012 г. № 2006-1/957

Акт
Об использовании результатов докторской диссертации
Михаличенка Павла Евгеньевича
на тему «**Наукове обґрунтування та розробка заходів підвищення ефективності роботи системи електричної тяги постійного струму при аварійних режимах**»

Этим актом подтверждаем, что результаты докторской диссертации Михаличенка П.Е. используются в структурных подразделениях службы «Э» Донецкой железной дороги.

Практически ценным результатами являются:

- оценка эффективности работы существующих быстродействующих выключателей, и особенно современного выключателя типа ВАБ-206;
- предложения по повышению эффективности работы аппаратов защиты фидеров 3,3 кВ;
- результаты гармонического анализа, которые указывают на возможное влияние переходного тока короткого замыкания на линии СЦБ и связи;
- численные результаты энергетических показателей электрического тока в точке повреждения контактной подвески во время аварийных режимов короткого замыкания, а также отрыва токоприемника от контактного провода с последующим его касанием.

Внедрение предложенных автором новых принципов определения короткого замыкания по скорости уменьшения фронта фидерного напряжения в момент его возникновения, а также метода «остаточного напряжения» для определения места возникновения аварийного режима, позволит повысить быстродействие защиты, ускорить определение места короткого замыкания (на контактной сети или на подвижном составе).

Начальник службы **С. Д. Битюков**

УКРЗАЛІЗНИЦЯ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ПРИДНІПРОВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»

Відокремлений структурний підрозділ
«Дніпропетровське моторвагонне депо»

вул. Курчатова, 2-а, м. Дніпропетровськ, 49038, тел.(056)793-15-42, 793-17-40, факс 793-15-42
E-mail: rpch1@email.ua Код ЄДРПОУ 35609851

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Начальник Дніпропетровського
моторвагонного депо
_____ ЛЮБКА В. С.
«____»_____2012 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
МИХАЛІЧЕНКА ПАВЛА ЄВГЕНОВИЧА на тему
«Наукове обґрунтування та розробка заходів підвищення ефективності роботи системи електричної тяги постійного струму при аварійних режимах».

Цим підтверджую, що результати докторської дисертації Михаліченка П.Є. використовуються в Дніпропетровському моторвагонному депо ДП «Придніпровська залізниця» при аналізі та налаштуванні експлуатаційної роботи моторвагоних електропоїздів ЕПЛ2Т і зокрема вузла струмоприймача. Особливо важливими, і тому практично корисними, вважаємо результати по:

- визначенню основних причин виникнення, а також величини генераторних струмів під час аварійних режимів в системі електротяги;
- розрахункам ймовірностей перепалу контактного проводу, оскільки більшість таких пошкоджень контактної мережі призводять до зламу струмоприймача;
- кількісним показникам виділеної в точках відриву струмоприймача електрики, а також теплової енергії, що характеризують термічні пошкодження (підгари) полоза струмоприймача.

Із впровадженням в умовах Дніпропетровського моторвагонного депо окремих висновків та пропозицій автора дисертації передбачуваний економічний ефект складатиме близько 45 тис грн. на рік.

В.о. ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА
Дніпропетровського моторвагонного депо МАРАМАЙ С. О.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,

д.т.н., професор

_____ Б.Є. БОДНАР

про використання результатів докторської дисертаційної роботи

Михаліченка Павла Євгеновича

«Наукове обґрунтування та розробка засобів підвищення ефективності роботи системи електричної тяги постійного струму при аварійних режимах»

М. Дніпропетровськ «14» травня 2013 р.

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті, прийняті до використання наукові та практичні результати, викладені в дисертації Михаліченка П.Є., а саме:

1. Особливості виконання та апаратура вимірювань перехідних електричних величин в системі електричної тяги постійного струму (дисципліна «Основи метрології та електричні вимірювання») для студентів другого курсу напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка».

2. Дослідження електромагнітних процесів при роботі тягових електричних двигунів в аварійних режимах короткого замикання і «зняття-відновлення» напруги на них (дисципліни «Електричні машини» та «Спеціальні електричні машини») для студентів третього та п'ятого курсів відповідно напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка».

Завідувач кафедри ЕТЕМ

д.т.н. доцент А.М. МУХА

ДОДАТОК Б

ТАБЛИЦІ ПОРІВНЯННЯ ОСНОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Таблиця Б.1

Основні технічні засоби господарства електропостачання Укрзалізниці (УЗ)

(за даними на кінець 2011 року)

Залізниці	Експлуатаційна довжина контактної мережі, км	Розгорнута довжина контактної мережі, км	Питома вага роботи на електротязі	Розгорнута довжина контактної мережі змінного струму, км	Кількість підрозділів		
					ЕЧ	ЕЧК	ЕЧЕ
Донецька	1281,81	4373,2	92,5	200,29	9	39	60
Львівська	1424,2	3568,27	81,2	1492,47	7	31	55
Одеська	1735,5	4615,5	88,5	4614,05	7	43	30
Південна	1456,68	4189,17	76,3	1846,04	7	31	42
Півд-Зах.	2291,68	6032,31	94,9	6032,31	7	46	36
Придніпр-ка	1899,38	5056,36	93,6	0	7	45	82
УЗ	10089,25	27834,81	89,7	13771,99	44	235	305

Таблиця Б.2

Розподіл пошкоджень по тяжкості за видами пристроїв по Укрзалізниці

Види пристроїв	Рік	Всього		Середня кількість поїздів на 1 пошкодження	Відсоток від загальної кількості затримок поїздів
		Кількість пошкоджень	Затримки поїздів		
Контактна мережа	2005	188	473	2,516	63,5
	2006	170	307	1,81	59,2
	2007	179	591	3,3	67,0
	2008	193	496	2,6	60,7
	2009	199	391	2,0	58,7
	2010	205	456	2,2	59,54
	2011	215	491	2,3	64,9
Тягові підстанції	2005	30	48	1,6	6,7
	2006	23	16	0,7	3,1
	2007	27	42	1,6	4,8
	2008	30	42	1,4	5,1
	2009	42	43	1,0	6,5
	2010	48	73	1,5	9,5
	2011	58	81	1,4	10,7

Таблиця Б.3

Кількість та термін часу затримок поїздів по Укрзалізниці

Рік	Всього		Пасажирські		Приміські		Вантажні	
	Кільк.	Час	Кільк.	Час	Кільк.	Час	Кільк.	Час
2005	713	775,2	246	238,0	231	256,3	236	281,0
2006	519	681,0	176	154,2	138	115,4	205	411,4
2007	882	890,8	355	327,4	179	140,8	348	422,6
2008	817	695,3	271	190,3	154	110,1	392	394,9
2009	666	630,6	251	242,9	161	150,7	254	237,0
2010	766	648,4	287	217,7	202	142,8	277	287,9
2011	756	589,2	232	155,0	193	126,2	331	307,9

Таблиця Б.4

Кількість та термін часу затримок поїздів по Донецькій та Придніпровській залізницям

Заліз-ниця	Рік	Всього		Пасажирські		Приміські		Вантажні	
		Кільк.	Час	Кільк.	Час	Кільк.	Час	Кільк.	Час
Донецька	2005	40	37,5	13	14,0	18	12,8	9	10,7
	2006	93	316,4	24	49,1	14	18,3	55	249,0
	2007	58	52,0	15	13,7	17	15,9	26	22,4
	2008	86	69,1	21	18,0	22	16,4	43	34,7
	2009	70	70,7	14	13,7	27	21,1	29	35,9
	2010	59	69,1	18	18,7	23	21,3	18	29,1
	2011	73	61,2	7	4,4	25	23,6	41	33,2
Придніпровська	2005	102	92,8	39	28,1	18	20,7	45	44,0
	2006	77	110,0	14	20,4	11	16,4	52	73,2
	2007	203	250,5	74	84,2	28	30,5	101	136,0
	2008	142	166,1	53	42,3	13	12,1	76	111,3
	2009	40	40,4	14	13,0	11	14,7	15	12,7
	2010	97	101,4	38	36,5	23	25,4	36	39,5
	2011	84	99,2	20	17,3	18	16,9	46	65,0

Таблиця Б.5

Розподіл транспортних подій що відбулися по причині пошкодження контактної мережі на Донецькій та Придніпровській залізницях

Залізниця	Рік	Кількість транспортних подій		
		Всього	Інцендент: несправність пристроїв КМ, які призвели до затримки поїзда понад 1 годину	Причина пошкодження контактної мережі
Донецька	2005	6	6	6
	2006	9	9	8
	2007	9	7	8
	2008	9	7	8
	2009	11	11	10
	2010	11	10	10
	2011	6	5	6
Придніпровська	2005	12	8	9
	2006	10	9	7
	2007	13	12	12
	2008	13	12	12
	2009	12	9	10
	2010	12	12	12
	2011	12	11	11

ДОДАТОК В

ПРОТОКОЛ
НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ НАРАДИ СЛУЖБИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ДП «ПРИДНІПРОВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»

ПРОТОКОЛ

науково-технічної наради
служби «Електропостачання» ДП «Придніпровська залізниця»

від «20» грудня 2011 р.

Присутні: Начальник служби «Електропостачання» («Е») САМКОВ О.О.; перший заступник начальника служби «Е» ГОРБАЧ С.О.; головний інженер служби «Е» ПОГОРІЛИЙ В.В.; начальник технічного відділу служби «Е» БОНДАРЕНКО О.О.; дорожній енергодиспетчер КАПУСТЯН Р.В.; головний інженер проектів інституту «Дніпрозалізничпроект» ЛОМОВ Ю.С.; д.т.н., професор, завідувач кафедри «Теоретичні основи електротехніки» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ) КОСТІН М.О.; к.т.н., доцент каф. ТОЕ ДНУЗТ МИХАЛІЧЕНКО П.Є.

Слухали: Результати виконання госпдоговірної науково-дослідницької роботи **«Експериментальні та теоретичні дослідження аварійних електричних режимів роботи тягової мережі системи електропостачання постійного струму»** по договору № ПР/НТО – 1039/НЮ від 08.02.2010 між ДП «Придніпровська залізниця» і Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Доповідачі: проф. КОСТІН М.О. – науковий керівник НДР і доц. МИХАЛІЧЕНКО П.Є. – головний виконавець НДР.

Ухвалили: 1. Вважати отримані результати науково ґрунтовними, цілком вірогідними і практично корисними для впровадження по:

- порівняльній характеристиці роботи швидкодіючих вимикачів;
- новому принципу побудови релейного захисту за крутизною зниження фідерної напруги;
- розпізнаванню режиму короткого замикання в тяговій мережі чи на електрорухомому складі за ознакою «залишкової напруги»;
- імовірності перепалу контактного провода в режимі «відрив-доторкання» струмоприймача електрорухомого складу.

2. Рекомендувати каф. ТОЕ ДНУЗТ продовжувати і поглиблювати науков-дослідницькі роботи у зазначеному напрямку з енергоділянками ДП «Придніпровська залізниця».

3. Вважати, що науково-дослідницька робота виконана вчасно і згідно з календарним планом.

Начальник
служби «Електропостачання»
ДП «Придніпровська залізниця» САМКОВ О.О.

ДОДАТОК Г
ПРОГРАМИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Согласовано:
начальник
дистанции электроснабжения
ЕЧ-3 – Верховцево
_____ В.А. Чабаненко
18 06 2012 г.

Старший энергодиспетчер ЭЧЦ-3
_____ Кириченко В.П.
15 июня 2012 г.

Утверждаю:
начальник службы «Э»
_____ О.А. Самков
18 06 2012 г.

Программа
Проведения эксперимента по снятию временных зависимостей тока и напряжения в эксплуатационных режимах работы системы тягового электроснабжения на фидерной зоне подстанций Баглей-Воскобойня (ЕЧ3- Верховцево)

Днепропетровск
2012

1. Объект испытаний:

Фидера постоянного тока (ФА-1, 3,3 кВ) и ячейка БАОД КВ-2 тяговой сети подстанции постоянного тока Баглей (ЕЧ-3, Верховцево).

2. Цель испытаний:

2.1 Осциллографирование кривой выпрямленного тока на тяговом фидере (ФА-1, 3,3 кВ) подстанции.

2.2 Осциллографирование выпрямленного напряжения в ячейке БАОД КВ-2.

3. Место проведения испытаний:

Тяговая подстанция ЭЧЭ-12 Баглей (ЕЧ-3, Верховцево).

4. Общие положения:

Для проведение испытаний необходимо выполнить п.п. 2.1, 2.2 Программы

5. Подготовительные работы:

5.1 Накануне испытаний ЭЧЭ-12 дают заявки ЭЧЦ-3 на проведение испытаний.

5.2 ЭЧЦ-3 обеспечивает поездную обстановку этой фидерной зоны.

5.3 ЭЧ-3 обеспечивает наличие обслуживающего персонала на тяговой подстанции ЭЧЭ-12 Баглей (ЭЧ-3).

6. Проведение испытаний:

6.1. Выполнение пункта 2.1 Программы

6.1.1. Включить разъединитель «А» на контактной сети ст. Баглей;

6.1.2. Отключить разъединитель «В» на контактной сети ст. Баглей;

6.1.3. Отключить разъединители С-1, С-2, ППС-149 км.

Для осциллографирования кривой выпрямленного тока на фидере №1 необходимо:

6.1.4. Разобрать схему фидерного автомата ФА-1:

а) отключить фидерный автомат ФА-1;

б) отключить разъединитель ФЛ-1;

в) отключить разъединители Р-1-2, Р-3;

г) открыть крышку моторного привода ФЛ-1, снять предохранители;

д) включить заземляющие ножи фидерного автомата ФА-1;

е) устновить переносное заземление на БВ ФА-1 с двух сторон.

6.1.5. Установить осциллограф в ячейке ФА-1 на изолирующую подставку, присоединив его к шунту 3000 А ФА-1.

6.1.6. Установить делитель напряжения в ячейке ФА-1 и подключить его к «+» шине.

6.1.7. Подключить высоковольтный провод к делителю напряжения и проложить его на изоляторах над сеточным ограждением ячейки ФА-1, для подключения к «минус» шине в ячейке БАОД КВ-2.

6.1.8. Включаем осциллограф на запись через изолировочный трансформатор 220/220 В.

6.2. Выполнение пункта 2.2 Программы

Для осциллографирования кривой выпрямленного напряжения в ячейке БАОД КВ-2 необходимо:

6.2.1 Разобрать схему ячейки БАОД КВ-2:

а) отключить быстродействующий автомат БАОД КВ-2;

б) отключить разъединитель ±Р-КВ-2, разъединитель КВ-2-2, разъединитель RC-КВ-2;

в) включить заземляющий нож КВ-2-2, ±Р-КВ-2;

г) установить переносное заземление на БАОД КВ-2 и «минус» шину КВ-2.

6.2.2 Подсоединить провод от делителя напряжения на «минус» шину БАОД КВ-2, проложив его на изоляторах по ячейке и над сеточным ограждением ячеек БАОД КВ-2 и ФА-1.

6.3 Сборка схем ячеек БАОД КВ-2 и фидерного автомата ФА-1

6.3.1. Собрать схему фидерного автомата ФА-1:

а) снять заземления с двух сторон;

б) отключить заземляющие ножи фидерного автомата ФА-1;

в) включить разъединители Р-1-2

г) вставить предохранители, закрыть крышку моторного привода и включить разъединитель ФЛ-1;

д) включить фидерный автомат ФА-1.

6.3.2 Собрать схему ячейки БАОД КВ-2:

а) снять переносное заземление на БАОД КВ-2 и «минус» шину КВ-2;

б) отключить заземляющий нож КВ-2-2, ±Р-КВ-2;

в) включить разъединитель ±Р-КВ-2, разъединитель КВ-2-2, разъединитель RC-КВ-2;

г) включить быстродействующий автомат БАОД КВ-2.

6.4 Восстановить нормальную схему питания и секционирования контактной сети:

6.4.1. Включить разъединители С-1, С-2, ППС-149 км;

6.4.2. Включить разъединитель «В» на контактной сети ст. Баглей;

6.4.3. Отключить разъединитель «А» на контактной сети ст. Баглей.

6.5 Произвести осциллографирование кривой выпрямленного тока и напряжения на протяжении 6 часов.

6.6 По окончанию эксперимента снять измерительное оборудование установленное в ячейках ФА-1, БАОД КВ-2.

7. Приложения

7.1. Схема проведения эксперимента по снятию временных зависимостей тока и напряжения в эксплуатационных режимах работы системы тягового электроснабжения на фидерной зоне подстанций Баглей – Воскобойня (ЕЧ-3, Верховцево).

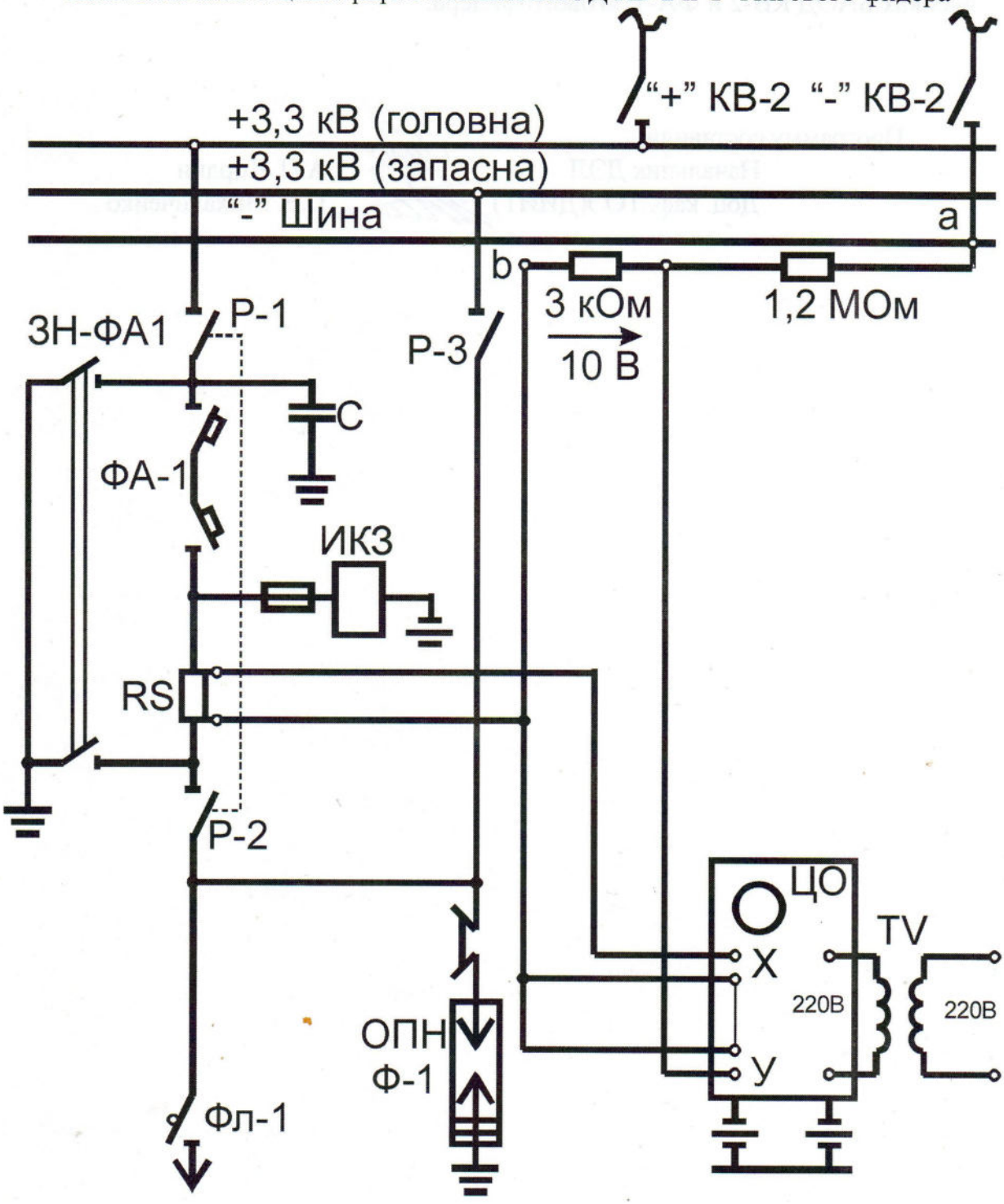
7.2 Схема подключения электроизмерительного прибора в ячейках БАОД КВ-2 и ФА-1тягового фидера.

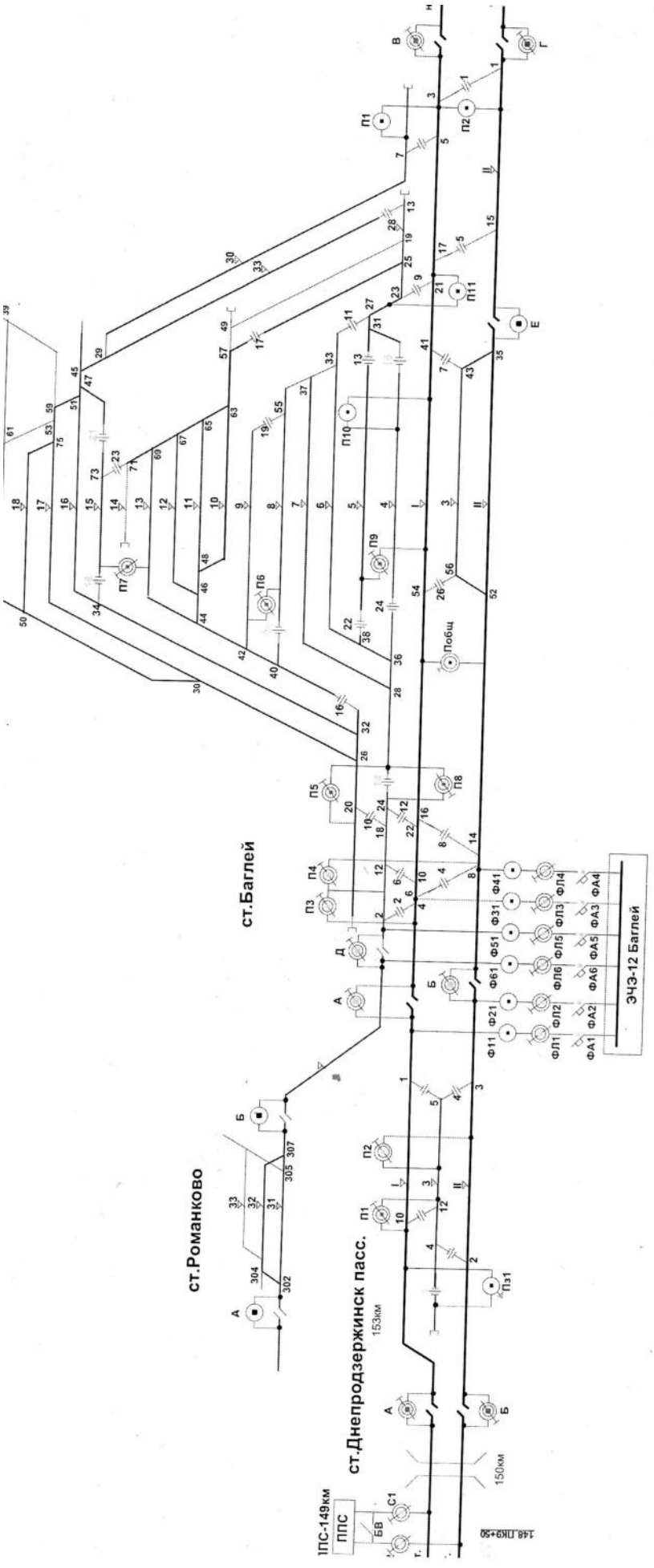
Программу составили:

Начальник ДЭЛ А.П. Кордин

Доц. каф. ТОЭ(ДИИТ) П.Е. Михаличенко

Схема включения осциллографа в ячейках БАОД КВ-2 и Ф-1тягового фидера




ст.Романково
ст.Баглей
ст.Днепродзержинск пасс.
ЭЧЭ-12 Баглей
ПС-149км
ППС
150км
153км
148 ПК9+50

Согласовано:
Начальника
Дистанции электроснабжения
ЕЧ-3 – Верховцево А.В.Король
4 03 2011 г.

Утверждаю:
Начальника службы «Э»
О.А.Самков
10 03 2011 г.

Старший энергодиспетчер ЭЧЦ-3
Кириченко В.П.
4 03 2011 г.

Программа
Проведения эксперимента по снятию временных зависимостей тока и напряжения в эксплуатационных режимах работы системы тягового электроснабжения на фидерной зоне подстанций Горяиново-Диёвка (ЕЧ3- Верховцево) в зимних условиях

Вариант 1

Днепропетровск
2011

1. Объект испытаний:

Фидера постоянного тока (Ф-1, 3,3 кВ) и ячейка РВПК-3,3 кВ тяговой сети подстанции постоянного тока Горяиново (ЕЧ-3, Верховцево).

2. Цель испытаний:

2.1 Осциллографирование выпрямленного напряжения в ячейке РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ.

2.2 Осциллографирование кривой выпрямленного тока на тяговом фидере (Ф-1, 3,3 кВ) подстанции.

3. Место проведения испытаний:

3.1 Тяговая подстанция ЭЧЭ-14 Горяиново (ЕЧ-3, Верховцево).

4. Общие положения:

4.1. Проведение испытаний необходимо выполнить в 2 этапа:

4.1.1. 1 этап**:** выполнение п.2.1 Программы;

4.1.2. 2 этап: выполнение п.2.2 Программы

5. Подготовительные работы:

5.1 Накануне испытаний ЭЧЭ-14 дают заявки ЭЧЦ-3 на проведение испытаний.

5.2 ЭЧЦ-3 обеспечивает поездную обстановку этой фидерной зоны.

5.3 ЭЧ-3 обеспечивает наличие обслуживающего персонала на тяговой подстанции ЭЧЭ-14 Горяиново (ЭЧ-3).

6. Проведение испытаний:

6.1. Выполнение пункта 2.1 Программы

Для осциллографирования кривой выпрямленного напряжения в ячейке РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ необходимо:

6.1.1 Разобрать схему РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ:

а) отключить разъединитель Р-РВПК;

6.1.2 Установить переносное заземление на шину 3,3кВ со стороны РВПК;

6.1.3 Установить осциллограф в ячейке РВПК на изолирующую подставку, присоединить его входы к рабочим выводам делителя напряжения. Высоковольтные выводы делителя напряжения присоединить к шине РВПК 3,3кВ и к «-» шине в ячейке ПКЗ;

6.1.4 Снять переносное заземление с шины 3,3 кВ со стороны РВПК;

6.1.5 Собрать схему РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ:

а) включить разъединитель Р-РВПК;

6.1.6 Произвести осциллографирование кривой выпрямленного напряжения на протяжении 5-ти секунд.

6.1.7 Разобрать схему РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ:

а) отключить разъединитель Р-РВПК;

6.1.8 Установить переносное заземление на шину 3,3кВ со стороны РВПК;

6.1.9 Отсоединить осциллограф и делитель напряжения от шины РВПК 3,3кВ и от «-» шины в ячейке ПКЗ, убрать осциллограф и делитель напряжения из ячейки РВПК ;

6.1.10 Снять переносное заземление с шины 3,3кВ со стороны РВПК;

6.1.11 Собрать схему РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ:

а) включить разъединитель Р-РВПК;

6.2. Выполнение пункта 2.2 Программы

Для осциллографирования кривой выпрямленного тока на фидере №1 необходимо:

6.2.1. Включить разъединитель А на контактной сети;

6.2.2. Разобрать схему фидерного автомата ФА-1:

а) отключить фидерный автомат ФА-1;

б) отключить разъединитель ФЛ-1;

в) отключить разъединители Р-1, Р-2- Ф-1;

г) включить заземляющие ножи фидерного автомата ФА-1;

д) открыть крышку моторного привода ФЛ-1;

е) место работы заземлить с двух сторон.

6.2.3. Установить осциллограф в ячейке Ф-1 на изолирующую подставку, присоединить его к шунту 3000А Ф-1;

6.2.4. Собрать схему фидерного автомата ФА-1:

а) снять заземления с двух сторон;

б) отключить заземляющие ножи фидерного автомата ФА-1;

в) включить разъединители Р-1, Р-2-Ф-1;

г) закрыть крышку моторного привода и включить разъединитель ФЛ-1;

д) включить фидерный автомат ФА-1.

6.2.5. Отключить разъединитель А на контактной сети;

6.2.6. Произвести осциллографирование кривой выпрямленного тока на протяжении 1-их суток;

6.2.7. Включить разъединитель А на контактной сети;

6.2.8. Разобрать схему фидерного автомата ФА-1:

а) отключить фидерный автомат ФА-1;

б) отключить разъединитель ФЛ-1;

в) отключить разъединители Р-1, Р-2- Ф-1;

г) включить заземляющие ножи фидерного автомата ФА-1;

д) открыть крышку моторного привода ФЛ-1;

е) место работы заземлить с двух сторон.

6.2.9. Отсоединить осциллограф от шунта 3000А Ф-1, убрать его из ячейки Ф-1;

6.2.10. Собрать схему фидерного автомата ФА-1:

а) снять заземления с двух сторон;

б) отключить заземляющие ножи фидерного автомата ФА-1;

в) включить разъединители Р-1, Р-2-Ф-1;

г) закрыть крышку моторного привода и включить разъединитель ФЛ-1;

д) включить фидерный автомат ФА-1.

6.2.11. Отключить разъединитель А на контактной сети;

7. Приложения

7.1. Схема проведения эксперимента по снятию временных зависимостей тока и напряжения в эксплуатационных режимах работы системы тягового электроснабжения на фидерной зоне подстанций Горяиново-Сухачевка (ЕЧ-3,Верховцево).

7.2 Схема подключения электроизмерительного прибора в ячейках РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ и Ф-1тягового фидера.

Программу составили:

Начальник ДЭЛ	А.П.Кордин
Доц. каф. ТОЭ(ДИИТ)	П.Е.Михаличенко
Ас. каф. ТОЭ(ДИИТ)	А.В.Петров

Схема включения осциллографа в ячейку РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ

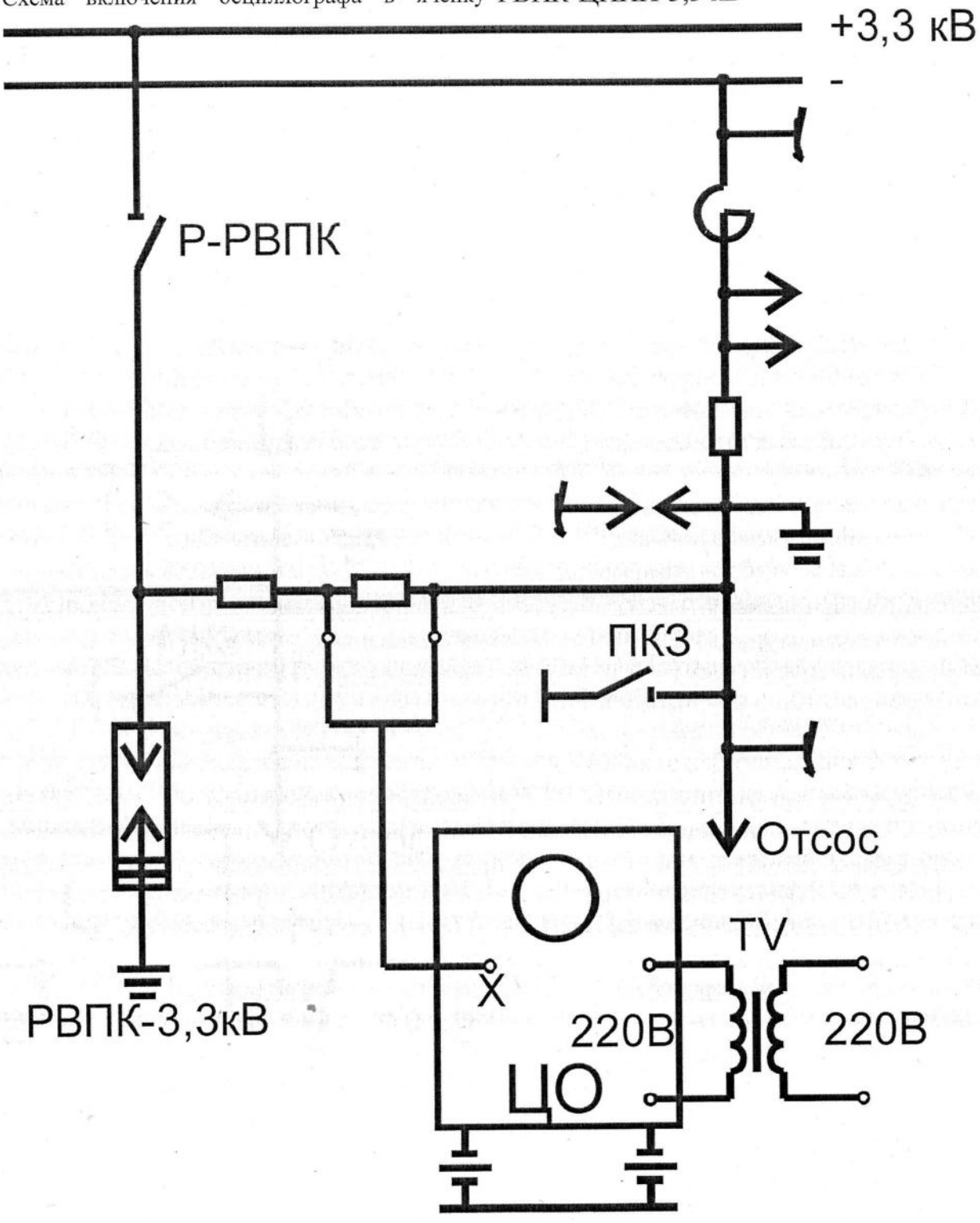
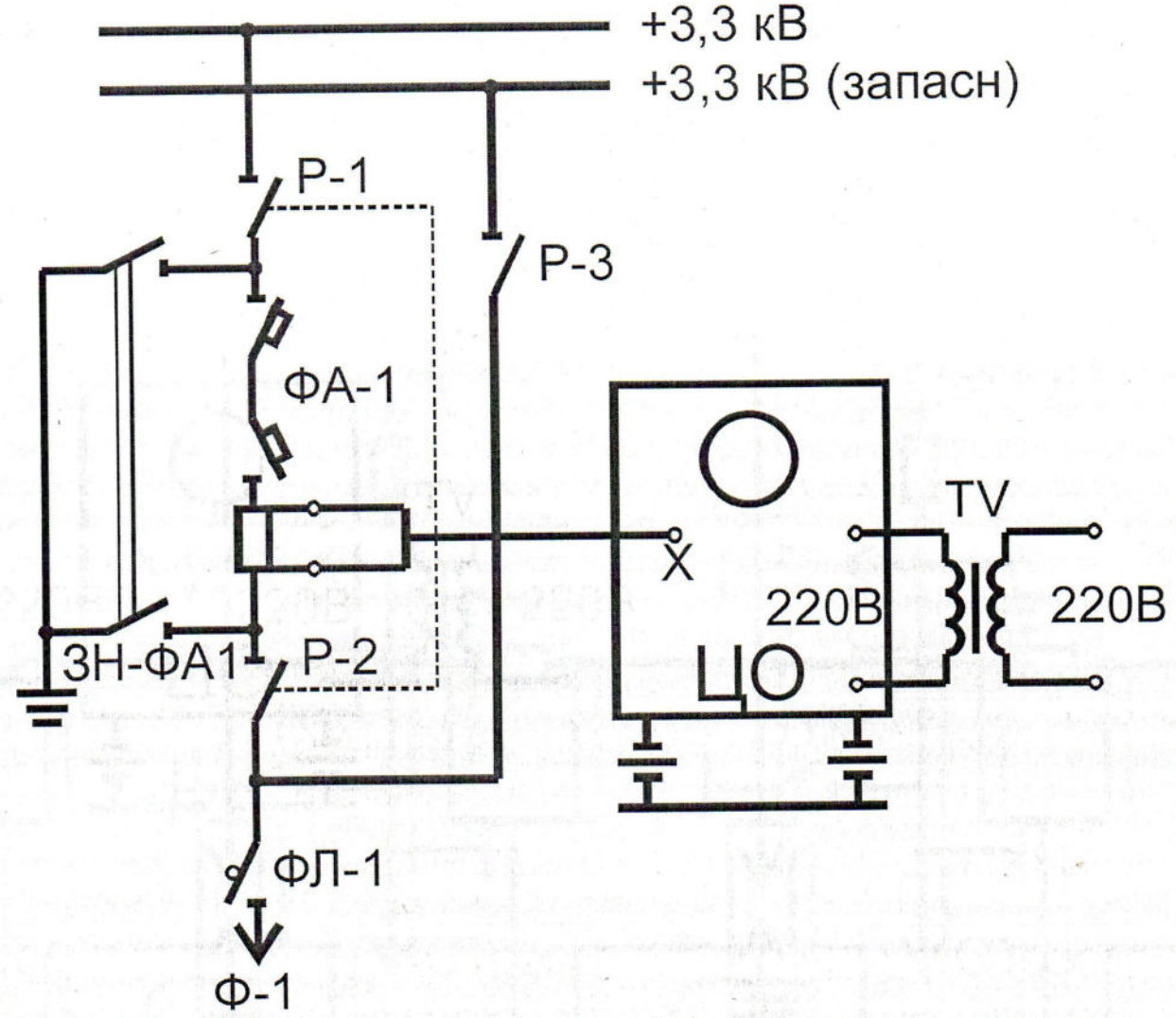


Схема включения осциллографа в ячейку Ф-1



Согласовано:
Начальник
Дистанции электроснабжения
ЕЧ-3 ст. Верховцево
_____ А.В.Король
____ _____2009г

Утверждаю:
Начальник службы «Э»
_____О.А.Самков
22 июля 2009г

Старший энергодиспетчер ЭЧЦ-3
_____В.П. Кириченко
22 июля 2009г

Программа
проведения эксперимента по снятию временных зависимостей тока и напряжения в аварийных и эксплуатационных режимах работы системы тягового электроснабжения на фидерной зоне подстанций: Воскобойня - Плотина (ЕЧ3- Верховцево)

Вариант 2

Днепропетровск
2009

1 Объект испытаний:

Фидер постоянного тока (Ф-5, 3,3 кВ) тяговой подстанции постоянного тока Воскобойня (ЭЧЭ-82, ЕЧ-3, Верховцево) и участок тяговой сети Воскобойня – Плотина (ЭЧК-8, Верхнеднепровск).

2 Цель испытаний:

2.1 Осциллографирования кривой выпрямленного тока и напряжения

2.2 Осциллографирование кривой фидера постоянного тока в аварийных переходных режимах: близкое, среднее - и дальнее короткое замыкание.

3 Место проведения испытаний:

3.1 Тяговая подстанция ЭЧЭ-82 Воскобойня (ЕЧ-3, Верховцево).

3.2 Контактная сеть участка Воскобойня – Плотина.

4. Общие положения:

4.1. Проведение испытаний, согласно пункта 2.1 Программы, необходимо выполнить в 2 этапа:

4.1.1. **1 этап**

Осциллографирования кривой выпрямленного напряжения.

4.1.2. **2 этап**

Осциллографирования кривой выпрямленного тока.

4.2. Проведение испытаний, согласно пункта 2.2 Программы, необходимо выполнить в 3 этапа:

4.2.1. **1 этап**

Выполнение измерений **ближнего короткого замыкания** на контактной сети участка Воскобойня – Плотина (вблизи тяговой подстанции Воскобойня).

4.2.2. **2 этап**

Выполнение измерений **с точкой короткого замыкания в средине участка** контактной сети Воскобойня – Плотина.

4.2.3. **3 этап**

Выполнение измерений **дальнего короткого замыкания** на контактной сети участка Воскобойня – Плотина (вблизи тяговой подстанции Плотина).

5. Подготовительные работы:

5.1 Накануне испытаний ЭЧЭ-82 и ЭЧК-8 дают заявки ЭЧЦ-3 на проведение испытаний.

5.2 ЭЧЦ-3 обеспечивает поездную обстановку этой фидерной

зоны, для исключения нахождения на них электроподвижного состава и даёт запрет на заезд ЭПС на съезд 104-106.

5.3 ЭЧ-3, обеспечивает наличие обслуживающего персонала на тяговых подстанциях: ЭЧЭ-82 Воскобойня, ЭЧЭ-41 Плотина и района контактной ЭЧК-8 Верхнеднепровск.

6. Проведение испытаний:

6.1 Выполнение пункта 2.1 Программы

Для осциллографирования кривой выпрямленного напряжения в ячейке РВПК ЦНИИ необходимо:

6.1.1 Разобрать схему РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ:

а) отключить разъединитель Р-РВПК;

6.1.2 **Установить переносное заземление на шину 3,3кВ** со стороны РВПК;

6.1.3 Установить осциллограф в ячейке РВПК на изолирующую подставку, присоединить его входы к рабочим выводам делителя напряжения. Высоковольтные выводы делителя напряжения присоединить к шине РВПК 3,3кВ и к «-» шине в ячейке ПКЗ;

6.1.4 **Снять переносное заземление с шины 3,3кВ** со стороны РВПК;

6.1.5 Собрать схему РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ:

а) включить разъединитель Р-РВПК;

6.1.6 Произвести осциллографирование кривой выпрямленного напряжения на протяжении **5-ти секунд**.

6.1.7 Разобрать схему РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ:

а) отключить разъединитель Р-РВПК;

6.1.8 **Установить переносное заземление на шину 3,3кВ** со стороны РВПК;

6.1.9 Отсоединить осциллограф и делитель напряжения от шины РВПК 3,3кВ и от «-» шины в ячейке ПКЗ, убрать осциллограф и делитель напряжения из ячейки РВПК ;

6.1.10 **Снять переносное заземление с шины 3,3кВ** со стороны РВПК;

6.1.11 Собрать схему РВПК-ЦНИИ-3,3 кВ:

а) включить разъединитель Р-РВПК;

Для осциллографирования кривой выпрямленного тока на фидере №5 необходимо:

6.1.12 Перевести нагрузку с фидерного автомата ФА-5 на ШСА;

6.1.13 Разобрать схему фидерного автомата ФА-5:

а) отключить фидерный автомат ФА-5 и разъединители Р-1, Р-2- Ф-5;

б) **место работы заземлить с двух сторон**;

6.1.14 Установить осциллограф в ячейке ФА-5 на изолирующую подставку, присоединить его к шунту 3000А ФА-5;

6.1.15 Собрать схему фидерного автомата ФА-5:
а) **снять заземления с двух сторон;**
б) включить разъединители Р-1, Р-2-ФА-5 и фидерный автомат ФА-5;
6.1.16 Перевести нагрузку с ШСА на фидерный автомата ФА-5;
6.1.17 Произвести осциллографирование кривой выпрямленного тока на протяжении 5-ти секунд;
6.1.18 Перевести нагрузку с фидерного автомата ФА-5 на ШСА;
6.1.19 Разобрать схему фидерного автомата ФА-5:
а) отключить разъединители Р-1, Р-2-ФА-5 и фидерный автомат ФА-5;
б) **место работы заземлить с двух сторон;**
6.1.20 Отсоединить осциллограф от шунта 3000А ФА-5, убрать его из ячейки ФА-5;
6.1.21 Собрать схему фидерного автомата ФА-5:
а) **снять заземления с двух сторон;**
б) включить разъединители Р-1, Р-2-ФА-5 и фидерный автомат ФА-5;
6.1.22 Перевести нагрузку с ШСА на фидерный автомата ФА-5;

6.2. Выполнение пункта 2.2 Программы

6.2.1 Сборка схемы осциллографирования кривой тока фидера ФА-5 (для ЭЧЭ-82, Воскобойня) 3,3 кВ для режима близкого искусственного короткого замыкания:

ЭЧЭ-41:

а) Разобрать схему фидерного автомата ФА-1:
- отключить фидерный автомат ФА-1;
- отключить разъединители Р-1, Р-2-ФА-1;
- отключить линейный разъединитель ФЛ-1;

ЭЧЭ-82:

а) Разобрать схему фидерного автомата ФА-5:
- отключить фидерный автомат ФА-5;
- отключить разъединители Р-1, Р-2-ФА-5;
- место работы заземлить с двух сторон;
- отключить линейный разъединитель ФЛ-5;

б) Установить осциллограф в ячейке ФА-5 на изолирующую подставку, присоединить его к шунту 3000А ФА-5 согласно ПУЭ;

ЭЧЩ-3:

а) отключить секционные разъединители:
-«Д» ст. Воскобойня;
-«Д» ст. Плотина.
б) отключить ППС-6 км участка Воскобойня-Плотина;
в) **дать приказ ЭЧК-8 установить переносную заземляющую штангу на фиксаторе опоры к/с №353 перегона Воскобойня-Плотина,** для создания **близкого искусственного короткого замыкания,** присоединив ее сначала к тяговому рельсу, а потом завесив на фиксатор и отойти от этой опоры к/с на расстояние не ближе 12м;

ЭЧЭ-82

а) включить линейный разъединитель ФЛ-5;

б) собрать схему фидерного автомата ФА-5:

- снять заземления с двух сторон;
- включить разъединители Р-1, Р-2-ФА-5;
- **включить фидерный автомат ФА-5 на короткое замыкание** и произвести осциллографирование кривой тока фидера ФА-5 3,3 кВ в режиме **близкого короткого замыкания,** с записью на видеокамеру в течении 5 секунд.

6.2.2 Разборка схемы осциллографирования кривой тока фидера ФА-5 (для ЭЧЭ-82, Воскобойня) 3,3 кВ для режима близкого короткого замыкания:

ЭЧЭ-82:

а) Разобрать схему фидерного автомата ФА-5:

- отключить фидерный автомат ФА-5;
- отключить разъединители Р-1, Р-2-ФА-5;
- отключить линейный разъединитель ФЛ-5;
- место работы заземлить с двух сторон;
- проверить запись видеосъемки на видеокамере.

ЭЧЦ-3:

а) дать приказ ЭЧК-8 снять переносную заземляющую штангу с фиксатора опоры №353 к/с перегона Воскобойня-Плотина, а потом отсоединить ее от тягового рельса;

б) дать приказ ЭЧК-8 переехать к опоре №161 перегона Воскобойня-Плотина для создания **искусственного среднего короткого замыкания;**

6.2.3 Сборка схемы осциллографирования кривой тока фидера ФА-5 (для ЭЧЭ-82, Воскобойня) 3,3 кВ для режима искусственного среднего короткого замыкания:

ЭЧЦ-3:

а) дать приказ ЭЧК-8 установить переносную заземляющую штангу на фиксаторе опоры №161 перегона Воскобойня-Плотина, для создания **среднего искусственного короткого замыкания,** присоединив ее сначала к тяговому рельсу, а потом завесив на фиксатор и отойти от этой опоры к/с на расстояние не ближе 12 м;

ЭЧЭ-82:

а) включить линейный разъединитель ФЛ-5;

б) собрать схему фидерного автомата ФА-5:

- включить разъединители Р-1, Р-2-ФА-5;
- **включить фидерный автомат ФА-5 на короткое замыкание** и произвести осциллографирование кривой тока фидера ФА-5 3,3 кВ в режиме **среднего короткого замыкания,** с записью на видеокамеру в течении 5 секунд.

6.2.4 Разборка схемы осциллографирования кривой тока фидера ФА-5 (для ЭЧЭ-82, Воскобойня) 3,3 кВ для режима срегнего короткого замыкания:

ЭЧЭ-82:

а) Разобрать схему фидерного автомата ФА-5:
- отключить фидерный автомат ФА-5;
- отключить разъединители Р-1, Р-2-ФА-5;
-отключить линейный разъединитель ФЛ-5;
- место работы заземлить с двух сторон;
- проверить запись видеосъемки на видеокамере.

ЭЧЩ-3:

а) дать приказ ЭЧК-8 снять переносную заземляющую штангу с фиксатора опоры №161 к/с перегона Воскобойня-Плотина, а потом отсоединить ее от тягового рельса;
б) дать приказ ЭЧК-8 переехать к опоре №35 перегона Воскобойня-Плотина для создания **дальнего искусственного короткого замыкания;**

6.2.5 Сборка схемы осциллографирования кривой тока фидера ФА-5 (для ЭЧЭ-82, Воскобойня) 3,3 кВ для режима дальнего искусственного короткого замыкания:

ЭЧЩ-3:

а) дать приказ ЭЧК-8 установить переносную заземляющую штангу на фиксаторе опоры №35 перегона Воскобойня-Плотина, для создания **дальнего искусственного короткого замыкания,** присоединив ее сначала к тяговому рельсу, а потом завесив на фиксатор и отойти от этой опоры к/с на расстояние не ближе 12 м;

ЭЧЭ-82:

а) включить линейный разъединитель ФЛ-5;
б) собрать схему фидерного автомата ФА-5:
- включить разъединители Р-1, Р-2-ФА-5;
- включить фидерный автомат ФА-5 на короткое замыкание и произвести осциллографирование кривой тока фидера ФА-5 3,3 кВ в режиме **дальнего короткого замыкания,** с записью на видеокамеру в течение 5 секунд.

6.2.6 Разборка схемы осциллографирования кривой тока фидера ФА-5 (для ЭЧЭ-82, Воскобойня) 3,3 кВ для режима дальнего короткого замыкания:

ЭЧЩ-3:

а) дать приказ ЭЧК-8 снять переносную заземляющую штангу с фиксатора опоры №35 к/с перегона Воскобойня-Плотина, а потом отсоединить её от тягового рельса;
б) включить ППС-6 км ;

в) включить секционные разъединители:
-«Д» ст. Воскобойня;
-«Д» ст. Плотина;

ЭЧЭ-41:

а) включить линейный разъединитель ФЛ-1
б) собрать схему фидерного автомата ФА-1:
- включить разъединители Р-1, Р-2-ФА-1;
- включить фидерный автомат ФА-1.

ЭЧЭ-82:

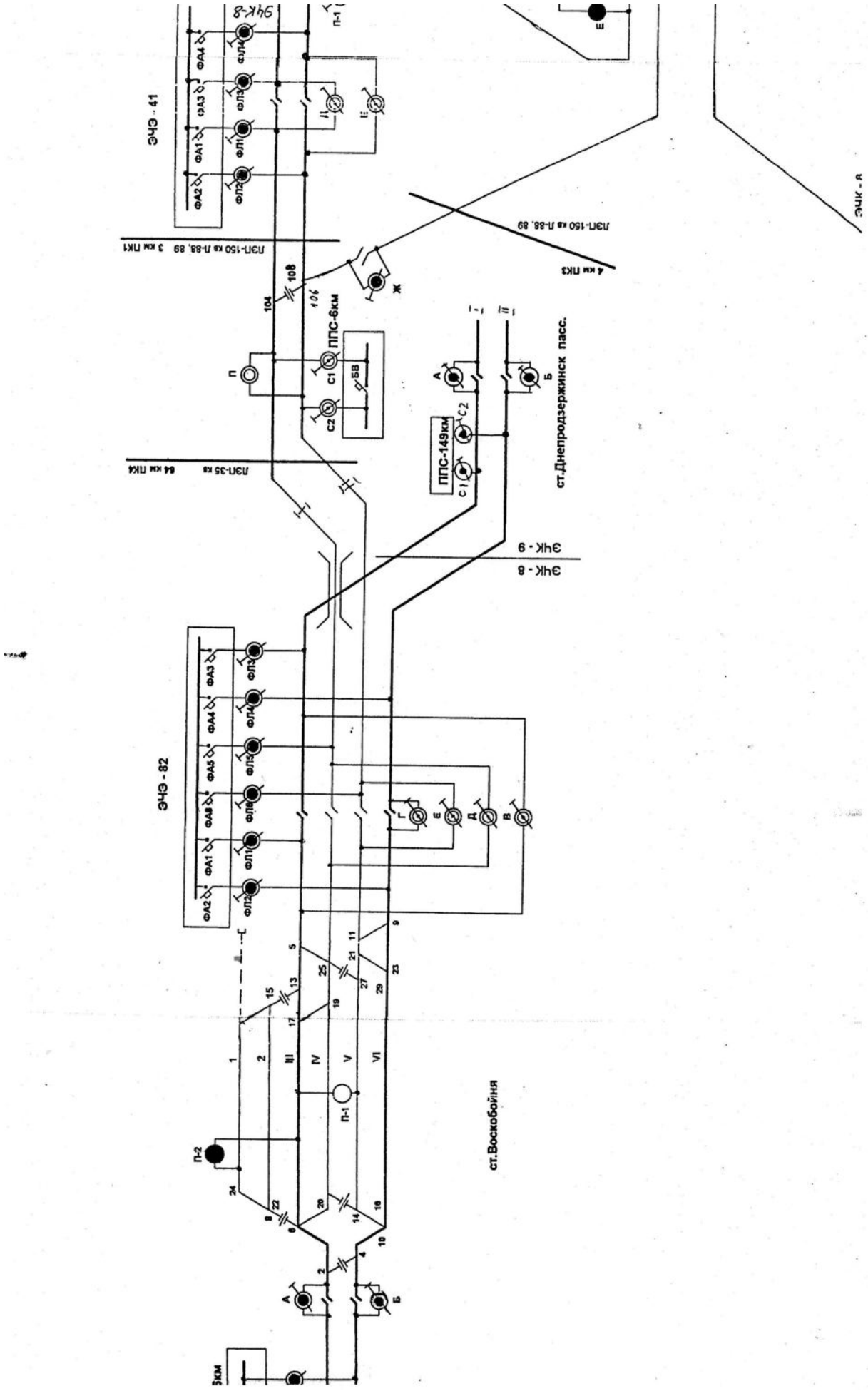
а) отсоединить осциллограф от шунта 3000А ФА-5, убрать его из ячейки ФА-5;
б) включить линейный разъединитель ФЛ-5;
в) собрать схему фидерного автомата ФА-5:
- включить разъединители Р-1, Р-2-ФА-5;
- включить фидерный автомат ФА-5.

7. Приложения

7.1 Схема проведения эксперимента по осциллографированию аварийных режимов работы системы тягового электроснабжения на фидерной зоне подстанций Воскобойня-Плотина (ЕЧ-3, Верховцево).

Программу составили:

Начальник ДЭЛ А.П.Кордин
Ст. эл. мех. ДЭЛ В.Г.Дзюман
Доц. каф. ТОЭ (ДИИТ) П.Е.Михаличенко


ЭЧЭ - 41
ЭЧЭ - 82
ФА1
ФА2
ФА3
ФА4
ФА5
ФА6
ФЛ1
ФЛ2
ФЛ3
ФЛ4
ФЛ5
ФЛ6
ППС-6км
ППС-149км
ст.Воскобойня
ст.Днепродзержинск пасс.
3ЧК - 8
3ЧК - 9
ПЭЛ-150 кв Л-88, 89
ПЭЛ-35 кв
4 км ПК3
64 км ПК4
П-1
П-2

СОГЛАСОВАНО:
Начальник
Дистанции электроснабжения
ЭЧ-2 – Н-Д Узел
_____ В.Ф. БУРЧАК
«24» 06 2011г.

Старший энергодиспетчер ЭЧЦС-2
_____ В.К. ОПЕКУН
«____» _____2011г.

УТВЕРЖДАЮ:
Начальник службы «Э»
_____ О.А.САМКОВ
«16» июня 2011г.

Программа
проведения замеров временных зависимостей тока и напряжения в контактной сети с быстродействующим автоматом ВАБ-206 тяговой подстанции Нижнеднепровск-Узел при режиме КЗ в системе тягового электроснабжения на межподстанционной зоне Илларионово - Нижнеднепровск-Узел 1 путь ЭЧ-2.

Днепропетровск
2011

1 Объект испытаний:

1.1 Фидер постоянного тока ФА-3 **(ВАБ-206)** РУ-3,3кВ тяговой подстанции постоянного тока Нижнеднепровск-Узел (ЭЧЭ-15, ЭЧ-2 Нижнеднепровск-Узел) и участок тяговой сети Илларионово – Игрень – Нижнеднепровск-Узел (ЭЧК-13, Илларионово).

2 Цель испытаний:

2.1. Осцилографирование кривых тока и напряжения фидера постоянного тока в аварийных переходных режимах: близкое, среднее и дальнее короткое замыкание.

3 Место проведения испытаний:

3.1 Тяговая подстанция ЭЧЭ-15 Нижнеднепровск-Узел (ЭЧ-2, Нижнеднепровск-Узел).

3.2 Контактная сеть 1-го нечётного пути участка Илларионово – Игрень - Нижнеднепровск-Узел.

4. Общие положения:

4.1. Проведение испытаний, согласно пункта 2.1 Программы, необходимо выполнить в 3 этапа для участка контактной сети **Илларионово – Игрень – Нижнеднепровск-Узел на фидере 3,3 кВ ФА-3 тяговой подстанции Нижнеднепровск-Узел:**

4.1.1. **1 этап**

Выполнение измерений **ближнего короткого замыкания** (вблизи тяговой подстанции Нижнеднепровск-Узел). Точка **КЗ** на 1-м пути опора к/сети **№5** перегона Нижнеднепровск-Узел – Игрень.

4.1.2. **2 этап**

Выполнение измерений **среднего короткого замыкания** (на удалении от тяговой подстанции Нижнеднепровск-Узел). Точка **КЗ** на 1-м пути опора к/сети **№19** перегона Игрень – Илларионово.

4.1.3. **3 этап**

Выполнение измерений **дальнего короткого замыкания** (вдали от тяговой подстанции Нижнеднепровск-Узел). Точка **КЗ** на 1-м пути опора к/сети **№63** (возле воздушного промежутка «В» станции Илларионово).

5. Подготовительные работы:

5.1 Накануне испытаний ЭЧЭ-15, ЭЧК-13 (на основании нарядов) дают заявки ЭЧЦ-2 на производство работ по испытаниям.

5.2 ЭЧЦ-2 предоставляет «окно» для выполнения работ по 1-му нечетному пути участка **Илларионово – Игрень – Нижнеднепровск-Узел**.

5.3 ЭЧ-2 на время проведения замеров, обеспечивает наличие обслуживающего персонала на тяговых подстанциях: ЭЧЭ–15 Нижнеднепровск-Узел, ЭЧЭ-17 Илларионово, ЭЧЭ-83 Игрень и районов контактной сети: ЭЧК-12 Нижнеднепровск-Узел и ЭЧК-13 Илларионово.

5.4 **Короткое замыкание** на контактной сети образуется путём кратко-

временного касания остриём крюка переносной заземляющей штанги, которая предварительно подсоединяется к тяговому рельсу, основного фиксатора **не ближе 1м от изолятора.**

5.5 При завешивании заземляющих штанг электромонтерами к/сети соблюдаются все требования Правил техники безопасности согласно ‹‹Инструкции по технике безопасности для электромонтёров к/сети›› ЦЭ - 4816. Этот электромонтёр должен быть хорошо обучен, проинструктирован, иметь IV - V группу по ТБ и быть: в диэлектрических ботах и диэлектрических перчатках. Использовать заземляющую штангу с изолированным шлейфом и диэлектрический коврик. Во время завешивания заземляющей штанги обслуживающий персонал не должен касаться её шлейфа и находится под наблюдением руководителя работ.

5.6 На время испытаний ЭЧ-2 назначает ответственного, из числа своих заместителей, за соблюдением правил ПТБ при производстве работ. Явка его на месте испытаний – обязательна!

5.7 Расстановка электромонтёров к/сети в местах КЗ согласно I, II, III этапов, а также обязательно присутствие ЭЧЦС в энергодиспетчерской.

6. Проведение испытаний:

6.1 Выполнение пункта 2.1 Программы.

6.1.1 Сборка схемы осциллографирования кривой тока и напряжения фидера ФА-3 (ЭЧЭ-15, Нижнеднепровск-Узел) 3,3 кВ для режима искусственного короткого замыкания

ЭЧЭ-15:

а) ЭЧЦ-2 даёт приказ на разборку схемы фидерного автомата ФА-3:
- отключить фидерный автомат ФА-3;
- отключить мачтовый разъединитель Фл-3;
- отключить разъединители Р-1-2, Р-3, РД-1-2 ФА-3;
- место работы заземлить с двух сторон.

б) На контактной сети станции Н-Д-Узел включить разъединитель «О» и фидером №10 ЭЧЭ-15 запитать перегон Нижнеднепровск Узел - Новомосковск

в) Установить осциллограф в ячейке ФА-3 на изолирующую подставку, присоединить его к шунту 3000А ФА-3 согласно ПУЭ для записи тока. На второй вход осциллографа для записи напряжения подключить провод к шине «+» в ячейке ФА-3, а к шине «–» подключить провод в ячейке разъединителей ФА-8.

г) Разобрать схему фидерного автомата ФА-8:
- отключить фидерный автомат ФА-8;
- отключить мачтовый разъединитель Фл-8;
- отключить разъединители Р-1-2, Р-3, РД-1-2 ФА-8;
- место работы заземлить с двух сторон.

отключить в ячейке разъединителей КВ-1 разъединитель «–» КВ-1. Подсоединить провод от осциллографа на минус шину после отключенного разъединителя КВ-1 через делитель напряжения.

д) Провод к осциллографу пропустить в бакелитовой трубке через сеточное ограждение ячейки ФА-3 и ячейки разъединителей ФА-8, и проложить его на изоляторах вдоль ячеек фидерных автоматов ФА-8, ФА-4 и включить осциллограф.

е) Включить разъединитель «–» КВ-1 и собрать схему фидерного автомата ФА-8 и закрыть ячейку фидерного автомата, оставив отключённым мачтовый разъединитель Фл-8.

ж) По приказу ЭЧЦ-2:

- снять заземления с двух сторон фидерной ячейки ФА-3.
- собрать схему фидерного автомата ФА-3:
- включить разъединители Р-1-2 ФА-3;
- включить мачтовый разъединитель Фл-3;

6.1.2 Фидерный автомат ФА-3 включает оперативный персонал ЭЧЭ-15 и производится осцилографирование кривой тока и напряжения фидера 3,3 кВ в режиме короткого замыкания.

6.1.3 ЭЧЦ-2 по ТУ:

а) Включает разъединитель «А», «В» ст. Игрень.

б) Отключает фидерные автоматы ФА-1 и ФА-3 тяговой подстанции ЭЧЭ-83 Игрень.

в) Отключает ППС-203 км и ППС-211 км участка Илларионово – Нижнеднепровск-Узел

6.1.4 ***При проведении опытов короткого замыкания уставки фидерных автоматов ФА-3 ЭЧЭ-15 и ФА-1 ЭЧЭ-17 должны быть переведены на минимальные и вывести АПВ на данных фидерных автоматах.***

В случае несрабатывания БВ фидеров дежурный персонал подстанций отключает вручную МВ, работающего КВ!

6.1.5 Замеры токов КЗ фидера ФА-3 (ЭЧЭ-15 Нижнеднепровск-Узел**) 3,3 кВ для режима близкого короткого замыкания** (точка **КЗ** на 1-м пути опора к/сети **№5** перегона Нижнеднепровск-Узел – Игрень (между воздушным промежутком «Е» и мостом р. Самара)).

а) Электромонтёр ЭЧК-13 подключает к тяговому рельсу 1-го пути переносную заземляющую штангу у опоры к/сети **№5** перегона Нижнеднепровск-Узел – Игрень.

б) По указанию ответственного руководителя за проведение испытаний электромонтёру разрешается произвести опробование путём прикосновения острием крюка переносной заземляющей штанги основного фиксатора, не ближе 1 м от изолятора.

в) После проведения опыта **близкого короткого замыкания** электромонтер ЭЧК-13 снимает заземляющую штангу с места работы.

г) ЭЧЦ-2 включает по ТУ отключенные БВ фидеров ФА-3 ЭЧЭ-15, ФА-1 ЭЧЭ-17.

6.1.6 Замеры токов КЗ фидера ФА-3 (ЭЧЭ-15 Нижнеднепровск-Узел) 3,3 кВ для режима среднего короткого замыкания (точка **КЗ** на 1-м пути опора к/сети **№19** перегона Игрень – Илларионово**).**

а) Электромонтёр ЭЧК-13 подключает к тяговому рельсу 1-го пути переносную заземляющую штангу у опоры к/сети **№19,** перегона Игрень – Илларионово.

б). По указанию ответственного руководителя за проведение испытаний электромонтёру разрешается произвести опробование путём прикосновения острием крюка переносной заземляющей штанги основного фиксатора, не ближе 1 м от изолятора.

в) После проведения опыта **среднего короткого замыкания** электромонтёр ЭЧК-13 снимает заземляющую штангу с места работы.

г) ЭЧЦ-2 включает по ТУ отключенные БВ фидеров ФА-3 ЭЧЭ-15, ФА-1 ЭЧЭ-17

6.1.7 Замеры токов КЗ фидера ФА-3 (ЭЧЭ-15 Нижнеднепровск-Узел) 3,3 кВ для режима дальнего короткого замыкания (точка **КЗ** на 1-м пути опора к/сети **№63** (возле воздушного промежутка «В» станции Илларионово)).

а) Электромонтёр ЭЧК-13 подключает к тяговому рельсу 1-го пути переносную заземляющую штангу у опоры к/сети **№63** (возле воздушного промежутка «В» станции Илларионово).

б) По указанию ответственного руководителя за проведение испытаний электромонтёру разрешается произвести опробование путём прикосновения острием крюка переносной заземляющей штанги основного фиксатора, не ближе 1 м от изолятора.

в) После проведения опыта **дальнего короткого замыкания** электромонтёр ЭЧК-13 снимает заземляющую штангу с места работы.

6.1.8 ЭЧЭ-15 после проведения последнего опыта разбирает схему в фидерной ячейке ФА-3 и ФА-8, для проверки записи в осциллографе. В случае необходимости опыты КЗ повторяют еще раз.

6.1.9 После подтверждения удачной записи осциллографом от ЭЧЭ-15 по указанию ответственного руководителя за проведение испытаний бригады ЭЧК-13 возвращаются на место дислокации.

6.1.10 Оперативный персонал ЭЧЭ-15 разбирает электроизмерительную схему, и собирает схемы фидерных автоматов ФА-3, ФА-8. ЭЧЭ-15 на фидере ФА-3 и ЭЧЭ-17 на фидере ФА-1 включают АПВ и устанавливает максимальные уставки.

6.1.11 ЭЧЦ-2 по ТУ включает фидерные автоматы ФА-3 ЭЧЭ-15, ФА-1 ЭЧЭ-17 и собирает нормальную схему питания по 1-му пути на перегонах Нижнеднепровск-Узел – Игрень – Илларионово, восстанавливает нормальную схему на фидерном автомате №8 и отключает мачтовый разъединитель «О» станции Н-Д Узел.

7. Приложения

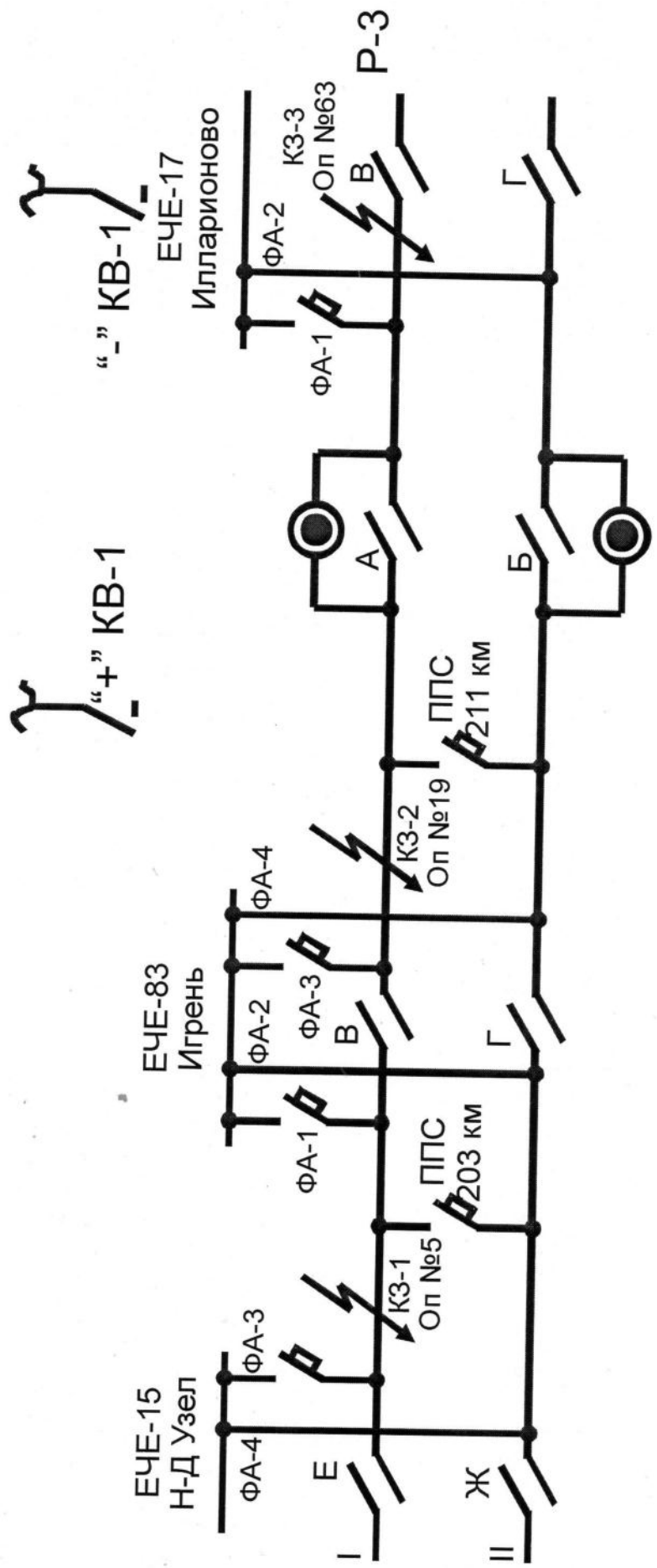
7.1 Схема проведения эксперимента по снятию временных зависимостей тока и напряжения в аварийных и эксплуатационных режимах работы системы тягового электроснабжения на фидерной зоне подстанций Илларионово – Нижнеднепровск - Узел (ЭЧ-2, Нижнеднепровск-Узел).

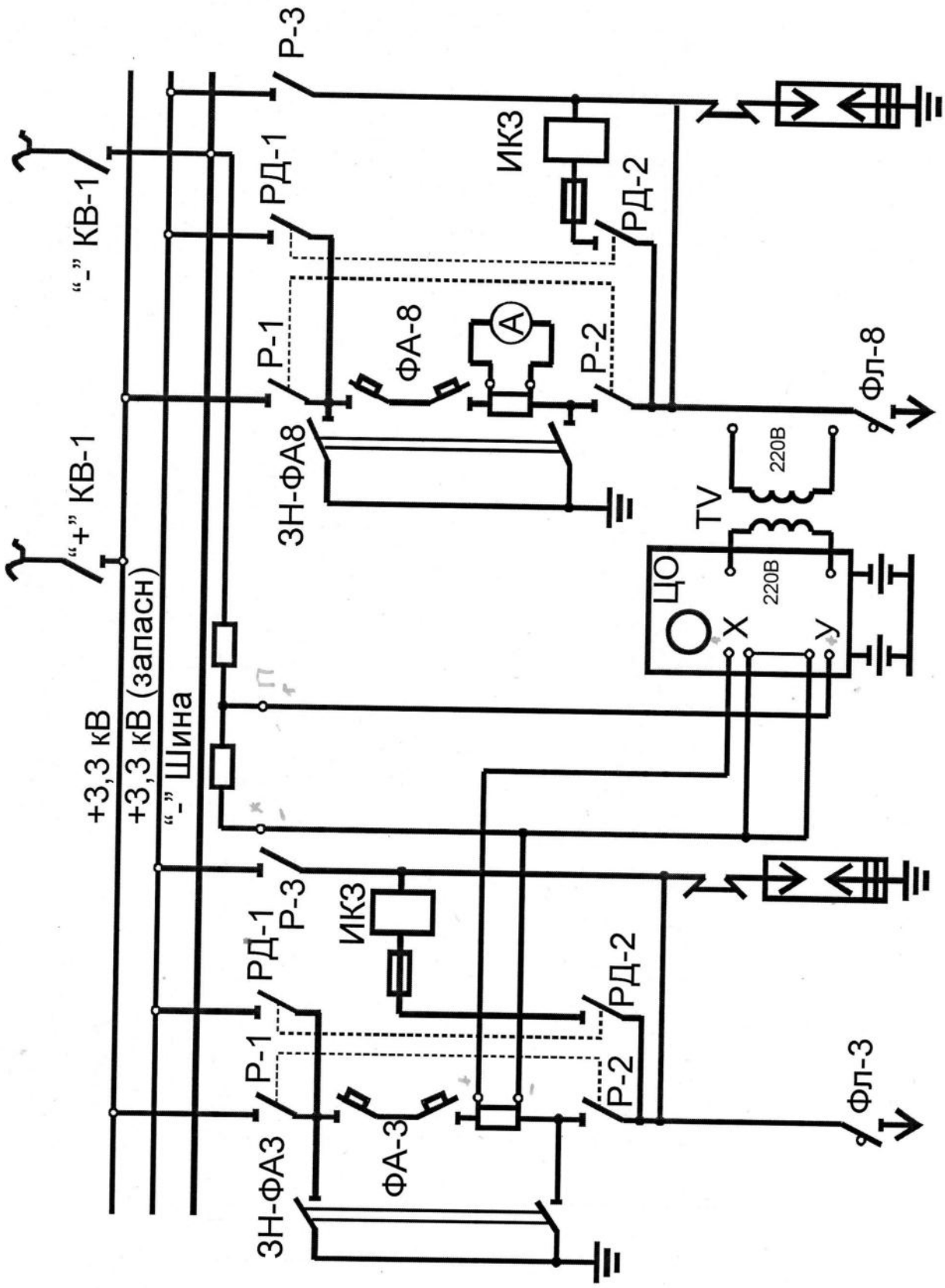
7.2 Схема подключения электроизмерительного прибора в ячейках фидерного автомата ФА-3 тягового фидера.

Программу составили:

Начальник ДЭЛ А.П. Кордин

Доцент кафедры ТОЭ П.Е. Михаличенко


"+" КВ-1
"-" КВ-1
ЕЧЕ-17
Илларионово
ЕЧЕ-83
Игрень
ЕЧЕ-15
Н-Д Узел
ФА-1
ФА-2
ФА-3
ФА-4
КЗ-1
Оп №5
КЗ-2
Оп №19
КЗ-3
Оп №63
ППС
203 км
ППС
211 км
А
Б
В
Г
Е
Ж
Р-3
I
II


+3,3 кВ
+3,3 кВ (запасн)
"-" Шина
"+" КВ-1
"-" КВ-1
Р-3
РД-1
Р-1
ФА-8
ЗН-ФА8
ИКЗ
РД-2
Р-2
Фл-8
TV
220В
ЦО
X
У
ЗН-ФА3
ФА-3
Фл-3

ДОДАТОК Д

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСЬМИВІСНИХ ВАНТАЖНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Таблиця Д.1

Основні технічні характеристики вантажних електровозів, використані при моделюванні

Основні параметри		Тип електрорухомої одиниці			
		ДЕ1	2ЕЛ4	ВЛ10	ВЛ8
Напруга номінальна на струмоприймачі, U, В		3000	3000	3000	3000
Швидкість конструкційна, v, $км/год$		100	120	100	100
Потужність на валах тягових двигунів, P, кВт	Часовий режим	6280	6200	5360	4200
	Тривалий режим	5840	5735	4600	3660
Сила тяги, F, кН	Часовий режим	440	434	403	319,7
	Тривалий режим	396	391	326	297,5
ККД, η	Часовий режим	0,913	0,878	0,893	0,891
	Тривалий режим	0,915	0,88	0,9	0,91
Швидкість, v, $км/год$	Часовий режим	50	50	48,7	42,6
	Тривалий режим	51,6	51,6	51,2	44,3
Діаметр бандажу по колу катання, $D_{кп}$, м		1,250	1,205	1,250	1,20
Передаточне число зубчатої передачі, μ		3,826	3,26	3,826	3,905
Ослаблення поля (при $I_д = 300...500\ A$)		ПЗ1-78% ПЗ2-65% ПЗ3-57% ПЗ4-43%	ПЗ1-79% ПЗ2-64% ПЗ3-52% ПЗ4-43%	ПЗ1-75% ПЗ2-55% ПЗ3-43% ПЗ4-36%	ПЗ1-75% ПЗ2-55% ПЗ3-43% ПЗ4-36%

Номінальні Опори резистора послаблення поля, Ом	ПЗ1 ПЗ2 ПЗ3 ПЗ4	0,1497 0,06315 0,03075 0,0295	0,1031 0,0367 0,0178 0,0165	0,1264 0,0475 0,0314 0,02125	0,18 0,073 0,04526 0,03375
Індуктивність індуктивного шунта типу, $L_{ш}$, мГн		4	4	4,5	9
Опір індуктивного шунта типу, $R_{ш}$, Ом		0,00865	0,0083	0,0236	0,025
Кількість швидкодіючих вимикачів на електровоза		2	2	1	1
Величина струму уставки ШВ		2500	1900	3100	2500
Струм небалансу реле диференційного захисту		<150	80…100	100	100

Таблиця Д.2

Основні технічні характеристики тягових двигунів вантажних електровозів, використані при моделюванні

Основні параметри		Тип тягового електродвигуна			
		ЕД141У1	ДТК-800А	ТЛ-2К	НБ-406
Напруга номінальна, $U_{тд}$, В		1500	1500	1500	1500
Струм якоря (у різних режимах), I, А	Часовий режим	565	570	480	380
	Тривалий режим	520	525	410	340
Потужність на валах тягових двигунів (у різних режимах), P, кВт	Часовий режим	785	800	670	525
	Тривалий режим	730	740	575	470
Частота обертання (у різних режимах), n, $об/хв$	Часовий режим	860	745	770	735
	Тривалий режим	840	765	825	765
ККД (у різних режимах), η	Часовий режим	0,931	0,9413	0,934	0,929
	Тривалий режим	0,933	0,9432	0,936	0,932
Опір обмотки якоря, $R_я$, Ом	при 20º С	0,0253	0,0325	0,0317	0,0473
	при 115º С	0,0347	0,04461	0,0432	0,0645
Опір обмотки головних полюсів, $R_з$, Ом	при 20º С	0,0184	0,0179	0,0268	0,0442
	при 115º С	0,0253	0,02457	0,0366	0,06
Опір компенсаційної обмотки і добавочних полюсів, $R_{ко} + R_{дп}$, Ом	при 20º С	0,0238	0,0305	0,0365	0,0237
	при 115º С	0,0327	0,04186	0,0509	0,0322

Коефіцієнти полінома характеристики намагнічення $\Phi = f(I_з)$	a	$1{,}19\cdot10^{-4}$	$-2{,}247\cdot10^{-3}$	$1{,}098\cdot10^{-4}$	$1{,}076\cdot10^{-3}$
	b	$2{,}905\cdot10^{-4}$	$5{,}925\cdot10^{-4}$	$2{,}628\cdot10^{-4}$	$5{,}577\cdot10^{-4}$
	c	$4{,}488\cdot10^{-7}$	$-1{,}827\cdot10^{-6}$	$1{,}644\cdot10^{-6}$	$7{,}137\cdot10^{-6}$
	d	$-3{,}551\cdot10^{-9}$	$4{,}082\cdot10^{-9}$	$-8{,}837\cdot10^{-9}$	$-7{,}334\cdot10^{-8}$
	e	$7{,}261\cdot10^{-12}$	$-5{,}714\cdot10^{-12}$	$1{,}679\cdot10^{-11}$	$2{,}732\cdot10^{-10}$
	f	$-6{,}635\cdot10^{-15}$	$4{,}356\cdot10^{-15}$	$-1{,}45\cdot10^{-14}$	$-4{,}63\cdot10^{-13}$
	k	$2{,}316\cdot10^{-18}$	$-1{,}364\cdot10^{-18}$	$4{,}777\cdot10^{-18}$	$2{,}987\cdot10^{-16}$
Коефіцієнти полінома струму намагнічення функції основного магнітного потоку $i_\mu(t) = f(\Phi(t))$	a`	4,4233	2,8093	9,5611	0,11012
	b`	921,64	2375,94	-1149,82	1648,63
	c`	$2{,}606\cdot10^{5}$	$-4{,}2381\cdot10^{4}$	$4{,}1956\cdot10^{5}$	$-3{,}899\cdot10^{4}$
	d`	$-1{,}124\cdot10^{7}$	$1{,}4662\cdot10^{6}$	$-1{,}686\cdot10^{7}$	$1{,}399\cdot10^{6}$
	e`	$2{,}234\cdot10^{8}$	$-1{,}489\cdot10^{7}$	$3{,}095\cdot10^{8}$	$-2{,}206\cdot10^{7}$
	f`	$-2{,}043\cdot10^{9}$	$5{,}733\cdot10^{7}$	$-2{,}651\cdot10^{9}$	$1{,}54\cdot10^{8}$
	k`	$7{,}197\cdot10^{9}$	$6{,}977\cdot10^{7}$	$8{,}677\cdot10^{9}$	$-3{,}715\cdot10^{8}$
Індуктивність обмотки якоря (прийнята лінійною), $L'_я$, мГн		1,56	1,11	1,63	45
Індуктивність обмотки збудження (при $I = I_н$), $L_З$, мГн		4,9	1,63	5,3	75
Кількість витків обмотки збудження, $w_З$;		16	15	19	48
Кількість витків компенсаційної обмотки, $w_{КО}$;		11	11	10	-
Кількість витків додаткових полюсів, $w_{ДП}$;		10	7	10	34
Діаметр колектора, $D_К$ мм		630	630	660	565
Відстань між сусідніми щитками, $l_Щ$ см		33	33	34,6	44,4
Кількість колекторних пластин $N_К$;		492	516	525	406
Кількість пар полюсів, p		3	3	3	2
Постійна двигуна, C_W		156,688	164,248	167,113	129,299

Коефіцієнти розсіювання обмотки збудження, $\sigma_з$	1,25	1,15	1,2	1,25
Товщина діамагнітної прокладки додаткових полюсів, $\delta_{дп}$ мм	8+4	10,5	8+5	8+6
Вид обмотки якоря	Проста петльова			
Магнітна індукція в ярмі остова, B_0 Тл	1,4841	1,537	1,55	1,635

Таблиця Д.3

Швидкісні характеристики електровозу ДЕ1

Режим		Параметр	Струм якоря $I_я$, А							
			200	300	400	500	520	565	600	700
«С»	ПП	v, $км/год$	21,3	15,9	13,6	12,2	11,9	11,4	11,1	10,3
	ПЗ1		25,9	18,6	15,2	13,4	13,1	12,6	12,2	11,3
	ПЗ2		30,2	21,3	17,0	14,5	14,2	13,5	13,1	12,2
	ПЗ3		33,8	23,7	18,6	15,7	15,2	14,4	13,9	12,8
	ПЗ4		43,5	30,0	23,2	19,0	18,4	17,2	16,4	14,7
«СП»	ПП		43,6	33,0	28,7	26,2	25,6	24,7	24,1	22,8
	ПЗ1		53,1	38,8	32,1	28,7	28,2	27,2	26,6	25,1
	ПЗ2		61,9	44,4	35,9	31,1	30,5	29,2	28,5	26,9
	ПЗ3		69,4	49,3	39,3	33,6	32,7	31,1	30,2	28,4
	ПЗ4		89.3	62,3	48,9	40,8	39,5	37,05	35,6	32,4
«П»	ПП		89,0	67,5	58,9	53,9	53,1	51,2	50,2	47,8
	ПЗ1		-	79,0	65,8	59,3	58,2	56,5	55,3	52,5
	ПЗ2		-	90,5	73,6	64,3	63,0	60,6	59,3	56,4
	ПЗ3		-	100,0	80,7	69,4	67,7	64,5	62,8	59,4
	ПЗ4		-	-	100,0	84,3	81,8	77,0	74,1	67,9

Таблиця Д.4

Швидкісні рухомої одиниці v, $^{км}/_{год}$ при $I = I_н$ і повному полі (за пусковими характеристиками)

Схема з'єднання ТЕД	Вид рухомої одиниці			
	ДЕ1 $I_н = 565\ A$	2ЕЛ4 $I_н = 570\ A$	ВЛ10 $I_н = 480\ A$	ВЛ8 $I_н = 380\ A$
С	11,4	11,1	10,2	9,3
СП	24,7	24,6	22,3	20,4
П	51,2	51,7	46,7	42,6

ДОДАТОК Е

ПОРІВНЯННЯ ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ, З РІЗНИМИ СХЕМАМИ З'ЄДНАННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Порівняння перехідних електричних величин в режимі КЗ на тяговій мережі, ЕРС знаходиться на фідерній зоні (рис. Е.1), схема з'єднання ТЕД «С», «СП», «П».

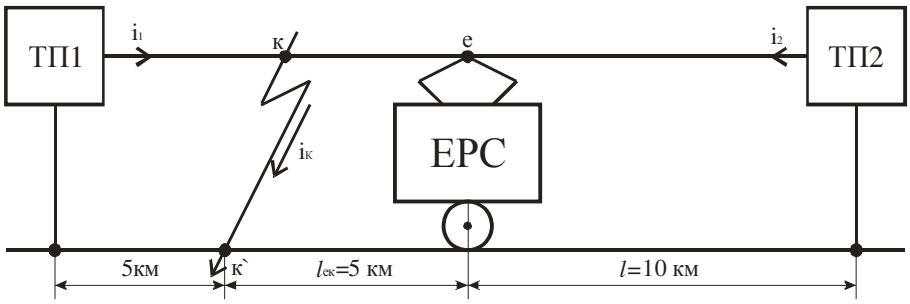


Рисунок Е.1 – Схема системи електричної тяги в режимі КЗ на фідерній зоні

Розрахунки проведені для електровозів серії ДЕ1. Струми ТЕД в усих випадках номінальні $I_{ном} = 565A$, швидкість електровозу визначається за електромеханічними характеристиками. Результати розрахунків представлені на рис. Е.1… Е.9.

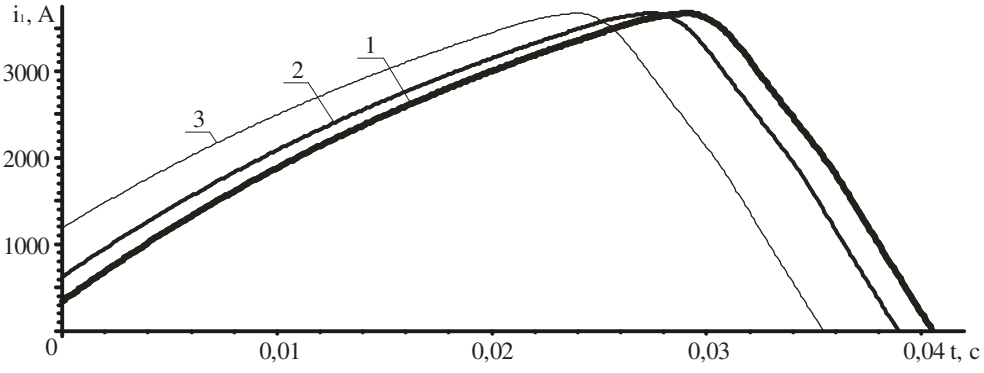


Рисунок Е.2 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП1, в режимі КЗ в тяговій мережі при різній схемі живлення ТЕД ЕРС:

1 – «С»; 2 – «СП»; 3 – «П»

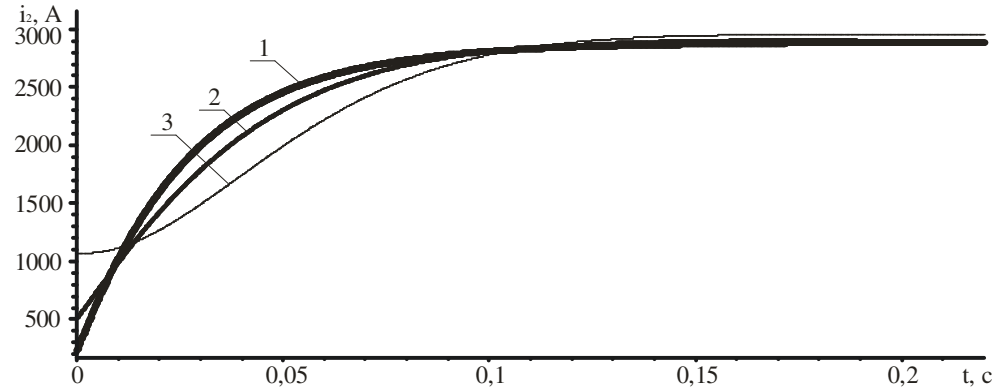


Рисунок Е.3 – Часові залежності зміни фідерного струму ТП2, в режимі КЗ в тяговій мережі при різній схемі живлення ТЕД ЕРС:

1 – «С»; 2 – «СП»; 3 – «П»

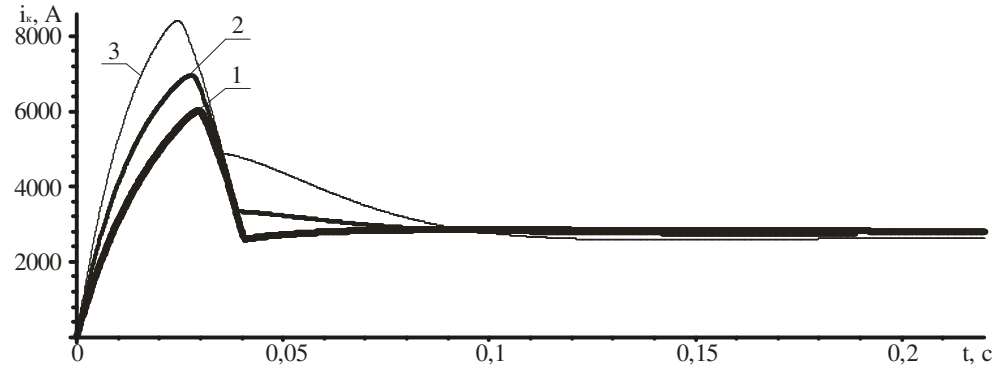


Рисунок Е.4 – Часові залежності зміни струму в точці КЗ, при різній схемі живлення ТЕД ЕРС: 1 – «С»; 2 – «СП»; 3 – «П»

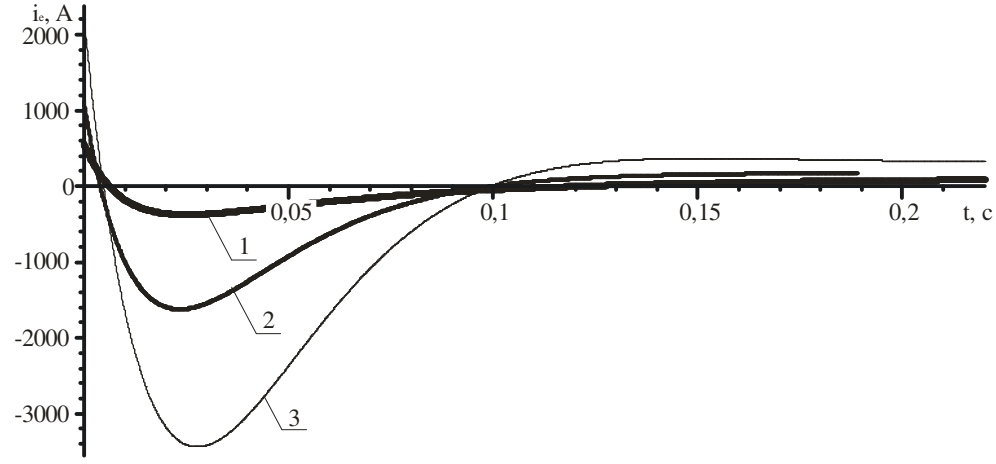


Рисунок Е.5 – Часові залежності зміни струму електровоза, в режимі КЗ в тяговій мережі при різній схемі живлення ТЕД ЕРС:

1 – «С»; 2 – «СП»; 3 – «П»

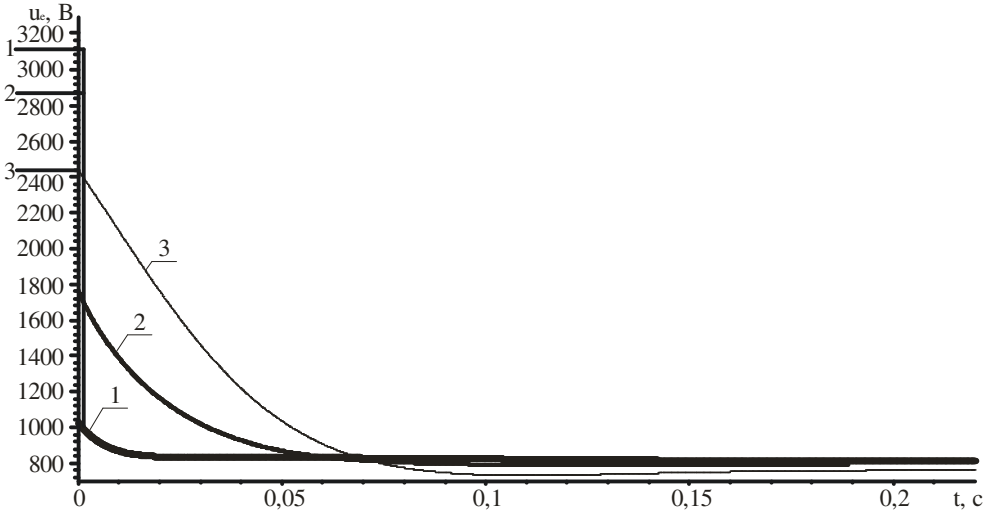


Рисунок Е.6 – Часові залежності зміни напруги на струмоприймачі електровоза, в режимі КЗ в тяговій мережі при різній схемі живлення ТЕД ЕРС: 1 – «С»; 2 – «СП»; 3 – «П»

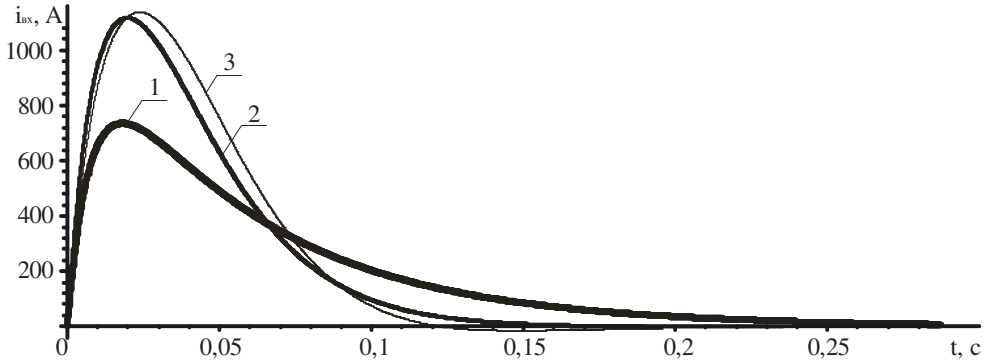


Рисунок Е.7 – Часові залежності зміни вихрових струмів в остові ТЕД, в режимі КЗ в тяговій мережі при різній схемі живлення ТЕД ЕРС:
1 – «С»; 2 – «СП»; 3 – «П»

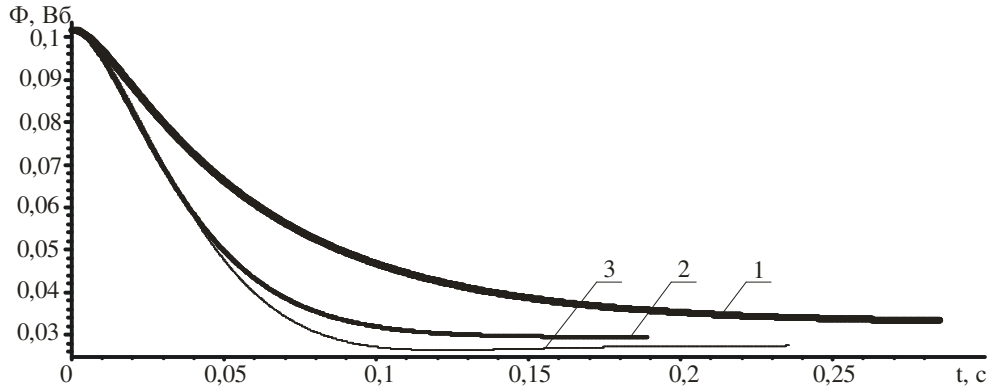


Рисунок Е.8 – Часові залежності зміни основного магнітного потоку в остові ТЕД, в режимі КЗ в тяговій мережі при різній схемі живлення ТЕД ЕРС: 1 – «С»; 2 – «СП»; 3 – «П»

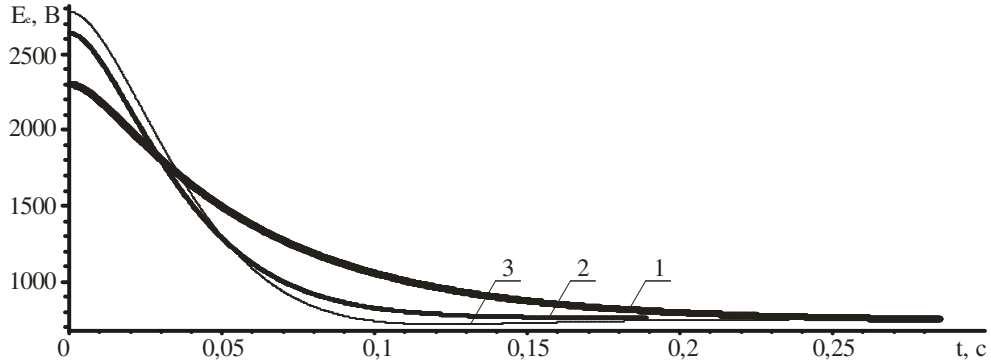


Рисунок Е.9 – Часові залежності зміни загальної проти-е.р.с. електровозу, в режимі КЗ в тяговій мережі при різній схемі живлення ТЕД ЕРС: 1 – «С»; 2 – «СП»; 3 – «П»

ДОДАТОК Є

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАНТАЖНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ ВЛ19

Таблиця Є.1

Основні технічні характеристики вантажних електровозів, використані при моделюванні

Основні параметри		ВЛ19
Напруга номінальна на струмоприймачі, U , В		3000
Швидкість конструкційни, v, $км/год$		85
Потужність на валах тягових двигунів, P, кВт	Часовий режим	2400
	Тривалий режим	1860
Сила тяги, F , кН	Часовий режим	19500
	Тривалий режим	13900
Швидкість, v, $км/год$	Часовий режим	43,5
	Тривалий режим	46
Діаметр бандажу по колу катання, $D_{кп}$, м		1220
Передатнє число зубчатої передачі, μ		3,74

Таблиця Є.2

Основні технічні характеристики тягових двигунів вантажних електровозів, використані при моделюванні

Основні параметри	ДПЄ-340 А
Напруга номінальна, $U_{тд}$, В	1500
Часова потужність на валах тягових двигунів (у різних режимах), P, кВт	340

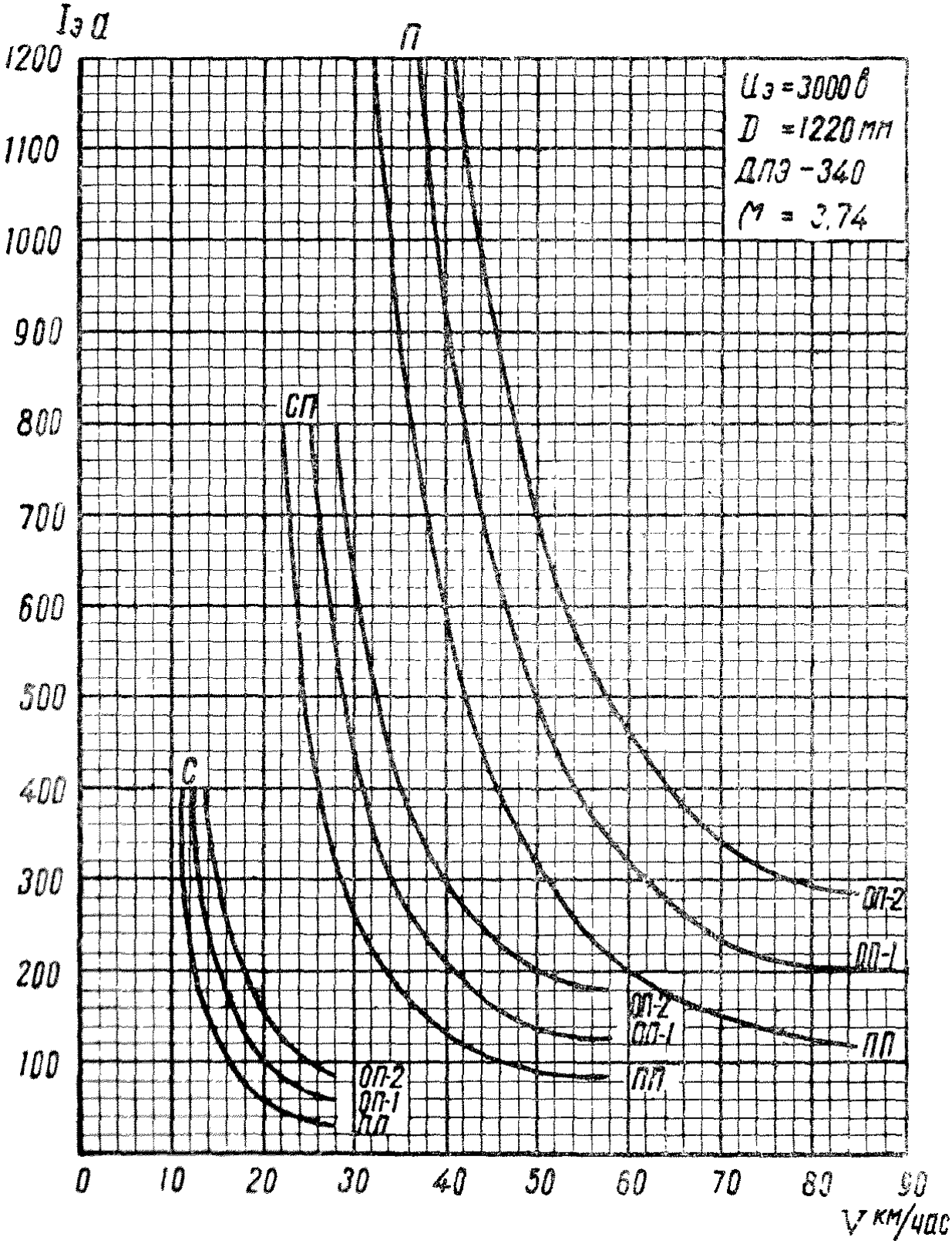


Рисунок Є.1 –Залежності струму електровозу ВЛ-19 від його швидкості.

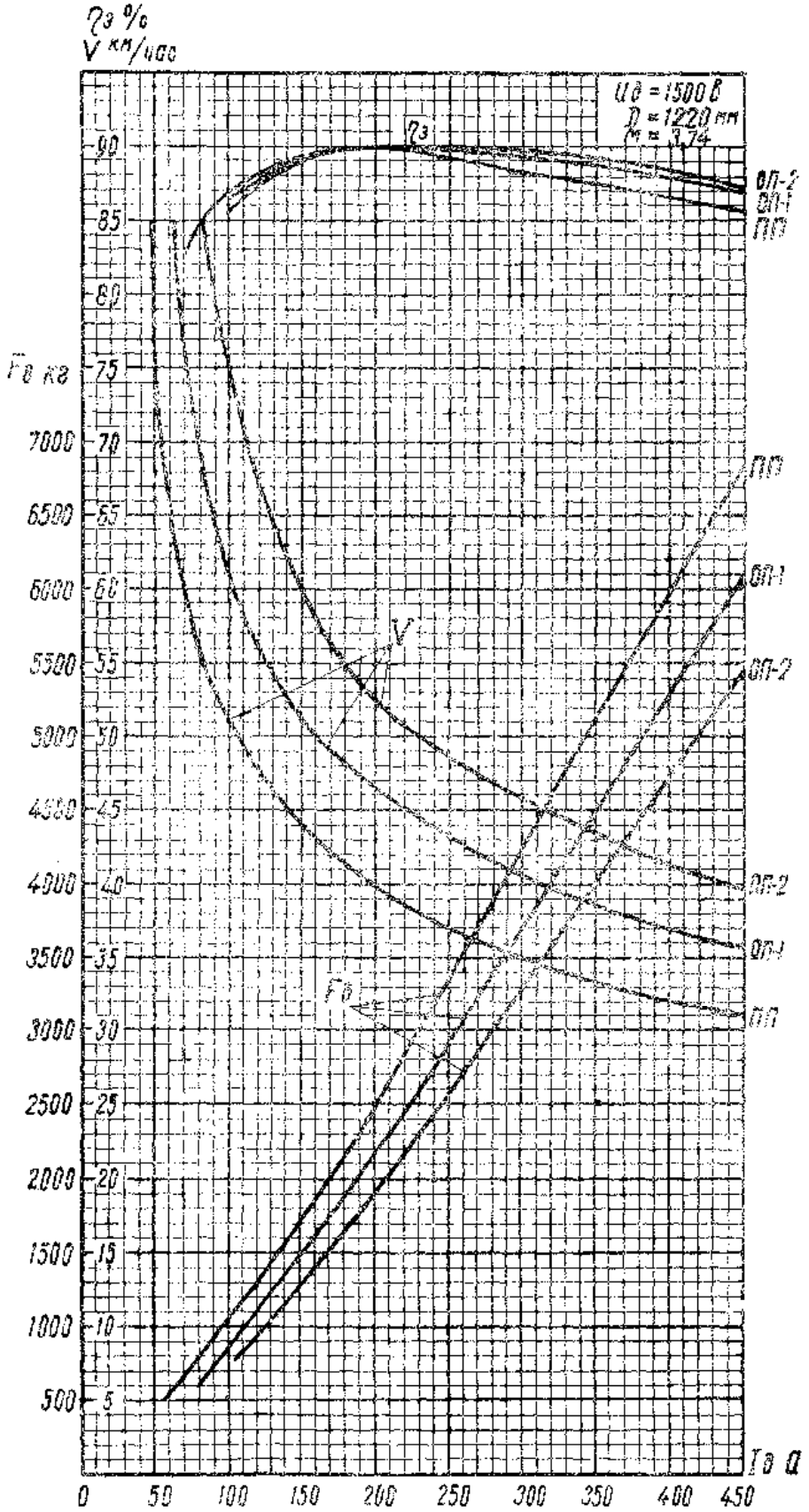


Рисунок Є.2 –Електромеханічні характкетристики тягових двигунів ДПЄ-340А

ДОДАТОК Ж

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА, ЩО РЕАЛІЗУЄ ЗАХИСТ ФІДЕРІВ ЗА ПРИРОСТОМ СТРУМУ

Структура системи, елементна база та вимоги, що висуваються до неї

Структура спроектованої системи представлена на рис. Ж.1 [292, 293]. Система складається з двох частин: високовольтний обчислювальний пристрій (ВОП) і низьковольтний обчислювальний пристрій (НОП). Таке розділення необхідне для забезпечення безпеки оперативного персоналу, який працюватиме з даною системою.

ВОП виконує аналіз на КЗ, використовуючи алгоритми максимального струмового захисту МКСЗ і імпульсного захисту і виконує управління роботою ШВ слідуючи результатам цього аналізу. На порт мікроконтролера також підводяться сигнали, які вказують стан схеми вмикання ШВ. Це сигнали: ВКЗ – сигнал від випробувача коротких замикань, після вимикання ШВ блок ВКЗ виконує опитування ТМ на наявність стійкого КЗ і якщо воно присутнє, то цим сигналом забороняється включення ШВ; ШР – шинний роз'єднувач; ЛР – лінійний роз'єднувач; ЛРКМ – лінійний роз'єднувач КМ; ОР – роз'єднувач відсмоктувача (нормальний стан останніх – ввімкнений); ЗР – земляний роз'єднувач; ЗЗ – земляний захист (нормальний стан – вимкнений).

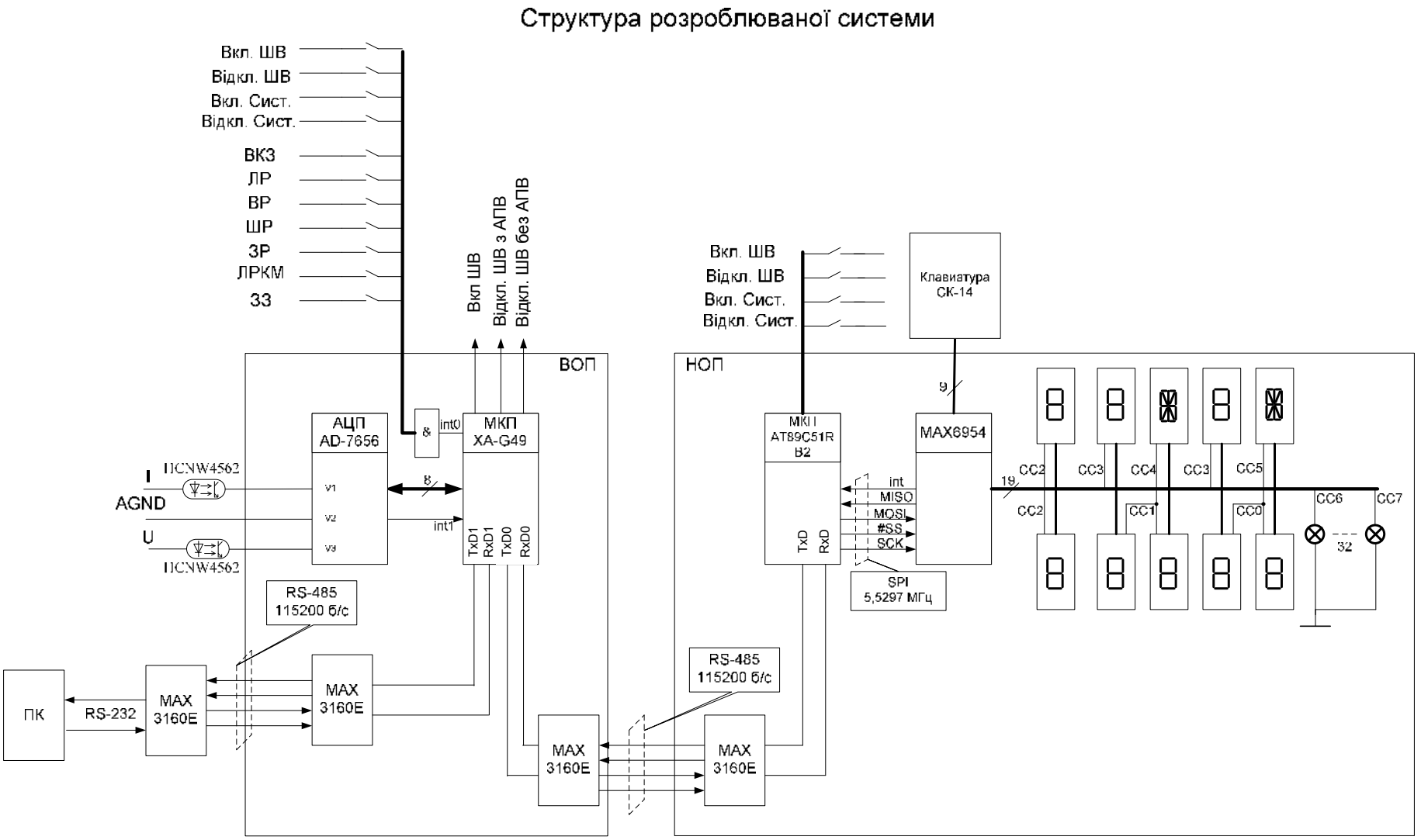


Рисунок Ж.1 – Структура проектованої системи

АЦП є одним з основних елементів системи, від якого залежить її швидкодія (основна вимога до подібних систем). У якості АЦП ВОП було вибрано кристал AD7656 фірми Analog Device [294], який володіє такими характеристиками: біполярність для можливості вимірювання струму двох напрямів; 16 розрядів – для забезпечення точності вимірювання до 20 А при максимальних вимірюваних струмах від -5000А до +5000А; малий час перетворення (3,1 мкс), оскільки за 0,8 мс потрібно виконати 16 вимірів струму, включаючи час обробки кожної виміряної величини; 6 – каналів, які поділені на 3 групи по 2 канали, це необхідно оскільки, окрім струму, необхідно також вимірювати значення напруги і аналогового нуля. Канали, що входять до однієї групи запускаються на перетворення одночасно. Запуск на перетворення здійснюється трьома входами CONVSTA, CONVSTB і CONVSTC. Усі канали також можна запустити на перетворення одночасно, якщо на три входи запуску подати активний сигнал; обмін з мікроконтролером може проводитися як по послідовному SPI-інтерфейсу, так і по 8-, 16-розрядному паралельному. Спосіб обміну вибирається настроюванням виходів БІС. Оскільки аналогова величина перетворюється в цифрову не миттєво, то на протязі вищезазначеного часу сигнал на вході АЦП повинен підтримуватися постійним [295], тому аналоговий вхід має пристрій вибірки-зберігання (Track-and-Hold (T/H) – стеження-зберігання). Сигнал на виході T/H пропорційний сигналу на вході до тих пір, доки не поступить команда запам’ятовування, після якої сигнал на виході залишається сталим до тих пір доки не буде виконано перетворення. Також АЦП підтримує програмне настроювання своїх основних параметрів функціонування, у тому числі і кількість працюючих каналів, і межі значень вхідної аналогової напруги. В результаті дана система достатньо гнучка у плані переналагодження при роботі на фідер обслуговуючим персоналом тягової підстанції і працівниками ремонтно-ревізійного цеху дистанції електропостачання дороги. Внутрішня структура АЦП зображена на рис. Ж.2 [296].

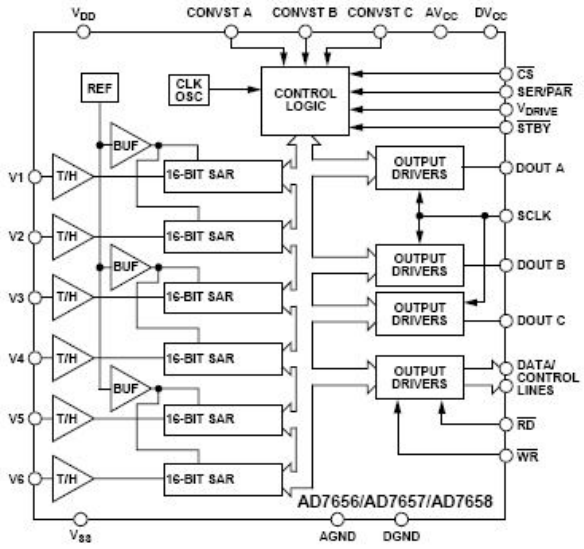


Рисунок Ж.2 – Внутрішня структура АЦП 7656

В якості мікроконтролера ВОП вибрано XA-G49 фірми Philips з такими характеристиками: чотири 8-бітові порти вводу/виводу; підтримує частоту зовнішнього тактового сигналу 30 МГц; наявність 16-розрядного арифметико-логічного пристрою, оскільки від АЦП поступатимуть 16-розрядні коди значень струму, напруги і аналогового нуля; два УАПП (UART) для того, щоб не використовувати додаткову зовнішню велику інтегральну схему синхронно-асинхронного передавача. Як видно із структурної схеми, один УАПП використовується для зв'язку з НОП, другий для зв'язку з персональним комп'ютером; час виконання однієї 3-тактової команди при частоті 30 МГц складає 100 нс. Це особливо важливо, оскільки даний мікроконтролер повинен забезпечувати мінімальний час реакції на аварійні режими роботи тягової мережі при аналізі за МСЗ при виникненні близького короткого замикання; 3 таймери-лічильники і сторожовий таймер: один для відліку часу між запусками АЦП на перетворення, другий для завдання частоти передачі по УАПП, третій для вимірювання триваліших інтервалів, таких як інтервали часу перед АПВ; 64К флеш-пам'яті програм для табличного розміщення заданої ОЗХ для алгоритму захисту за приростом струм (імпульсний захист); 2К RAM пам'яті; гнучка роботу з перериваннями (підтримує 38 джерел переривання з 8 пріоритетами). Контролер підтримує ISP програмування через

UART, що дозволяє перепрограмувати його, використовуючи звичайний ПК і програму WINISP. Ця функція дозволяє полегшити процес переналаштування уставок, часових інтервалів роботи АПВ, відліку часу. Внутрішня структура мікроконтролера показана на рис. Ж.3 [297].

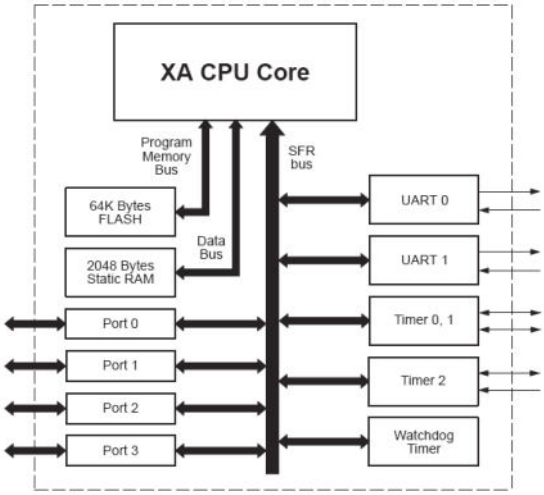


Рисунок Ж.3 – Структурна схема мікроконтролера XA-G49

Для забезпечення гальванічної розв’язки АЦП має бути з’єднане через оптрони з джерелами аналогових вимірюваних сигналів (вимірювальним колом шунта та додаткового резистора). Основні вимоги до оптрона: повинен пропускати аналоговий сигнал з мінімальною затримкою; забезпечувати захист від напруги мінімум 5000 В. Для опторозв’язки використовується оптрон HCNW4562 фірми Avago. Його характеристики: ширина смуги пропускання складає 9МГц; найбільший коефіцієнт посилення напруги - 3; протягом однієї хвилини витримує напругу 5000 В. Його структурна схема показана на рис. Ж.4 [298]. Розв’язаний сигнал повинен приходити на роз’єм, тому на схемі він не показаний.

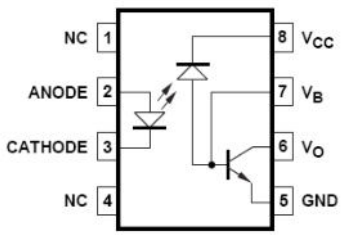


Рисунок Ж.4 – Структурна схема оптрона

Основними функціями НОП є прийом від ВОП інформаційних повідомлень або значень струму і напруги і відображення даної інформації на індикаторах і світлодіодах.

Основною вимогою до індикації є те, що вона має бути організована на базі звичайних сегментних індикаторах (ЖКІ монітори використовувати не можна), величиною не менш 2-х сантиметрів. Ця вимога ґрунтується на тому, що інформація має бути добре візуально представлена при недостатньому освітленні і з відстані не менше 7-10 метрів. Основне, що має бути - це 10 сегментних індикаторів (по 5 для відображення значень струму і напруги) і 32 діоди для відображення різних станів блокуючих сигналів, стану ШВ, стану ВОП тощо. Для виконання цих вимог використовується драйвер індикації MAX6954 фірми MAXIM.

Більш докладно схема та її складові описано у роботі [299].

Загальний опис алгоритму аналізу на коротке замикання

Аналіз проводиться за двома алгоритмами захисту: максимальний струмовий і імпульсний. Як відомо, МСЗ буває поляризованим і неполяризованим. У системі, що розроблена, реалізовано можливість вибору типу цього захисту шляхом її настроювання оператором. Програмна реалізація цього захисту проста: у певних елементах пам’яті містяться значення уставок спрацьовування ШВ для позитивного напряму струму і негативного (в разі поляризованої МСЗ). Ці уставки порівнюватимуться із поточним значенням струму $I_{\text{пот}}$ в ТМ. Для його отримання проводиться підряд шістнадцять запусків АЦП з подальшим читанням результату перетворення і на базі цих значень обчислюється їх середнє, яке надалі і використовуватиметься фоновою програмою для проведення порівняння із уставками.

У імпульсному захисті аналіз складніший і виконується тільки для позитивного напряму струму. Робота кожного ШВ характеризується його характеристикою спрацьовування. Для можливості ведення аналізу необхідно:

– захисну характеристику близьку до оптимальної записують в пам'ять мікроконтролера у вигляді вектора V_I: значення струму і відповідне йому значення уставки стрибка струму. Для підвищення швидкості пошуку уставки в даній таблиці і підвищення її точності необхідно, щоб кожному кодовому значенню поточного струму фідера, зчитаному з АЦП, в пам'яті було значення уставки. Таким чином в пам'яті необхідно мати 2^N значень уставок, де N – кількість значущих розрядів АЦП (без знакового розряду і нестійких молодших розрядів). У АЦП розробленої системи таких розрядів тринадцять. При налаштуванні системи оператор повинен задати точками вид кривої ХС, а потім по цих точках, застосовуючи алгоритм інтерполяції, отримують значення уставок ΔI для решти значень струму. Тепер пошук уставки ΔI для значення поточного струму ТП $I_{\text{пот}}$, яке підраховується як було описано в першому абзаці, зводиться до вибору значення з пам'яті за адресою (BaseΔI+$I_{\text{ТЕК}}$), де BaseΔI – базова (початкова) адреса таблиці значень уставок ΔI. Кожен елемент цієї таблиці займає два байти;

– для обробки необхідний робочий масив виміряних струмів $V_I^{\text{р}}$. Розмір кожного елементу масиву – 2 байти. Масив $V_I^{\text{р}}$ – це історія значень виміряних струмів за час, відповідний найповільнішому перехідному процесу КЗ (таким є віддалене КЗ). Між заповненнями двох сусідніх елементів цього масиву проходить інтервал часу рівний $T_{\text{обр}}$, т.ч. знаючи час перехідного процесу і час $T_{\text{обр}}$ можна розрахувати довжину цього буферного масиву – *k*. Масив $V_I^{\text{р}}$ є закільцьованим: якщо поточне значення виміряного струму було занесене в елемент з номером (*N-1*) (нумерація ведеться з нуля), то наступне значення струму буде записано в елемент з номером нуль (*N* – кількість елементів масиву).

Аналіз на коротке замикання ведеться таким чином:

– отримати з АЦП поточне усереднене значення струму $I_{\text{пот}}$ і записати його в і-ий елемент масиву $V_I^{\text{р}}$;

– коли мине час рівний $k \cdot T_{\text{обр}}$ в елемент масиву $V_I^{\text{р}}$ з номером (i+k) буде записаний виміряний в той момент струм. Оскільки k відповідає найбільш повільному процесу КЗ, то необхідно провести k операцій віднімання елементу (i+k) масиву $V_I^{\text{р}}$ з попередніми елементами до елементу з номером i, починаючи з (i+k-1)-го. Після кожного віднімання з j-им елементом його результат ΔI_j необхідно порівняти із значенням уставки $\Delta I_j^{\text{у}} = V_I\left[V_I^{\text{р}}\left[j\right]\right]$. Так гарантується фіксація більш швидкоплиних процесів короткого замикання, ніж той, час якого закладений в число k. Якщо $\Delta I_j > \Delta I_j^{\text{у}}$, то видається команда на вимикання ШВ.

Пояснення всіх термінів часу дано на рис. Ж.5

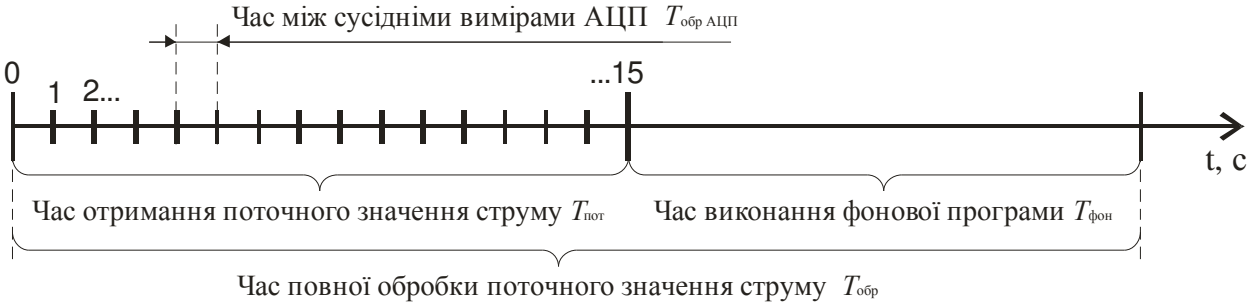


Рисунок Ж.5 – Пояснення позначень часових інтервалів

На рис. Ж.5 час: $T_{\text{обр АЦП}}$ включає час запуску АЦП на перетворення, час перетворення, яке визначається швидкодією АЦП і час виконання обробника переривань від АЦП; час виконання фонової програми $T_{\text{фон}}$ залежить від того, скільки їй доведеться виконувати операцій і є фіксованим для даного настроювання системи. Час $T_{\text{пот}}$ час отримання поточного середнього значення фідерного струму після шістнадцяти вимірів.

Багаторічний досвід експлуатації пристроїв електропостачання показав, що значна частка КЗ, викликаних перекриттям ізоляції, схлестуванням проводів, грозовими розрядами, шунтуванням ізоляції птахами і іншими причинами, при достатньо швидкому вимиканні пошкодженого обладнання або ділянки електричної мережі, самоусуваються. При цьому електрична ду-

га, що виникла в місці КЗ, гасне, не встигнувши спричинити руйнувань, що перешкоджають вмиканню. Такі пошкодження, що самоусуваються, прийнято називати нестійкими, а кількість їх складає 70-80% загального об'єму пошкоджень.

У системі, що розроблено, припускається, що на ТП є випробувач коротких замикань (ВКЗ), який при аварійному вимиканні ШВ аналізує його причину. Якщо з ВКЗ надходить сигнал, вказуючий, що сталося стійке КЗ, то автоматичне повторне включення ШВ не виконується. В іншому випадку система проводитиме три спроби повторного вмикання ШВ: через інтервал часу тривалістю до 1 с; через інтервал часу тривалістю з 2 до 5 с; через інтервал часу тривалістю до 10 с.

ДОДАТОК З

РОЗРАХУНОК СОБІВАРТОСТІ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ФІДЕРІВ 3,3 кВ

У роботі запропоновано декілька схемних рішень мікропроцесорних систем визначення короткого замикання в системі тягового електропостачання постійного струму. При виготовленні такої системи що реагує, на приклад, на швидкість зменшення фідерної напруги виникають наступні витрати: капітальні витрати на устаткування; витрати на розробку програмного забезпечення.

Капітальні витрати на устаткування розраховуються по формулі:

$$K = \sum_{i=1}^{n} K_i + K_i \cdot 0,02 + K_i \cdot 0,05,$$

де K_i – вартість k-го елементу системи; n – кількість елементів у системі; 0,02 – коефіцієнт, що враховує витрати на монтаж устаткування; 0,05 – коефіцієнт, що враховує ремонт устаткування.

Розрахунок капітальних витрат на апаратне забезпечення системи наданий у таблиці З.1.

Витрати на споживану системою електроенергію під час її роботи у фідерній чарунці на ТП розраховуються по формулі:

$$E_c = M_c \cdot T_c \cdot K_c \cdot C_e = 1,074 \cdot 8760 \cdot 1 \cdot 0,66 = 6209,44 \text{ (грн)},$$

де: M_c – потужність споживання електроенергії; T_c – кількість годин роботи системи на рік; K_c – коефіцієнт використання системи; C_e – вартість електроенергії (для залізниці дорівнює 0,66 грн.);

Для визначення витрати на розробку програмного забезпечення приймаються наступні умови: програмне забезпечення розробляється одним програмістом. У ході розробки останній консультується з керівником; планований термін розробки - 3 місяці. Витрати на розробку вищезгаданого

програмного продукту складаються з: витрат на заробітну плату керівника й виконавця; нарахування на заробітну плату; виробничі витрати.

Таблиця 3.1

Розрахунок капітальних витрат на апаратні засоби

№	Найменування елемента система	Кількість, шт.	Вартість однієї шт, грн.	Вартість, грн.
1	2	3	4	5
1.	Контролер ATmega 8515-16 PU	1	44,94	44,94
2.	Гальванічна опто розв'язка HCNR 200	1	21,25	21,25
3.	Резистор	8	0,3	2,4
4.	Конденсатор	6	0,35	2,1
5.	Транзистор 2N3904	2	0,5	1,0
6.	Транзистор 2N3906	2	0,3	0,6
7.	Аналого-цифровий перетворювач MAX 1165	1	170	170
8.	Кварцевий резонатор КХ-13Т (16 МГц)	1	14	14
9.	Світлодіод	3	0,25	0,75
10.	Кнопка	1	1	1
11.	Провідники	1	5	5
Разом				263,04

Фонд оплати праці розраховується за формулою:

$$ЗП = ЗП_{кер} + ЗП_{вик},$$

де $ЗП_{кер}$ – заробітна плата керівника; $ЗП_{вик}$ – заробітна плата виконавця.

Заробітна плата керівника розраховується по формулі:

$$ЗП_{кер} = \Delta T_{кер} \cdot О_{кер} \cdot T,$$

де T – тривалість розробки програмного забезпечення 3 місяці; $О_{кер}$ - оклад керівника 3500 (грн); $\Delta T_{кер}$ – частка витрат робочого часу керівника на керівництво розробкою в середньомісячному фонді робочого часу:

$$\Delta T_{кер} = \frac{T_{кер}}{Ф_{кер}} = \frac{20}{(3 \cdot 170)} = 0,04,$$

де $T_{кер}$ – витрати робочого часу керівника проекту на весь період розробки програмного забезпечення 20 (година); $Ф_{кер}$ – середньомісячний фонд робочого часу (місячний фонд робочого часу) 170 (година/місяць).

Тоді отримаємо заробітну платню керівника проекту:

$$ЗП_{кер} = 0,4 \cdot 3500 \cdot 3 = 420 \text{ (грн).}$$

Заробітна плата виконавця розраховується по формулі:

$$ЗП_{вик} = \Delta T_{вик} \cdot О_{вик} \cdot Т,$$

де $О_{вик}$ – місячний оклад виконавця 720 (грн); $\Delta T_{вик}$ – частка витрат робочого часу виконавця в середньомісячному фонді робочого часу:

$$\Delta T_{вик} = \frac{T_{вик}}{Ф_{вик}} = \frac{(3 \cdot 132)}{(3 \cdot 170)} = 0,78,$$

де $T_{вик}$ – втрати робочого часу виконавця проекту 132 (година/місяць); $Ф_{вик}$ – середньомісячний фонд робочого часу виконавця 170 (година/місяць).

Визначимо заробітну платню розробника програмного забезпечення:

$$ЗП_{вик} = 0,78 \cdot 720 \cdot 3 = 1684,8 \text{ (грн).}$$

Тоді фонд оплати праці складе:

$$ЗП = ЗП_{кер} + ЗП_{вик} = 420 + 1684,8 = 2104,8 \text{ (грн).}$$

Нарахування на фонд оплати праці становлять 37,51%:

$$Н = 0,3751 \cdot ЗП = 0,3751 \cdot 2104,8 = 789,51 \text{ (грн)}$$

Виробничі витрати обчислюються за формулою:

$$ВВ = В_{П},$$

де $В_{П}$ – витрати на проектування й налагодження (грн).

Виробничі витрати складаються з витрат на оплату машинного часу на програмування і налагодження програмних засобів. Оплати машинного часу на програмування й налагодження визначається за формулою:

$$В_{П} = Т_{маш} \cdot Ц, \qquad (3.1)$$

де $Ц$ – ціна 1 машино-часа корисного часу (грн); $Т_{маш}$ – витрати часу на проектування й налагодження або кількість машино-часів корисного часу на

програмування й налагодження за весь термін розробки (робочих днів 35 по 6 годин роботи щодня) $T_{маш} = 35 \cdot 6 = 210$ (год).

Як вартість машинного часу можуть виступати наступні показники: виробнича собівартість машинного часу, повна собівартість машинного часу, відпускна вартість машинного часу.

Виробнича вартість машинного часу визначається наступними статтями витрат:

1. Матеріали. Сюди входить вартість матеріалів, використовуваних при експлуатації засобів обчислювальної техніки для виконання замовлень користувачів. Ці витрати становлять 5% від загальної вартості продукту.

2. Основна заробітна плата розроблювачів. Містить у собі витрати на заробітну плату фахівців, що беруть участь у виконанні робіт. Становить 18% від фонду оплати праці фахівців, що беруть участь у розробці.

3. Додаткова заробітна плата. Містить у собі витрати на недопрацювання на виробництві розроблювачів; оплата чергових і додаткових відпусток компенсацію за невикористання відпусток: оплату часу, пов'язаного з виконанням державних обов'язків. Становить 10% від основної (п. 2)

4. Відрахування на основну й додаткову заробітну плату. Відрахування від зарплати складають 39,03% від загальної суми основної і додаткової зарплати.

5. Витрати на зміст і експлуатацію встаткування. Містить у собі наступні витрати: амортизація устаткування, становить 25% від вартості технічних засобів; оплата електроенергії для технічних потреб; технічне обслуговування устаткування крім витрат на поточний ремонт становлять 1% від вартості проекту; поточний ремонт устаткування становлять 0,5 % від вартості проекту.

6. Загальновиробничі витрати за; матеріали і електроенергію, а також амортизація устаткування. Розподіл загальновиробничих витрат між різними видами робіт і послуг виробляється пропорційно сумі основної

заробітної плати виробничих робітників, і витрати на зміст і експлуатацію устаткування. Загальновиробничі витрати – 25% від основної зарплати

7. Виробнича собівартість визначається сумою розрахованими по п. 1…6.

8. Позавиробнича витрати – 5% від основної зарплати.

9. Повна собівартість визначається сумою розрахованими по п. 7, 8.

Оплата електроенергії для технічних потреб.

$$E_{\text{ф}} = P \cdot T \cdot Ц = 1{,}074 \cdot 210 \cdot 0{,}66 = 148{,}86 \text{ (грн)},$$

де P – споживана потужність 1074 Вт; $Ц$ – вартість одного $кВт/год$ електроенергії 0,66 копійок.

Капітальні витрати на створення продукту «мікропроцесорна система визначення короткого замикання в системі тягового електропостачання постійного струму за швидкістю зменшення фідерної напруги» включають витрати на придбання комп'ютера й витрати на програмне забезпечення.

$$K_{\text{тз}} = ПК + ПЗ = 8600 + 2056 = 10565 \text{ (грн)}.$$

Якщо у вартості машинного часу не враховувати вартість самого ПК (прийняти, що ПК уже є в наявності), то вартість програмного забезпечення значно зменшиться.

Вартість однієї машинної години:

$$З = \frac{ПС}{\left(T_{\text{норм}} \cdot N_{\text{рд}}\right)} = \frac{4174{,}47}{\left(6 \cdot 300\right)} = 2{,}32 \text{ (грн)},$$

де $T_{\text{норм}}$ – тривалість робочого дня 6 годин; $N_{\text{рд}}$ – кількість робочих днів на рік 300.

Тоді згідно формули (3.1) $B_{\text{П}} = T_{\text{маш}} \cdot Ц = 210 \cdot 2{,}32 = 487{,}2$ (грн).

Прямі виробничі витрати:

$$ПВ = T_{\text{маш}} \cdot Ц + ЗП \cdot 0{,}02 = 210 \cdot 2{,}32 + 0{,}02 \cdot 2104{,}8 = 529{,}3 \text{ (грн)}.$$

Прибуток становить 20% від всіх витрат, тобто:

$$П = \left(ЗП + Н + B_{\text{П}} + ПВ\right) \cdot 0{,}2 =$$

$$= \left(2104{,}8 + 789{,}51 + 487{,}2 + 529{,}3\right) \cdot 0{,}2 = 781{,}54 \text{ (грн)}.$$

В таблиці 3.2 представлено розрахунок вартості однієї машино-години під час розробки програмного забезпечення.

Таблиця 3.2

Планова калькуляція однієї машинної години ПЕОМ

№пп	Найменування статей витрат	Розмір витрат, грн.
1.	Матеріали	532,8
2.	Основна зарплата розроблювачів	378,86
3.	Додаткова зарплата розроблювачів	37,9
4.	Відрахування на основну й додаткову Зарплату	162,66
5.	- Витрати на амортизацію встаткування - Оплата електроенергії для технічних потреб - Витрати на технічне обслуговування, крім витрат на поточний ремонт - Витрати на поточний ремонт Разом по п. 5	2641,25 148,86 105,65 52,83 2948,59
6.	Загальновиробничі витрати	94,72
7.	Виробнича собівартість	4155,53
8.	Позавиробничі витрати	18,94
9.	Повна собівартість (ПС)	4174,47
10.	Вартість однієї машинної години	2,32

Виробничі витрати на створення програмного продукту «мікропроцесорна система визначення короткого замикання в системі тягового електропостачання постійного струму за швидкістю зменшення фідерної напруги» наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Кошторис виробничих витрат на створення програмного продукту

№пп	Найменування статей витрат	Розмір витрат, грн.
1.	Фонд оплати праці (ФОП)	2104,8
2.	Відрахування від ФОП (37,51%)	789,51
3.	Прямі виробничі витрати (*ПВ*)	529,3
4.	Загальновиробничі витрати (25% від ФОП)	526,2
5.	Прибуток	781,54
6.	ПДВ	823,64
7.	Інші видатки (10% від ФОП)	210,48
Усього витрат по кошторису		5765,47

ПДВ становить 20% від суми всіх витрат:

$$ПДВ = \left(ЗП + Н + В_{П} + ПВ + ІВ\right) \cdot 0,2 =$$

$$= \left(2104,8 + 789,51 + 487,2 + 529,3 + 210,48\right) \cdot 0,2 = 823,64 \text{ (грн)}$$

Виробничі витрати на створення системи «мікропроцесорна система визначення КЗ в системі тягового електропостачання постійного струму за швидкістю зменшення фідерної напруги» наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Кошторис капітальних витрат на створення системи

№пп	Найменування статей витрат	Розмір витрат, грн.
1.	Фонд оплати праці (ФОП)	2104,8
2.	Відрахування від ФОП (37,51%)	789,51
3.	Виробничі витрати (витрати на оплату машинного часу (2% від ФОП))	42,1
4.	Інші видатки (10% від ФОП)	210,48
5.	Загальновиробничі витрати (25% від ФОП)	526,2
6.	Капітальні витрати на розробку програмного забезпечення без врахування ПДВ	487,2
7.	ПДВ (20%)	97,44
8.	Капітальні витрати на створення програмного продукту	584,64
9.	Капітальні витрати на апаратне забезпечення	263,04
10.	Усього витрат по кошторису	5123,46

Під час проведення техніко-економічного розрахунку системи «Мікропроцесорна система визначення КЗ в СТЕП постійного струму за швидкістю зменшення фідерної напруги» було встановлено, що собівартість програмного продукту становить 584,64 грн, а вартість апаратної частини становить 263,04 грн. Загальна вартість програмного продукту та апаратної частини складає 847,64 грн.