

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет
Залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

На правах рукопису

ЖУРАВЛЬОВ АНТОН ЮРІЙОВИЧ

УДК 656.256.3: 621.316.91

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ
РЕЙКОВИХ КІЛ ПОЛІГОНУ ЕЛЕКТРОТЯГИ ЗМІННОГО СТРУМУ,
який примикає до станції стикування**

05.22.20 - експлуатація та ремонт засобів транспорту

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник: д.т.н., проф. Разгонов Адам Пантелейович

м. Дніпро
2016

Зміст

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД УМОВ РОБОТИ РЕЙКОВИХ КІЛ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ	12
1.1 Загальні відомості про умови роботи РК на станції стикування	12
1.2 Статистичний огляд відмов систем автоматики, телемеханіки та зв'язку на ділянках доріг	17
1.3 Пункти стикування тягових систем змінного і постійного струму	22
1.3.1 Побудова станції стикування	24
1.3.2 Блочна централізація на станціях стикування електротяги постійного і змінного струмів.....	26
1.4 Рейкові кола району станції стикування двох родів електротяги	28
1.4.1 Станційні фазочутливі рейкові кола частотою 25 Гц з реле типу ДСШ	29
1.4.2 Перегінні кодові рейкові кола 25 Гц	31
1.4.3 Статистичний огляд відмов апаратури рейкових кіл полігону змінного струму, який примикає до станції стикування.....	32
1.5 Аналіз тягового струму в рейковій мережі району станції стикування	33
1.6 Постановка задач дисертаційного дослідження.....	38
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ СТРУМІВ І ПОТЕНЦІАЛІВ В РЕЙКОВИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ДІЛЯНОК.....	40
2.1 Аналітична оцінка характеру розподілу постійних струмів в рейкових мережах електрифікованих ділянок змінного струму в зоні станції стикування.....	40
2.1.1 Нормальний режим роботи тягової підстанції.....	43
2.1.2 Вимушений режим роботи тягової підстанції	45
2.2 Експериментальне дослідження струмів і потенціалів рейкового кола на ділянках змінного струму при нормальному і вимушенному режимі роботи тягової підстанції.....	48
2.3 Розрахунок небезпечного потенціалу на ізоляючому стику	54

2.4 Висновки за розділом 2.....	57
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ФЕРОМАГНІТНОМУ ОСЕРДІ ДРОСЕЛЬ-ТРАНСФОРМАТОРА.....	59
3.1 Комп'ютерне моделювання.....	59
3.2 Аналіз методів моделювання кривої намагнічування.....	62
3.3 Методи визначення коефіцієнтів апроксимації основної кривої намагнічування	72
3.4 Моделювання петлі магнітного гістерезису.....	80
3.5 Математична модель перемагнічування феромагнетику в паралельному магнітному полі	94
3.6 Побудова математичної моделі магнітного гістерезису	96
3.7 Модель дросель-трансформатора на основі отриманої апроксимації	102
3.8 Розрахунок основних режимів роботи РК з урахуванням підмагнічування ДТ на релейному та живлючому кінцях	109
3.8.1 Загальні відомості про режими роботи рейкових кіл.....	109
3.8.2 Нерозгалужене фазочутливе РК 25 Гц.....	111
3.8.3 Нерозгалужене кодове РК 25 Гц.....	114
3.9 Висновки за розділом 3.....	117
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ПРИСТРОЇ СЦВ НА ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ДІЛЯНКАХ ЗМІННОГО СТРУМУ, ЩО ПРИМИКАЮТЬ ДО СТАНЦІЇ СТИКУВАННЯ.....	119
4.1 Напрямки вирішення проблеми.....	119
4.2 Захист рейкових кіл ділянок тяги змінного струму від заважаючого впливу тягових постійних струмів	120
4.3 Схема керування СЗКБ дросельного пункту.....	122
4.4 Розрахунок схеми контролю віддалення хвоста поїзда	127
4.5 Зміна координати підключення зворотного проводу тягові підстанції постійного струму	134
4.6 Висновки за розділом 4.....	137

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ РЕЙКОВИХ КІЛ ДЛЯНКИ ЕЛЕКТРОТЯГИ ЗМІННОГО СТРУМУ, ЯКА ПРИМИКАЄ ДО СТАНЦІЇ СТИКУВАННЯ ДВОХ РОДІВ ТЯГОВОГО СТРУМУ	139
5.1 Розрахунок капітальних вкладень в обладнання дільниці силовим захисним комутуючим блоком.....	140
5.2 Розрахунок економічної ефективності впровадження пристрою захисту рейкових кіл від завад тягового струму	141
5.3 Висновки за розділом 5.....	145
ВИСНОВКИ	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	148
ДОДАТКИ	163

ВСТУП

Актуальність теми. На системи залізничної автоматики й телемеханіки (СЗАТ), одним з елементів яких є рейкові кола (РК), покладена важлива роль у забезпеченні безпеки руху поїздів. Рейкові кола схильні до впливу дестабілізуючих чинників, таких як кліматичні умови, електромагнітні завади тягового струму рейкової мережі. У районі станції стикування двох родів електричної тяги рейкові кола полігону електротяги змінного струму зазнають додаткового впливу завад постійного тягового струму. Це значно зменшує експлуатаційну надійність роботи рейкових кіл, призводить до їх відмов та перекриття світлофорів і, як наслідок, до затримки руху поїздів.

Таким чином, підвищення експлуатаційної надійності роботи рейкових кіл полігону електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування, в умовах впливу завад постійного тягового струму є важливим науково-практичним завданням, вирішення якого дозволить організувати технологічний процес перевезень з максимальною ефективністю й безпекою руху поїздів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами. Дисертаційна робота відповідає пріоритетним напрямкам розвитку залізничного транспорту, які визначені у «Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року» (постанова КМУ від 16.12.2009 № 1555-р), а також пов'язана з науково-дослідною роботою, що виконана Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна «Дослідження і розробка інтегрованої комп'ютерної системи оптимізації перевезень, енергозбереження, безпеки руху та інтелектуалізації процедур управління залізничним транспортом України» (0114U005164), у якій дисертант є співавтором звіту.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення експлуатаційної надійності та електромагнітної сумісності рейкових кіл із системою тягового електропостачання залізниць в умовах впливу завад

зворотного постійного тягового струму станції стикування двох родів електричної тяги.

Для досягнення зазначеної мети в дисертації необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз: роботи рейкової мережі полігону електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування, в умовах впливу завад постійного тягового струму в нормальному й вимушенному режимах роботи тягових підстанцій (ТП); існуючих засобів підвищення експлуатаційної надійності рейкових кіл і забезпечення електромагнітної сумісності пристрійв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) із системою тягового електропостачання станції стикування;

- розробити узагальнену модель поширення тягового струму й потенціалів рейкової мережі, яка враховує зміну опору ізоляції рейкової мережі, рейкову лінію з/без урахування стикових з'єднувачів різного типу, колійний розвиток ділянки, режими роботи тягових підстанцій, поїзну ситуацію;

- розробити математичну модель, яка описує електромагнітні процеси при дослідженнях роботи феромагнетиків (ФМ), та оцінити електричні параметри в об'єктах з феромагнетиком, що працюють у нелінійній області основної кривої намагнічування $B(H)$, проаналізувати вплив завад постійного тягового струму на нормальну роботу апаратури рейкових кіл, удосконалити метод розрахунку режимів роботи рейкових кіл;

- розробити й науково обґрунтувати метод і засіб захисту рейкових кіл полігону електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування, від завад зворотного постійного тягового струму;

- виконати техніко-економічну оцінку впровадження результатів дисертаційної роботи.

Об'єкт дослідження – процес роботи рейкових кіл систем автоматики і телемеханіки в умовах впливу завад постійного тягового струму.

Предмет дослідження – методи й засоби підвищення експлуатаційної надійності роботи рейкових кіл полігону електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування.

Методи дослідження. У роботі під час розробки та дослідження узагальненої моделі поширення тягового струму й потенціалів використовувалися методи вузлових напруг, контурних струмів та математичного моделювання на електронно-обчислювальній машині (ЕОМ) в пакетах Maple і Visual Studio, імітаційне моделювання із застосуванням пакета MapleSim, методи розв'язання систем лінійних рівнянь, числові методи; для розробки й дослідження математичної моделі роботи феромагнетика використовувалися методи рівнянь Кірхгофа та математичного моделювання на електронно-обчислювальній машині в пакетах Maple і Visual Studio, імітаційне моделювання із застосуванням пакетів MapleSim і Multisim, статистичного аналізу, методи розв'язання лінійних і нелінійних диференціальних рівнянь, аналізу й синтезу електротехнічних процесів у колах з нелінійними й лінійними елементами, методи перетворення схем заміщення; в експериментальних дослідженнях використовувалися методи фізичного моделювання, натурні випробування, цифрова обробка сигналів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в новому вирішенні науково-прикладного завдання підвищення експлуатаційної надійності роботи рейкових кіл в умовах впливу завад, створених тяговими струмами двох систем електротяги.

Вперше:

- розроблено математичну модель електричних процесів у рейковій мережі станції стикування двох родів електричної тяги й полігону електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування, яка дозволила отримати й дослідити поширення тягового струму та потенціалів «рейка–земля» в рейковій мережі в районі станції стикування залежно від режиму роботи й кількості тягових підстанцій, опору ізоляції рейкової мережі, колійного розвитку ділянки, поїздної ситуації, з/без урахування стикових з'єднувачів;

- розроблено метод розрахунку основних режимів роботи рейкових кіл, який дозволяє враховувати лінійний і нелінійний режими роботи апаратури рейкових кіл, що містять феромагнетики, а також оцінити характер зміни параметрів рейкового кола залежно від впливу завад тягового струму на апаратуру;

- розроблено метод підвищення експлуатаційної надійності рейкових кіл полігону електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування, шляхом виключення розтікання тягового струму станції стикування в сторону рейкової мережі полігону електротяги змінного струму.

Удосконалено:

- метод розрахунку поширення потенціалів і струмів у рейковій мережі, що враховує різний колійний розвиток ділянки, рейкову лінію з/без урахування стикових з'єднувачів різного типу, режими роботи й кількість тягових підстанцій, зміну опору ізоляції рейкової лінії, що дозволяє з більшою точністю оцінити значення тягового струму й потенціалу, раціонально розподілити підключення тягових підстанцій до рейкової мережі по ділянці.

- математичну модель магнітопроводу дросель-трансформатора, яка, на відміну від існуючих моделей, дозволяє відшукати раціональну апроксимуючу функцію основної кривої намагнічування.

Набули подальшого розвитку:

- спосіб захисту апаратури систем залізничної автоматики й телемеханіки від впливу завад зворотного постійного тягового струму шляхом блокування розтікання тягового струму на проблематичну ділянку, що дозволило підвищити експлуатаційну надійність роботи рейкових кіл і електромагнітну сумісність пристрій сигналізації, централізації та блокування із системою електропостачання на залізничному транспорті;

- метод розрахунку основних режимів рейкових кіл з урахуванням нелінійного режиму роботи елементів апаратури рейкових кіл, які містять феромагнетики, що дозволить внести зміни в нормативну документацію з розрахунку й проектуванням рейкових кіл.

Практичне значення отриманих результатів. Наукові положення, висновки, рекомендації, розрахунки, розроблені методи, отримані в дисертаційній роботі, а також змодельований пристрій можуть використовуватися:

- для оцінки впливу завад тягового струму на роботу пристрійв апаратури систем залізничної автоматики й телемеханіки, які містять феромагнетики, та уточнення нормалей регулювальних таблиць рейкових кіл;
- під час формульовання рекомендацій для забезпечення нормальнії роботи пристрійв сигналізації, централізації та блокування на електрифікованих ділянках змінного струму, які примикають до станції стикування двох родів електричної тяги;
- у ході проектування та переобладнання перегонів новими системи залізничної автоматики й телемеханіки;
- під час проектування тягової мережі станції стикування двох родів електричної тяги.

За результатами дисертації в науково-дослідній лабораторії кафедри АТЗ ДНУЗТ, Знам'янській дистанції сигналізації та зв'язку Одеської залізниці та П'ятихатській дистанції сигналізації та зв'язку Придніпровської залізниці виготовлено зразки силового захисного комутуючого пристрою, що пройшли випробування в науково-дослідній лабораторії кафедри АТЗ ДНУЗТ та в П'ятихатській дистанції сигналізації та зв'язку й були передані на Одеську залізницю.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри АТЗ ДНУЗТ під час викладання дисципліни «Системи автоматики на перегоні».

Особистий внесок здобувача. Усі положення й результати теоретичних та експериментальних досліджень, наведені в роботі, були отримані автором самостійно або за його безпосередньої участі.

Статті [35, 36] опубліковані одноосібно. У роботах, які вийшли друком у співавторстві, особистий внесок здобувача такий: здійснено експериментальні

дослідження тягових струмів і аналіз отриманих даних, використання моделі для отримання даних струму короткого замикання [104]; здійснено експериментальні дослідження параметрів і характеристик дросель-трансформаторів, виконано дослідження нелінійного диференціального рівняння трансформатора з використанням гіперболічних функцій апроксимації основної кривої намагнічування [36, 38]; запропоновано схему заміщення для отримання епюр поширення струмів і потенціалів рейкової мережі, побудовано математичну модель для отримання залежностей завад тягового струму в різному частотному спектрі [35]; запропоновано схему пристрою дослідження та обробки значень параметрів обмотки електричних машин [27, 58]; розроблено принципову схему пристрою захисту, виконано експериментальні дослідження запропонованого методу захисту рейкових кіл [87].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися й були схвалені на таких конференціях: Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту» (2006, 2009, 2014 pp.); Міжнародна науково-практична конференція «Перспективні системи контролю і управління на залізничному транспорті» (2007 p.); Міжнародна науково-практична конференція «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті EMC-R» (2007 p.), «Електромагнітна сумісність і безпека на залізничному транспорті EMCS-R» (2010, 2011 pp.), «Безпека і електромагнітна сумісність на залізничному транспорті S&EMC» (2012 p.); Всероссийской научно-практической конференции «Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы» (2015 p.). У повному обсязі робота доповідалася й була схвалена на міжкафедральному науковому семінарі 18 травня 2016 року.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 25 наукових праць: 6 наукових статей, з них 3 у виданнях, затверджених Департаментом атестації кадрів МОН України та включених до міжнародних наукометричних баз, 3 статті в іноземних виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз,

1 додаткова стаття; 8 патентів на корисну модель, 1 патент на винахід; 9 тез доповідей у матеріалах і тезах конференцій.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД УМОВ РОБОТИ РЕЙКОВИХ КІЛ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Загальні відомості про умови роботи РК на станції стикування

У системах залізничної автоматики і телемеханіки України та закордонних залізниць понад століття використовуються електричні РК в якості датчиків інформації про координати знаходження рухомої одиниці [8, 9, 19, 57, 63, 65, 97, 117]. Незважаючи на тенденцію переходу на іншу елементну [67, 102] базу, існуючі РК будуть експлуатуватися ще тривалий період. Зазначимо, нараховується понад ста тисяч рейкових кіл на дорогах України. Незважаючи на це, залишається невирішеною досить велика кількість питань, пов'язаних з підвищеннем безпеки функціонування та експлуатаційної надійності роботи пристрій СЦБ [37, 56, 81, 106, 109, 110, 127].

Сюди, перш за все, слід віднести коригування методів розрахунку рейкових кіл [36] з урахуванням інтенсивних завад тягового струму, що виникають у зв'язку з впровадженням на дорогах тягових силових агрегатів електровозів трифазного струму [1, 13, 29, 52]. Зауважимо тут, що принцип регулювання потужності тяги в режимі набору швидкості за допомогою таких агрегатів (перетворювачів) заснований на плаваючому регулювання частоти тягового струму від одиниць Гц до 60-80 Гц, при цьому низькі частоти проходять діапазон [5, 6, 32, 68, 71, 98], що співпадає з частотами сигнального струму 25-50-75 Гц, здійснюючи заважаючий і небезпечний вплив на роботу колійних приймачів. Крім цього робота силових приводів супроводжується не тільки зростанням струмів асиметрії тягового струму в рейкової лінії [108], а й створенням інтенсивного спектра вищих частот, які співпадають з інформаційними частотами тональних рейкових кіл [34, 35].

Іншою особливістю впливу завад тягового струму на РК є поява в його спектрі постійної складової та перенапруги [48], особливо в періоди ожеледі на контактній мережі [64]. Ця складова струму посилює заважаючий вплив постійного струму з рейкової мережі станції стикування, що проникає далеко в глиб полігону електротяги змінного струму (понад 30 км), насичує

магнітопровід колійних дросель-трансформаторів (ДТ) і порушує нормальнє функціонування пристройів СЦБ.

Таким чином, проблема, яка викликана вище зазначеними причинами, є найважливішою у галузі залізничної автоматики та телемеханіки [10, 11, 23, 29, 33, 61, 130]. Вона вимагає зміни і корекції традиційних методів розрахунку РК систем СЦБ з точки зору врахування завад тягового струму. Крім цього, невирішеною залишається проблема намагнічування ДТ. Виникає необхідність впровадження низки технічних рішень для виключення розповсюдження постійного тягового струму на граничний зі станцією стикування полігон (станції, перегони) електротяги змінного струму. Частково проблему може вирішити новий метод розрахунку РК [36, 104], спрямований на розширення областей існування РК за умови підмагнічування ДТ. Також не слід забувати про теорію аналізу та синтезу РК, оптимізацію розрахункових параметрів – шунтової чутливості у ряді випадків при підвищенні опору шунта і опору рейок з урахуванням збільшення довжини рейкових ланок (до 100 м), а також використання елементів рейкової лінії з комбінованих сплавів замість міді, теорію забезпечення експлуатаційної надійності РК на етапі проектування і за налагоджувальний період з урахуванням переробки деяких виробів і апаратури, а також методику збору та обробки інформації про відмови [42, 52, 62, 96], під час періоду проведення чергової планової профілактики.

Питання впливу завад тягового струму станції стикування, при різних режимах роботи тягової підстанції (ТП) [38, 105, 116] на колійні приймачі РК, (неважаючи на тривалий період застосування електротяги змінного струму, не знаходило свого рішення). Важливими також є питання резервування РК підтональної частоти рейковими колами тональної частоти укороченої довжини з розшиrenoю областью існування при мінімальному питомому опорі ізоляції; заміни або модернізації кодового автоблокування з малонадійними елементами; застосування елементів РК з малодефіцитних матеріалів [84], їх вплив на параметри РК (дросельні перемички, з'єднувачі та ізолюючі стики з нових полімерних матеріалів, що відрізняються високою зносостійкістю й опірністю

до динамічних навантажень); оптимізації періодичності і встановлення допусків на параметри об'єктів СЗАТ, що мають важливе значення в поліпшенні якості технічного обслуговування і продовження терміну їх нормальної працездатності, а також поширення систем технічної діагностики з підвищеною глибиною перевірки стану вузлів автоматики і телемеханіки.

Всі ці та багато складних невирішених питань [10, 44, 128, 130] становлять комплекс досліджень з проблеми підвищення експлуатаційної надійності і безпеки функціонування засобів залізничної автоматики і телемеханіки (ЗАТ), що знайшов відображення в цій дисертації, поряд з узагальненням багаторічного досвіду з розробки систем і пристройів ЗАТ і забезпеченням їх надійного функціонування.

Актуальність розробки теоретичних і прикладних питань підвищення експлуатаційної надійності СЗАТ зумовлена стійкою тенденцією зростання потоку відмов (понад $30 \cdot 10^3$ відмов на рік по Україні), витрат на ремонт і технічне обслуговування. Але існують деякі протиріччя між технічною оснащеністю залізниць засобами ЗАТ і обмеженням штату обслуговуючого персоналу.

Вирішення згаданих поставлених для вирішення в роботі проблем дозволить істотно знизити експлуатаційні витрати і тим самим сприяти стійкому фінансовому становищу галузі, особливо зараз, в умовах підвищення ефективності економіки.

Укрзалізниця одна з небагатьох галузей народного господарства України, яка в умовах важкої кризи і спаду виробництва працює стійко і задовольняє потреби в перевезеннях. Прогноз на найближчу перспективу передбачає зниження обсягу пасажирських перевезень. Що стосується вантажних перевезень, то їх обсяг збільшуватиметься зі зростанням економіки і обсягів виробництва. Отже поставлені в дисертації проблеми підвищення експлуатаційної надійності пристройів ЗАТ шляхом підвищення експлуатаційної надійності рейкових кіл, створення нового методу розрахунку рейкових кіл з урахуванням вплив завад тягового струму, знаходяться в руслі основних

стратегічних завдань галузі: стабілізація фінансового становища, освоєння перевезень пасажирів і вантажів, підвищення безпеки руху поїздів і техніки ЗАТ; підготовка галузі до освоєння великих об'ємів перевезень в найближчий період підйому економіки.

Залізниці України як господарська система володіють інерційністю, тому вирішення поставлених завдань потрібно реалізовувати завчасно і проводитися на сучасному етапі.

Вирішення проблеми експлуатаційної надійності СЗАТ повинно здійснюватися згідно галузевої програми економії енергії та палива. Мова йде не тільки про те, що відмови технічних засобів (об'єктів) ЗАТ безпосередньо пов'язані з затримками поїздів, зниженням дільничної та технічної швидкостей і призводять до прямої перевитрати енергії, а й про те, що галузевою програмою передбачаються комплекси організаційних рішень та нових технічних засобів, які можуть дати позитивний ефект, але лише поряд з підвищенням експлуатаційної надійності ЗАТ. Найбільш важливі розробки – тональні рейкові кола (TPK) [67, 121] з мікропроцесорними генераторами і приймачами [37, 106], мікропроцесорні системи автоблокування та електричної централізації, системи комплексної діагностики об'єктів ЗАТ [27, 28, 58, 112, 132], електромагнітні реле первого класу надійності третього та четвертого покоління, та ін. – при впровадженні вимагають відповідних розрахунків та рішень по надійності.

Широкого застосування на залізницях набули РК частотою 25 Гц з фазочутливими колійними приймачами і параметричні перетворювачі частоти сигналного струму, розроблені понад 50 років тому [9, 63, 97, 117] і широко поширені на дорогах України. Які, при деяких умовах впливу завад викликають відмову систем ЗАТ. Заміна фазочутливих рейкових кіл 25 Гц [117] на ТРК [67] або інші аналоги вимагатимуть порівняно великих капіталовкладень і затрат часу. Звідси випливає, що актуальною є модернізація деяких вузлів РК, яка дозволила б підвищити експлуатаційну надійність роботи і збільшити робочий ресурс основних вузлів РК.

Широкого застосування на дорогах України набула електрична тяга змінного струму. Більш того, існує стійка тенденція переведення полігонів доріг з автономною тягою і електротягою постійного струму на електротягу змінного струму. Це створює сприятливі умови для впровадження нових систем автоматики і телемеханіки на мікроелектронній основі [19, 121]. Окрім цього останнім часом на мережі доріг відбувається заміна електровозів на більш потужні з різними принципами керування силовими агрегатами, розраховані на ведення швидкісних і великовагових поїздів (понад 6 тисяч тон). Ця обставина пов'язана з підвищеннем потужності системи електропостачання тягової мережі і з ростом струмів у зворотному каналі тягового струму – рейковій лінії, що, у свою чергу, спричиняє зростання асиметрії тягових струмів в рейкових нитках і посилення заважаючого впливу на колійні приймачі, що вимагає розробки технічних заходів захисту приймально-передавальної апаратури від завад тягового струму [11, 25].

Встановлено, що на ділянках залізниць з електротягою змінного струму, що примикають до станцій стикування двох систем електротяги, при певній схемі комутації тягової мережі постійного струму в рейкової мережі виникають підвищені потенціали постійного струму «рейка-земля», істотно зростають постійні струми витоку в перегінні колії, що примикають до станції стикування, з боку електротяги змінного струму. Як наслідок витоку постійного струму, створюються умови для намагнічування колійних дросель-трансформаторів типу ДТ-1-150 (без повітряних зазорів в магнітопроводі [18]) і порушення роботи коротких РК (менше 500 м), і порушується робота станційних світлофорів. Така ситуація характерна для ділянці електротяги змінного струму, яка примикає до станції «П'ятихатки – стикова», особливо в умовах живлення контактної мережі від тягової підстанції «Желєзняково» і тягової підстанції «Савро», що працюють паралельно на контактну мережу, при відключені тягової підстанції «П'ятихатки». Потрібно зауважити, що нормами на проектування пристройів СЦБ на станціях стикування передбачений захист РК

ділянки електротяги змінного струму лише на незначній відстані (до 10 км) від станції стикування встановленням ДТ типу ДТ-0,6-500С [9, 116, 120].

Експериментальні дослідження показали, що РК станції «Зелена» Одесської залізниці, віддаленої від ТП постійного струму станції «Г'ятихатки» майже на 20 км, працюють нестабільно. Це спорадично супроводжується перекриттям станційних світлофорів (в моменти максимальних постійних струмів витоку і тягових струмів), перекриттям прохідних світлофорів на перегоні практично не спостерігається, що пояснюється значно більшою довжиною перегінних РК у порівнянні зі станційними РК, а також великою часовою інерцією пристрійів декодування сигналів автоблокування. Коефіцієнт асиметрії перегінних РК порівняно зі станційними, є меншим.

З викладеного випливає, що підвищення експлуатаційної надійності роботи РК систем СЦБ, а також розробка технічних рішень захисту і нових методів розрахунку режимів роботи РК з урахуванням впливу завад зворотного тягового струму, є актуальною науково-технічною проблемою.

1.2 Статистичний огляд відмов систем автоматики, телемеханіки та зв'язку на ділянках доріг

Системи електричної централізації (ЕЦ) і автоблокування (АБ) функціонують на підставі інформації, отриманої від РК [17, 49, 50, 101, 116]. Подальше вдосконалення якості роботи систем СЦБ нерозривно пов'язане з безпекою руху поїздів та підвищеннем надійності роботи РК, які є базисною ланкою не тільки в системах визначення вільності або зайнятості ділянки колії, а й у забезпеченні виконання контрольного режиму (контроль ціlostі рейки). Як показав статистичний аналіз даних з різних ділянок залізниць України, у період з 2003 р. за допомогою РК виявлено понад 100 випадків зламу рейки, що фактично допомогло запобігти аварії поїздів.

Крім цього, РК забезпечують контроль справного стану елементів зворотного тягової мережі, призначеної для пропуску зворотного тягового струму. І, нарешті, РК є інструментом для передачі на локомотиви та інші

рухомі одиниці інформації про показання світлофора, до якого наближається поїзд, а також про допустиму швидкість його руху в даній точці шляху – з роботою РК пов'язане функціонування систем автоматичної локомотивної сигналізації і автоматичного управління гальмами. Таким чином, від інформації з РК безпосередньо залежить безпека руху поїздів в господарствах колії та споруд, електрифікації та електропостачання, локомотивного господарства і, звичайно, в пристроях залізничної автоматики і телемеханіки.

В якості альтернативного технічного рішення розроблені системи рахунку осей, що дозволяє забезпечити контроль проходження поїздом ділянок шляху без використання рейкових кіл. Однак для здійснення контролю ціlostі рейки та елементів зворотної тягової мережі рейковим колам на даний момент альтернативи немає.

Водночас РК представляють собою складну систему, експлуатація якої супроводжується витратами коштів. Підвищення безпеки функціонування та надійної роботи РК вимагає постійної пильної уваги виконавців і керівників усіх рівнів, а також, як зазначалося, фінансових вкладень.

Аналіз роботи рейкових кіл

Для отримання достовірної та об'єктивної інформації про роботу РК проведено аналіз за наступними критеріями [8, 21, 34, 61, 63, 96, 97, 117]:

- класифікація відмови РК по певному господарство залізниці або по стороннім причинам, безпосередньо не пов'язаним зі залізницею;
- розподіл відмов РК по залізницях як за абсолютною величиною, так і за питомими показниками (на технічну одиницю або на одиницю пристройів);
- розподіл відмов елементів РК;
- динаміка кількості відмов у рейкових колах.

На мережі залізниць України знаходяться в експлуатації більше 100 тис. станційних і більше 25 тис. перегінних РК. З 2010 року по теперішній час

кількість їх відмов знижено більш ніж на 20 %, проте цей показник за абсолютним значенням досі залишається неприпустимо великим (рис. 1.1).

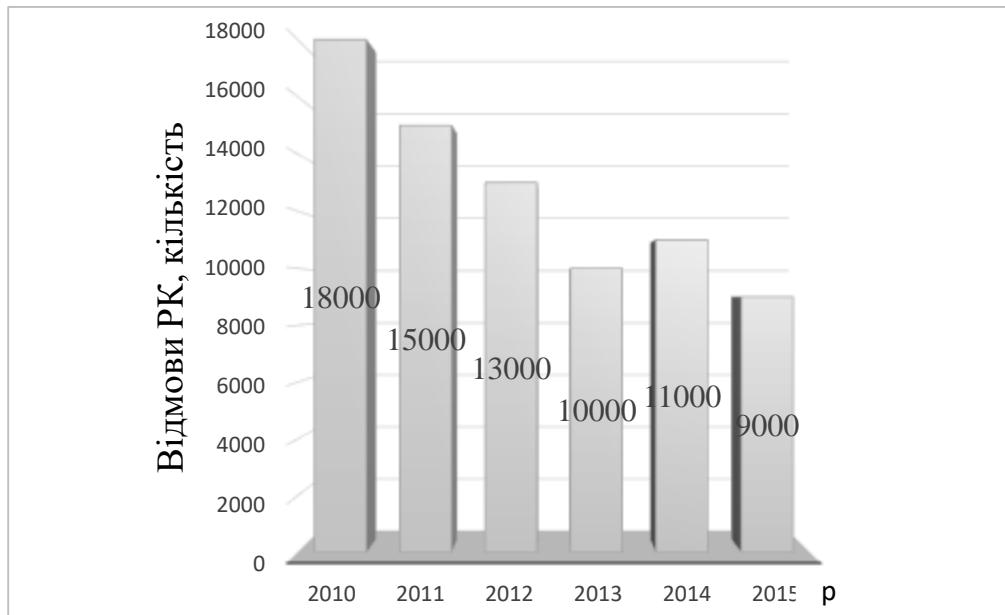


Рисунок 1.1 – Динаміка тенденції зміни відмов рейкових кіл



Рисунок 1.2 – Основні причини відмов рейкових кіл

Відмови РК складають майже половину загальну кількість порушень нормальної роботи пристройів СЦБ.

За даними аналізу за розглянутий період найбільш характерними причинами відмов елементів РК (рис. 1.2.) є:

- несправність ізоляючих стиків (29%), несправність (в тому числі обрив) стикових з'єднувачів (18%);
- закорочування рейкових кіл (16%);
- несправність апаратури (10%);
- несправність ізоляції стрілочного переводу (3%);
- 24% припадає на інші причини (несправність ізоляції стрілок і гарнітур, сталевих і дросельних перемичок, зниження опору баласту, злами рейки та ін.).

Як видно, однією з основних причин відмов ізоляючих стиків є закорочування стику металевою стружкою внаслідок намагнічування рейок і появи зовнішнього магнітного поля, що створюється намагніченими торцями рейок, розділених ізоляючим стиком. Для виявлення передвідмовного стану ізоляючих стиків необхідно застосовувати відповідну апаратуру, зокрема, вимірювальний засіб для діагностики станок ізоляючого стику, металополімерного типу, що містить металевий стрижень всередині полімеру, для проведення оцінки параметрів.

Основними причинами, що призводять до відмов стикових з'єднувачів усіх типів, є їх пошкодження при корозії, здійсненні колійних робіт, та при неякісній приварці. Крім того, практичний досвід показує, що недостатньо ефективно проводиться вхідний контроль з'єднувачів [84].

Усі наведені причини відмов стосуються роботи традиційних релейних рейкових кіл [8, 9]. В останні роки активно впроваджуються системи АБ з ТРК [67]. Ці РК побудовані на новій елементній базі вони менш критичні до опору баласту, і, що найголовніше, не вимагають наявності ізоляючих стиків. Тому завдання забезпечення працездатності ТРК в першу чергу стосується працівників дистанцій сигналізації та зв'язку.

Результати аналізу дозволяють сформулювати чотири групи завдань, вирішення яких дозволить підвищити надійність функціонування пристройів СЦБ в цілому і РК зокрема.

1. Організаційні – призначені для впорядкування та чіткого регламентування процесу обслуговування РК.

2. Нормативні – ті, що поряд з організаційними дозволяють експлуатаційному штату застосовувати стандартні процедури обслуговування, що надають можливість посилити контроль за технічним станом РК та відстежувати відмови, збої і відхилення параметрів РК більш точно та своєчасно.

3. Технічні – спрямовані на вдосконалення якості функціонування як самих РК, так і їх елементів на основі затверджених і розроблених нових технічних рішень.

4. Інноваційні – при необхідності забезпечують функціонування пристройів СЦБ на основі двох видів методів, один з яких є альтернативним рейковим колам, інший – комбінованих.

Проведений аналіз роботи РК свідчить про необхідність більш суворої регламентації параметрів елементів РК і процедур обслуговування, впровадження технічних засобів діагностики тих, що виключають відмови внаслідок помилкової роботи схем СЦБ. Усі порушення і відмови в роботі повинні бути впорядковані і зафіксовані. Це дозволяє більш детально аналізувати роботу РК, аж до елементів, і на підставі цього аналізу розробляти адекватні заходи і рекомендації з експлуатації пристройів в різних умовах. Назріла необхідність галузевої стандартизації як параметрів елементів РК, так і процедур обслуговування і технічного ремонту.

Відсутність регламентованих процедур по вимірюванню залишкової намагніченості рейок, наявність нелінійних залежностей намагніченості від струму ще більше ускладнюють ситуацію. У цьому випадку необхідно не тільки нормувати параметр намагніченості, а й ретельно опрацювати питання замикання магнітного потоку, створеного двома торцями рейок не по повітню, а

через ізолюючий стик. Як додатковий засіб контролю роботи ізолюючого стика, слід розробити і впровадити прилад для вимірювання залишкової намагніченості торців рейок.

Велика кількість відмов РК припадає на стикові з'єднувачі. На даний час розроблені і впроваджуються нові типи стикових з'єднувачів, а саме: штепсельні, пружинні, шаберно-пружинні, тарілчасті. Поряд з організаційними заходами по нормуванню параметрів стикових з'єднувачів застосування нових типів з'єднувачів дозволить знизити кількість відмов РК. Як альтернативне рішення слід розглянути можливість збільшення довжини зварних плітей аж до блок-ділянки або перегону.

Велика кількість відмов апаратури РК припадає на вихід з ладу через вплив зовнішніх факторів, особливо при виникненні перенапруги на входах і виходах апаратури за рахунок атмосферних явищ і деградації ізоляції від силових ланцюгів. Розроблені і впроваджені останнім часом параметричні генератори частоти [89-94], забезпечують захист від розрядів блискавки та комутуючих процесів тягової мережі. Ці пристрої захисту дозволяють в певній мірі зняти гостроту питання, але для більш ефективного захисту потребують поліпшення стійкості РК і захисних засобів до впливу перенапруг і, подальше вдосконалення елементів захисту. Слід зауважити, що застосовані захисні засоби по теплових параметрах не відповідають сучасним вимогам захисту систем СЦБ при впливі атмосферних явищ.

1.3 Пункти стикування тягових систем змінного і постійного струму

Станція стикування – роздільний пункт залізниць, на якому сходяться ділянки з різними видами електрифікації. Як відомо, електрифікація ділянок може відрізнятися по напрузі і по роду струму, постійному та змінному [116].

Стикування ділянок, електрифікованих на різних системах струму, виконується секціонуванням контактної мережі і перемиканням її відповідних секцій на систему струму в залежності від заданого маршруту проходження електровоза. Для цього перемикачі контактної мережі зблоковані з

відповідними маршрутами в пристроях СЦБ. Секції контактного проводу поділяються спеціальними так званими секційними ізоляторами, за якими можуть ковзати струмоприймачі електричного рухомого складу. Ізолятори на секційних ділянках розраховані на максимальну напругу [70, 72, 74, 77, 115].

Також використовуються станції стикування з нейтральними вставками. В такому разі контактна мережа не зблокована з пристроями СЦБ. На цих ділянках експлуатуються двосистемні електровози і електропоїзди, здатні працювати як на постійному (3 кВ), так і на змінному (25 кВ) струмі. Даний спосіб дозволяє проходити пункти стикування без зупинки (хоч і, як правило, на вибігу).

В Україні нараховується 5 станцій стикування з перемикачами роду струму по контактній мережі, та 4 – з нейтральними вставками.

В усіх цих випадках проектування станції стикування присутні розділ тягового струму в контактної мережі, а розділ в рейковій мережі – відсутній. Це призводить до перетікання постійного тягового струму на полігон змінного тягового струму та навпаки, і, як наслідок, це призводить до зниження експлуатаційної надійності роботи РК.

Пункти стикування призначені для електричного і гальванічного розділення тягових мереж в місцях переходу з однієї системи струму на іншу. Вони повинні надійно розділяти як контактну мережу, так і лінію зворотного тягового струму і запобігати передачі будь-яким способом потенціалу однієї системи в іншу. При цьому слід враховувати відмінності в рівнях ізоляції і виконанні мереж змінного і постійного зворотного тягового струму.

Проникнення постійного струму у зворотну рейкову мережу змінного повинне повністю виключатися з наступного ряду причин:

1. Колія на лініях, електрифікованих на змінному і постійному струмі, має різні рівні ізоляції по відношенню до землі. Проте на лініях змінного струму номінальна напруга в контактній мережі значно вища, у зв'язку з чим колію можна вважати практично заземленою. У зв'язку з цим зростає небезпека виникнення підвищених струмів розтікання. У разі проникнення постійної

складової посилюється корозія пов'язаних із землею металевих конструкцій, трубопроводів, а також броні силових і сигнальних кабелів.

2. Постійна складова, що потрапляє в мережу зворотного змінного струму, викликає ряд проблем в експлуатації трансформаторів. Відповідно до співвідношення опорів обмоток постійному і змінному струму постійна складова протікає через трансформатор, викликаючи підмагнічення його осердя, знижуючи потужність, збільшуючи втрати, скорочуючи термін служби трансформатора і підвищуючи рівень вищих гармонік.

3. Подібні процеси можливі й на рухомому складі змінного струму, якщо ізолюючий проміжок, що розділяє системи струмів, буде перекритий складом з декількох вагонів з піднятими струмоприймачами.

Змінний струм також не повинен надходити до рейкової мережі постійного тягового струму, оскільки це може спричинити виникнення резонансних і заважаючих частот, що викликають збої в роботі пристройів СЦБ і системі керування рухом поїздів.

Внаслідок наявності усіх вище приведених причин надійність роботи рейкової мережі для сигнальної частоти рейкових кіл, не забезпечується.

1.3.1 Побудова станції стикування

Залежно від взаємного розміщення основних станційних парків розрізняють дільничні станції поперечного, поздовжнього і напівпоздовжнього типів.

Схеми поперечного типу мають компактне розташування пристройів і вимагають більш короткого майданчика в порівнянні з поздовжніми схемами, а також менший штат працівників, пов'язаних з обробкою поїздів і вагонів. Дільничні станції поперечного типу вимагають менших будівельних та експлуатаційних витрат. Як правило, застосовуються вони при розташуванні станцій на одноколійних лініях. На двоколійних лініях рекомендується застосовувати схеми поздовжнього типу. Ці схеми виключають перетин маршрутів слідування зустрічних поїздів, але при цьому головні колії

перетинаються локомотивами при проходженні їх в парк, що розташований на іншій стороні станції відносно локомотивного господарства. Якщо станція є станцією стикування струмів, то перевага так само віддається поздовжній схемі.

Контактна мережа на станції стикування може перемикатися на будь-який рід струму – повністю або частинами. При прибутті поїзда на таку станцію електровоз відчіплюється від поїзда і йде в депо. Потім мережа в межах станції перемикається на струм іншого роду, після чого до поїзда під'їжджає інший електровоз.

Найбільшими станціями стикування, які перемикаються, в Україні є станції: «Львів-Головний» (Львівська область), «П'ятихатки-Стикові» (Дніпропетровська область), «Іловайськ» (Донецька область), «Тимково» (Кіровоградська область), «Лозова» (Харківська область).

На станціях стикування застосовуються пункти групування (ПГ), що призначені для перемикання напруги в секціях контактної мережі на станціях стикування постійного струму 3.3 кВ і змінного струму 27.5 кВ електрифікованих залізниць.

Технічні дані ПГ:

Номінальна напруга силового кола:

- змінного струму – 27,5 кВ;
- постійного струму – 3,3 кВ;

Номінальний струм силового кола:

- змінного струму – 1000 А;
- постійного струму – 1400 А.

Також є станції стикування з нейтральною вставкою – які не мають механізму перемикання контактної мережі. Дані станції не є станціями стикування в повному сенсі цього слова і призначені тільки для пропуску двосистемних електровозів. Станціями стикування з нейтральною вставкою, в Україні є станції: «Граково», «Огульци», «Святогорськ», «Красноград».

1.3.2 Блочна централізація на станціях стикування електротяги постійного і змінного струмів

З пульта-маніпулятора через набірну групу одночасно набирають стріочний маршрут і електротяговий маршрут з родом тяги постійного або змінного струму або автономною тягою (рис. 1.3) [17, 50].

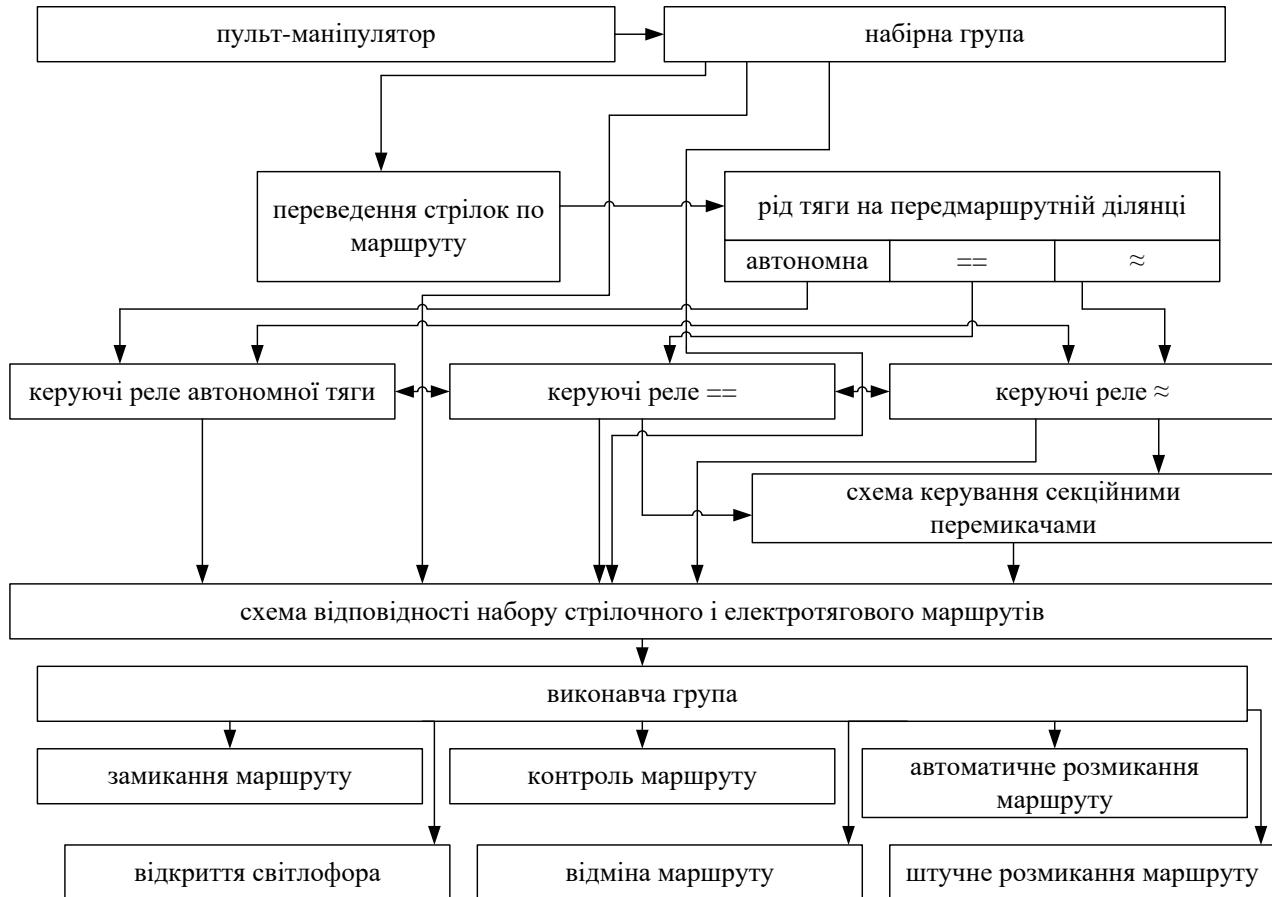


Рисунок 1.3 – Структурна схема централізації з перемиканням контактної мережі

Залежно від стріочного і електротягового маршрутів включаються керуючі реле включення в контактну мережу постійного або змінного струму. Керуючі реле впливають на схему управління секційними перемикачами, які безпосередньо включають контактну мережу на обраний рід струму.

Правильність набраних стріочного і електротягового маршрутів контролюється схемою відповідності, після чого включається виконавча група централізації. Виконавча група виконує контроль і замикання встановленого маршруту, відкриття сигналу, скасування маршруту, автоматичне і штучне розмикання. Набірна група для набору стріочних маршрутів і виконавча група

будуються з використанням типових блоків систем блочно-релейної маршрутної централізації (БМРЦ) чи мікропроцесорної централізації (МПЦ).

Для керування родом струму в секціях контактної мережі при встановленні маршрутів застосовують керуючі і допоміжні реле перемикачів постійного і змінного струмів.



Рисунок 1.4 – Розділення контактної мережі

На рис. 1.4 пояснюється порядок поділу контактної мережі на окремі за родом тягового струму секції, які перемикаються. Розподіл на секції здійснюють відповідно до колійного розвитку станції, прийнятої маршрутизацією з урахуванням можливості паралельних пересувань. Кожна секція має секційні перемикачі, за допомогою яких секція підключається до фідерів постійного або змінного тягового струму.

Секційні перемикачі обладнані електроприводами, які включають за типовою двопровідною схемою керування стрілками.

Рід тягового струму, що подається в секції контактної мережі за встановленим маршрутом, визначається в маршрутах приймання та відправлення родом тягового струму на перегоні; в маневрових маршрутах – родом тягового струму в секції контактної мережі перед маневровим

світлофором. Зміна напруги в контактній мережі з моменту відкриття сигналу «Н» на весь час проходження складу за маршрутом виключається.

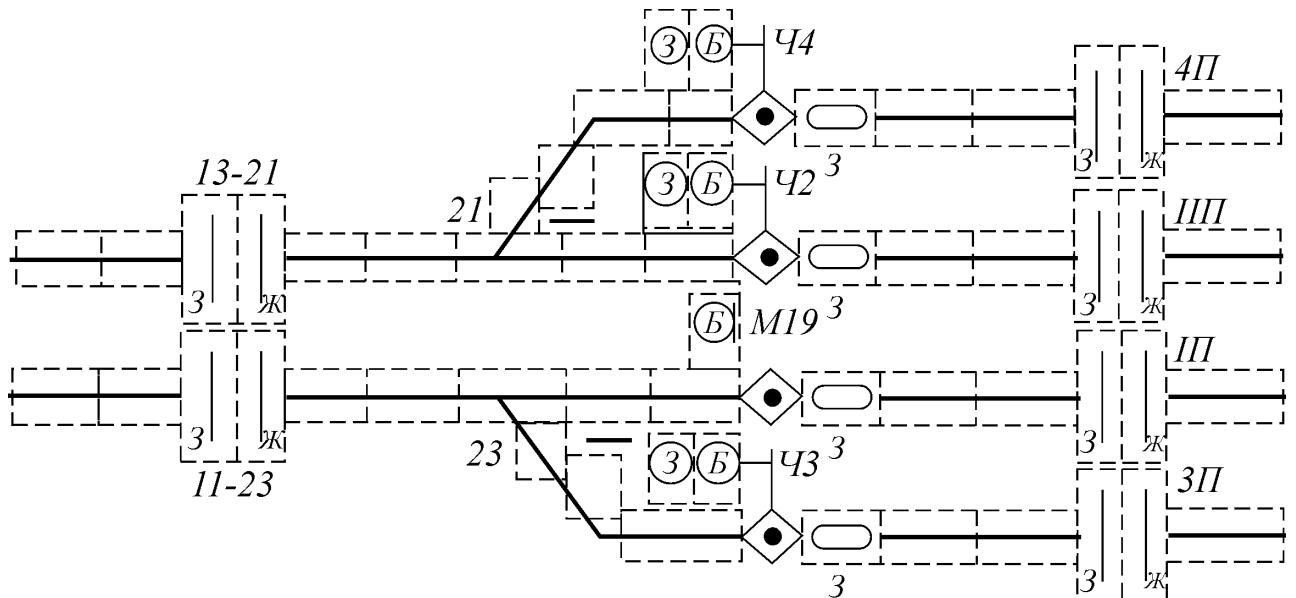


Рисунок 1.5 – Виносне табло централізації станції стикування електротяги постійного і змінного струмів

На виносному табло рис. 1.5 контролюється встановлення стрілочних і електротягових маршрутів. Контактна мережа, що не перемикається, уздовж основної світлової схеми станції: зображується жовтим світлом при постійному струмі і зеленим – при змінному. Межі між секціями контактної мережі позначаються ромбами зеленого кольору, всередині яких зображені ізолюючі стики.

Для позначення секцій контактної мережі, які перемикаються, в межахожної секції встановлюють двоколірні світлові чарунки. Осередки загоряються жовтим світлом при встановленні маршруту електротяги змінного струму і зеленим світлом – для електротяги постійного струму. При встановленні маршруту автономної тяги чарунки не загоряються.

1.4 Рейкові кола району станції стикування двох родів електротяги

Згідно вказівки [120] та будівельних норм і правил РК 10 км зони полігону електротяги змінного струму, що примикає до станції стикування, повинні бути обладнані дросель-трансформаторами типу ДТ-0,6-500С. До цього

використовувались РК, обладнані ДТ-1-150. Розглянемо деякі основні РК, які використовуються на дільниці електротяги змінного струму.

1.4.1 Станційні фазочутливі рейкові кола частотою 25 Гц з реле типу ДСШ

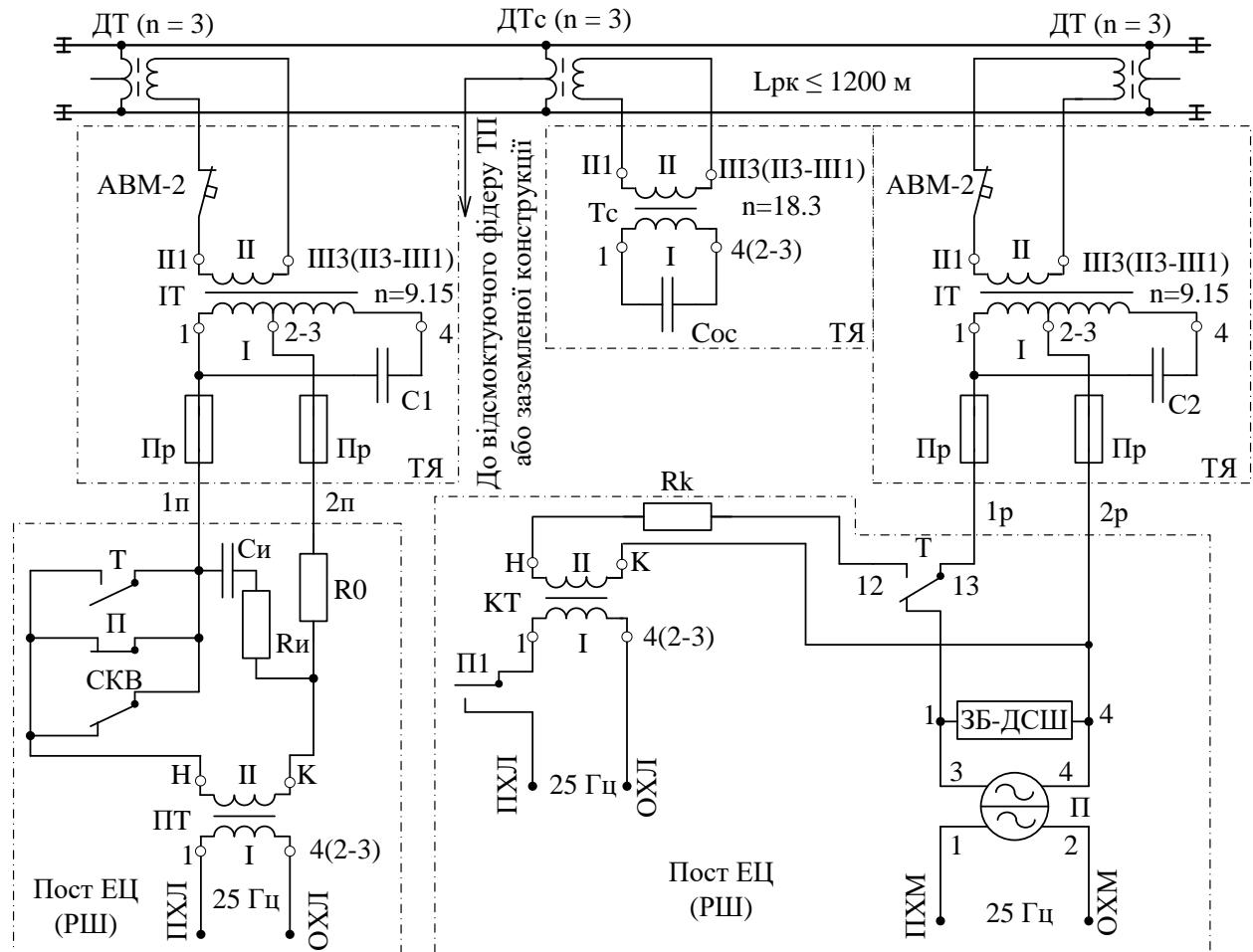


Рисунок 1.6 – Схема двониткового РК частотою 25 Гц з реле типу ДСШ-13, двома (трема) ДТ-0,6-500С і накладанням сигналів АЛС з обох кінців

Фазочутливі РК [8, 9, 63, 97, 117] змінного струму частотою 25 Гц з реле типу ДСШ-13 і ДТ типу ДТ-0,6-500С (рис. 1.6), застосовують на станціях стикування електротяги змінного і постійного струму, на проміжних станціях при реконструкції вже існуючих пристройів автоматики і телемеханіки при заміні електротяги постійного струму на електротягу змінного струму без припинення дії пристройів АБ і АЛСН.

Пристрої живлення РК частотою 25 Гц з ДТ-0,6-500С аналогічні пристроям живлення РК частотою 25 Гц з ДТ-1-150. Загальні вимоги до цих РК такі ж, як і до РК частотою 25 Гц з ДТ-1-1-150 (рис. 1.7), але вони мають деякі особливості. Трансформатори типу ПТ-25А використовуються в якості колійного і кодового трансформаторів. Для отримання напруги понад 60 В обмотки ПТ вмикають за автотрансформаторною схемою або встановлюють два трансформатора з паралельно ввімкненими первинними або послідовно ввімкненими вторинними обмотками.

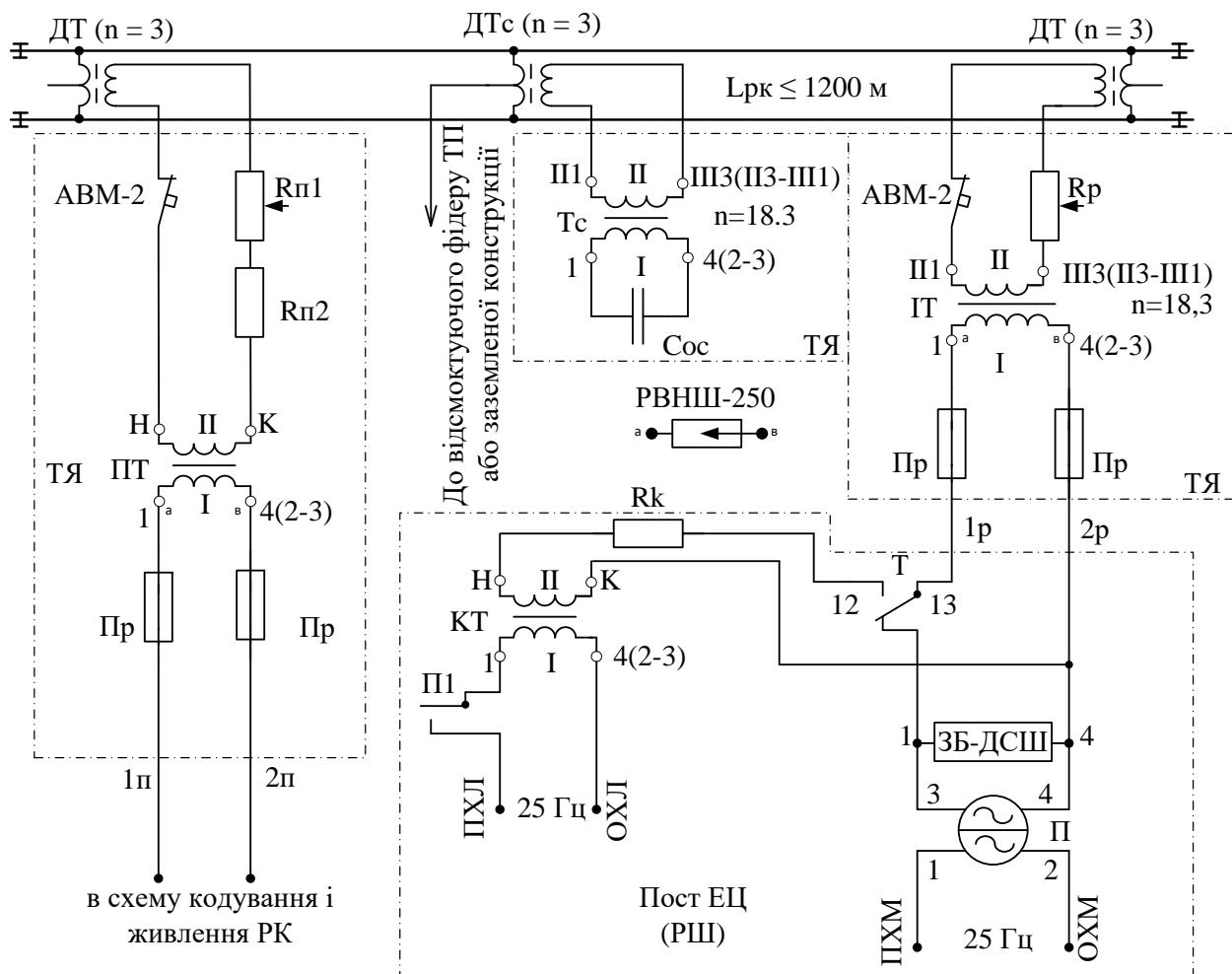


Рисунок 1.7 – Схема двониткового РК частотою 25 Гц з реле типу ДСШ-13, двома (трьома) ДТ-1-150 і накладанням сигналів АЛС з обох кінців

При накладанні кодових сигналів АЛС з релейного кінця для отримання кодової напруги понад 60 В необхідно встановити два колійних трансформатора типу ПТ-25А з послідовно ввімкненими вторинними обмотками або колійний трансформатор типу ПТ-25Б.

Колійні ДТ, до яких підключають відсмоктуючи фідери, повинні мати дросельні перемички з подвоєною площею поперечного перерізу.

На станції стикування відсмоктуючий фідер ТП постійного струму приєднують до середньої точки ДТ РК, розташованих на головних коліях перегону або в горловині станції з боку електротяги постійного струму. Відсмоктуючий фідер змінного струму приєднують з боку підходу електротяги змінного струму.

На станціях, обладнаних РК з ДТ-0,6-500С за необхідності можуть використовуватися однониткові і двониткові РК без ДТ.

Схема РК. В усіх РК для компенсації індуктивності ДТ є конденсатор $C_1 = 8 \text{ мкФ}$ на живильному кінці, а на релейному кінці – конденсатор $C_2 = 4 \text{ мкФ}$. Резистор R_0 опором 200 Ом на живильному кінці забезпечує необхідну шунтову чутливість і обмежує витрату потужності колійного трансформатору під час шунтування РК.

Живильні і релейні кінці РК укладають в різних кабелях.

1.4.2 Перегінні кодові рейкові кола 25 Гц

Кодові рейкові кола змінного струму частотою 25 Гц [8, 9, 63, 97] (рис. 1.8), застосовують на перегонах, а також на ділянках наближення і видалення станцій, обладнаних електротягою змінного струму, кодовим автоблокуванням і АЛС 25 Гц. РК живляться від перетворювача частоти ПЧ 50/25-100.

Нормальний режим роботи рейкового кола – кодовий. Датчиком кодів є кодовий трансмітер типу КПТШ-5 або КПТШ-7, встановлені в релейній шафі на живильному кінці РК. Імпульсне колійне реле типу ІМВШ-110 знаходитьться в релейній шафі на вихідному кінці РК. Захист суміжних РК від взаємного впливу при сходженні стиків забезпечується установкою кодових трансмітерів різних типів в суміжних РК. Імпульсне колійне реле захищене від впливу завад тягового струму 50 Гц і перевантаження при короткому замиканні ізоляючих стиків фільтром типу ФП-25. Для пропуску тягового струму на стиках суміжних РК встановлюють поодинокі дросель-трансформатори типу ДТ-1-150 або спарені – типу 2ДТ-1-150. Відсмоктуючі фідери тягової підстанції або

троси заземлення залізничних споруд приєднують до середніх точок ДТ живлячого або релейного кінця РК. Якщо відсмоктуючий фідер або заземлюючих конструкція знаходиться на відстані більше 250 м від живлячого або релейного кінця РК, то для їх приєднання допускається встановлення додаткового (третього) дросель-трансформатора типу ДТ-0,6-500С, налаштованого в резонанс з конденсатором ємністю 8 мкФ.

При електротязі змінного струму на перегонах, прилеглих до станцій стикування двох систем електротяги, довжина РК двох найближчих до станції блок ділянок не повинна бути більшою 1500 м.

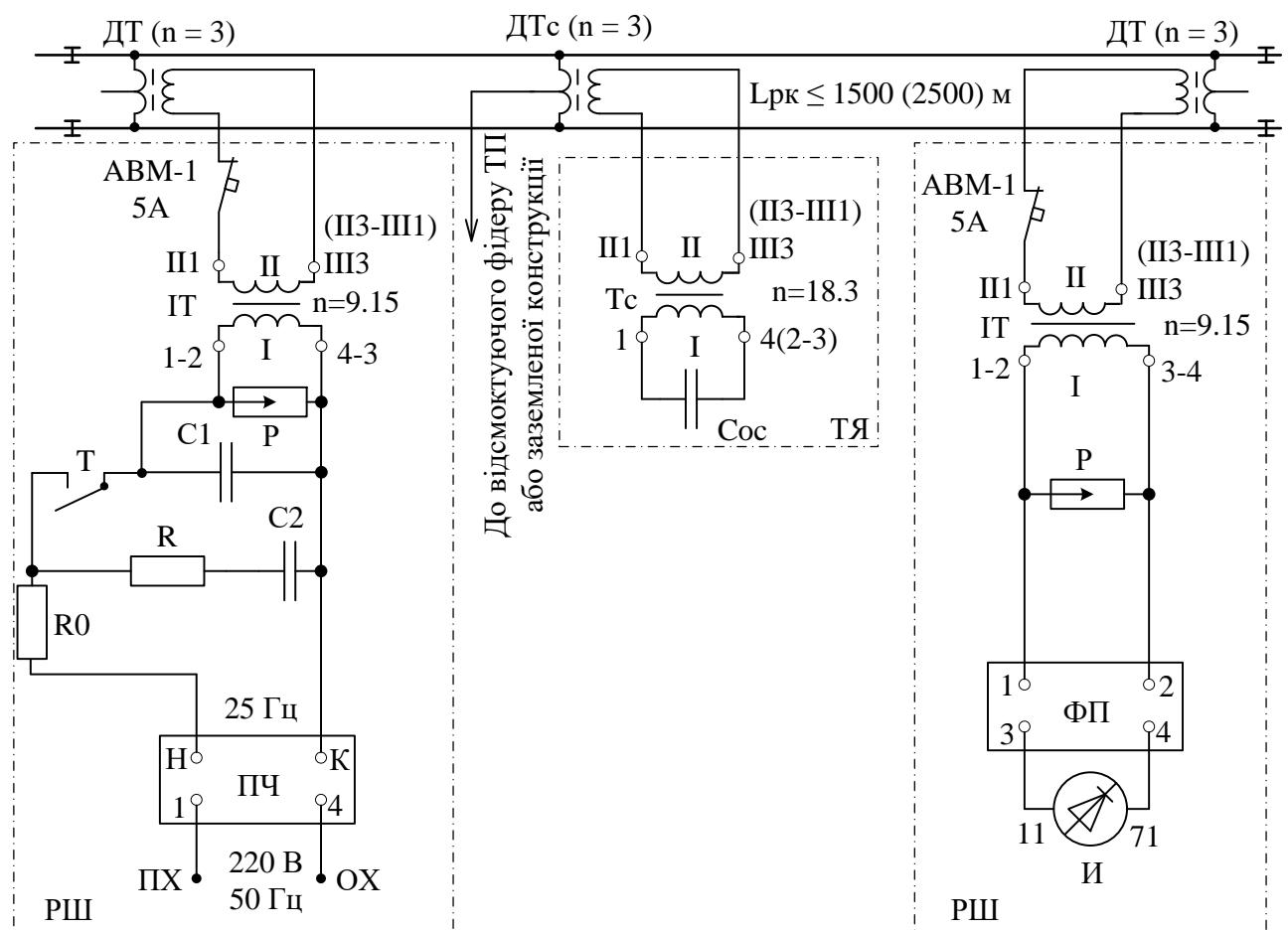


Рисунок 1.8 – Схема перегінного двониткового кодового РК частотою 25 Гц з реле типу IMВШ-110, з двома (трема) ДТ-1-150

1.4.3 Статистичний огляд відмов апаратури рейкових кіл полігону змінного струму, який примикає до станції стикування

При більш детального аналізі статистики відмов апаратури РК ділянки електротяги змінного струму, яка примикає до станції стикування складено діаграму (рис. 1.9). За даними аналізу відмов апаратури РК ділянок, прилеглих до станції стикування, найбільш характерними причинами не стабільної роботи РК є вихід з ладу дросель-трансформаторів (рис. 1.9), з різних причин – підмагнічування, асиметрія, та інше.

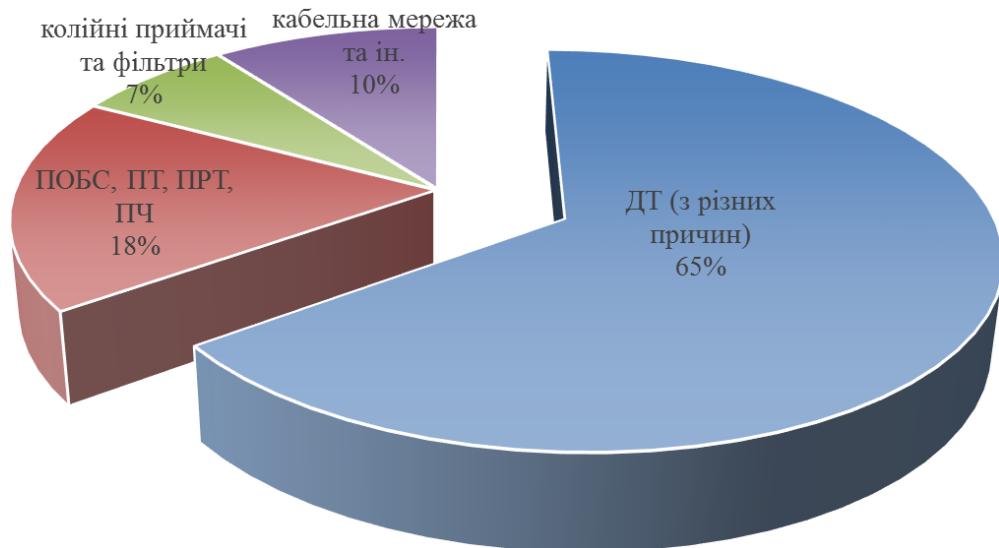


Рисунок 1.9 – Розподіл відмов апаратури РК

1.5 Аналіз тягового струму в рейковій мережі району станції стикування

У зв'язку з великою кількістю відмов РК на Одеській залізниці було обрано ділянку з електротягою змінного струму від станції «Зелена» до станції «П'ятихатки – стикова», яка наведена на рис. 1.10 (а). Ця ділянка викликає інтерес своїм колійним розвитком і підключенням тягових підстанцій.

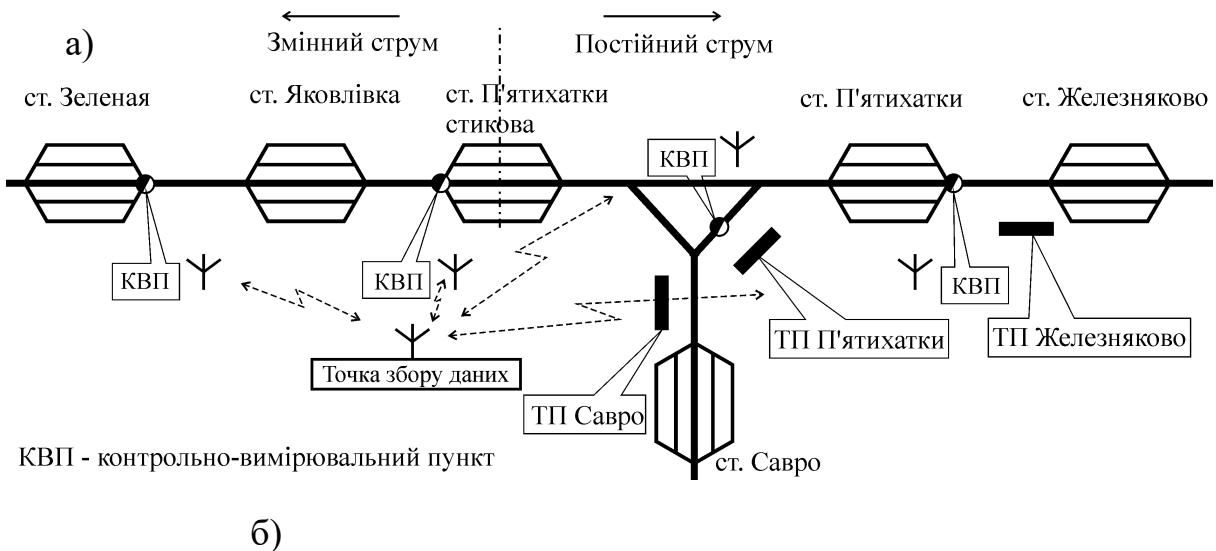




Рисунок 1.10 – Схема ділянки досліджень (а) та радіомодуль перетворення та передачі даних контрольно-вимірювального пункту (б)

Розташування контрольно-вимірювальних пунктів (КВП) по ділянці (рис. 1.10) здійснено таким чином, щоб була можливість оцінити рівні завад постійного тягового струму, який поширюється вглиб ділянки електротяги змінного струму та у подальшому порівняти отримані експериментальні дані з отриманими за допомогою моделювання.

Для синхронного збору даних на КВП використовувалися аналогово-цифрові модулі з бездротових каналах передачі даних стандарту GSM (рис. 1.10 (б)), синхронізовані в часі [27, 37, 110, 112].

Аналіз форми тягового струму в рейковій мережі ділянки (рис. 1.10) району станції «П'ятихатки – стикові» показав, що в бік полігону змінного струму виносиТЬся значна кількість постійного тягового струму, яка залежить не тільки від режиму роботи ТП, а й від поїздної ситуації як на перегоні електротяги постійного струму, так і на перегоні електротяги змінного струму:

1. ТП працюють у штатному режимі. Як можна побачити на формі сигналу зворотного тягового струму в середній точці дросельного пункту (ДП) (рис. 1.11), і на спектральному аналізі цього ж сигналу (рис. 1.12) біля вхідного світлофора станції стикування, при наближенні електровоза з боку ділянки електротяги змінного струму, постійна складова – присутня.

$U, \text{ В}$

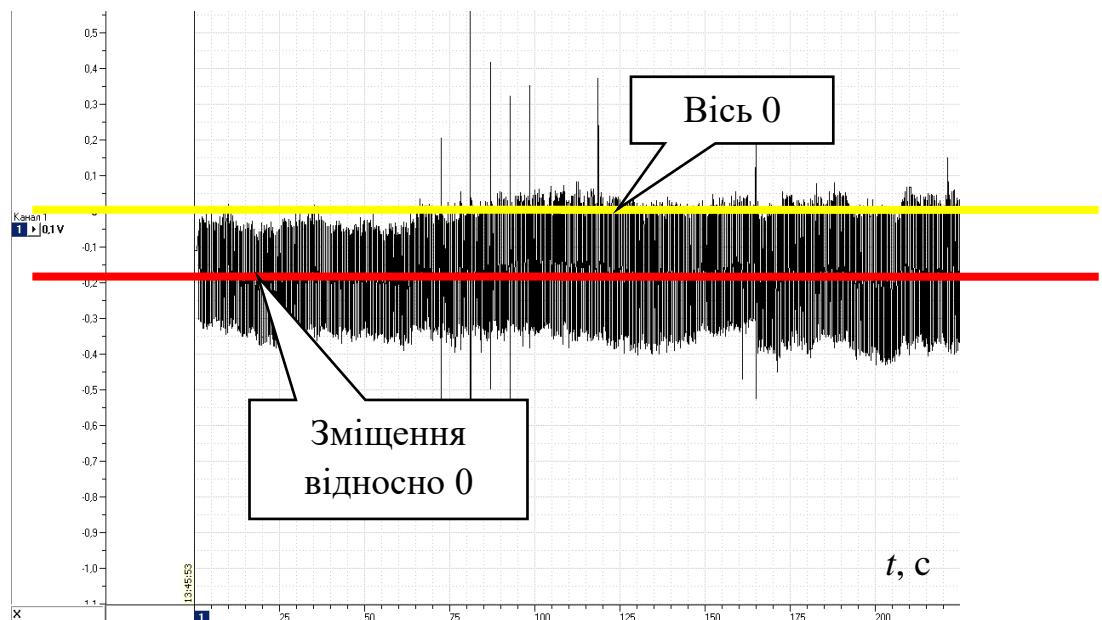


Рисунок 1.11 – Форма зворотного тягового струму в середній точці ДП

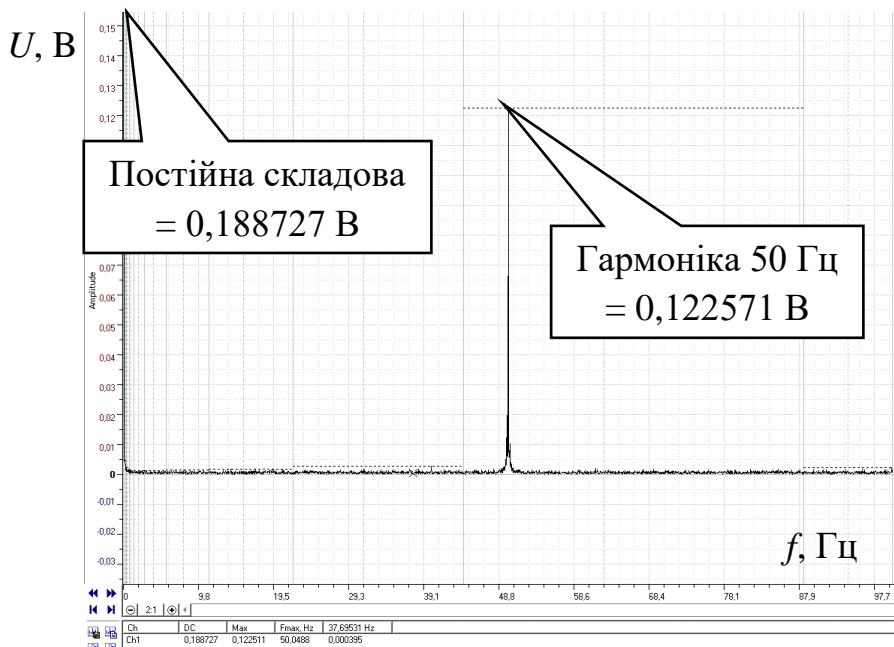


Рисунок 1.12 – Форма спектру зворотного тягового струму в середній точці ДП

2. В залежності від поїзної ситуації на полігоні електротяги постійного та змінного струму форма тягового струму в середній точці ДП змінювалася при наближенні з обох боків рухомих одиниць, як можна побачити на формі сигналу рис. 1.13.

$U, \text{ В}$

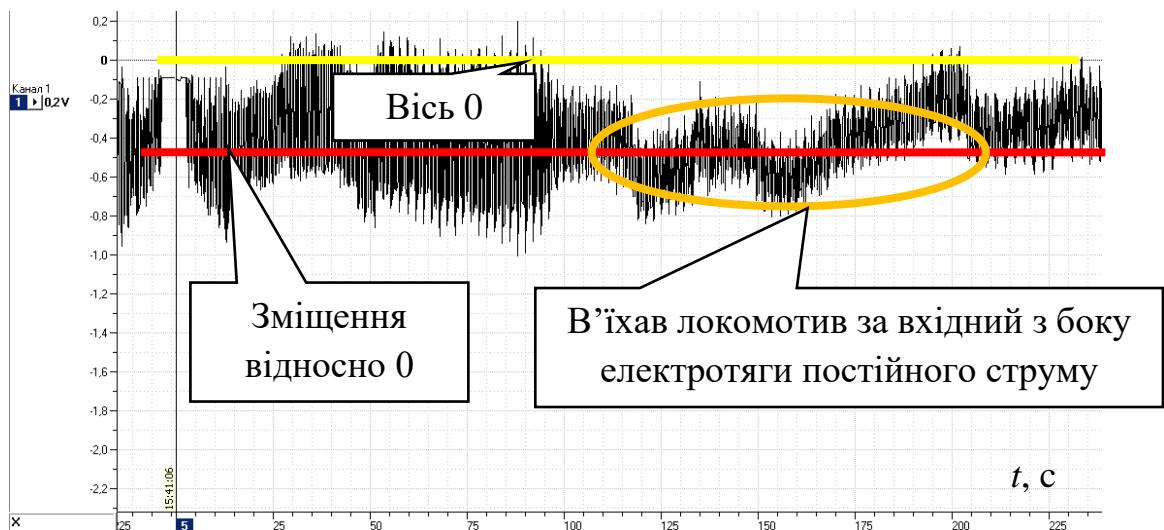


Рисунок 1.13 – Форма зворотного тягового струму при русі рухомої одиниці з боку електротяги постійного тягового струму

3. При вимушенному режимі роботи ТП форма тягового струму різко змінюється (вимірювання в рейках полігона електротяги змінного струму). Це можна простежити як на формі сигналу (рис. 1.14), так і на його спектральному аналізі (рис. 1.15).

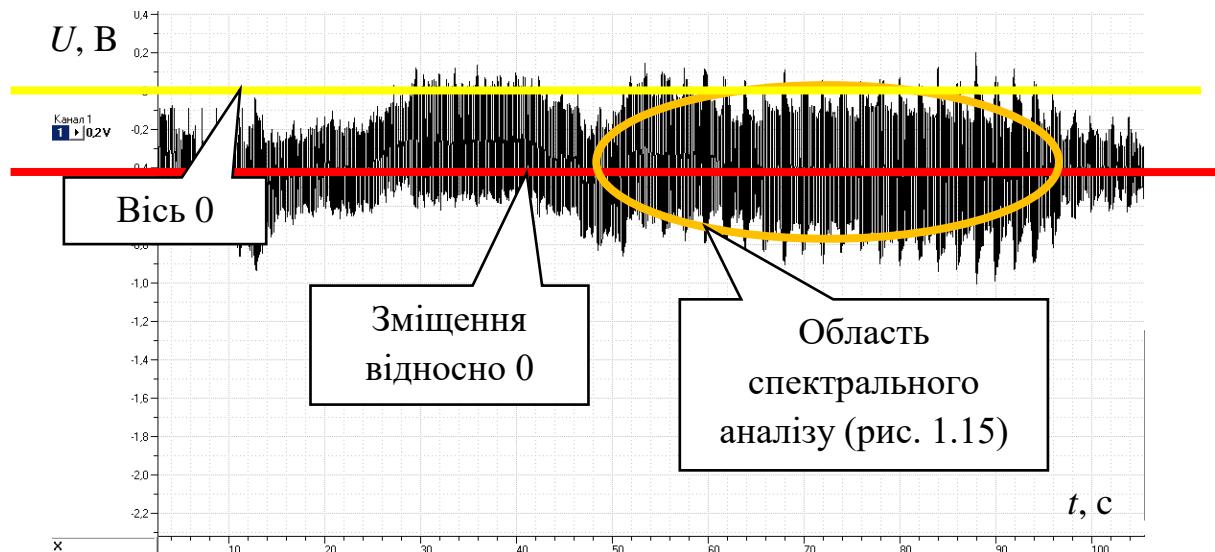


Рисунок 1.14 – Форма зворотного тягового струму в одній рейці при відключені ТП постійного струму

U , В

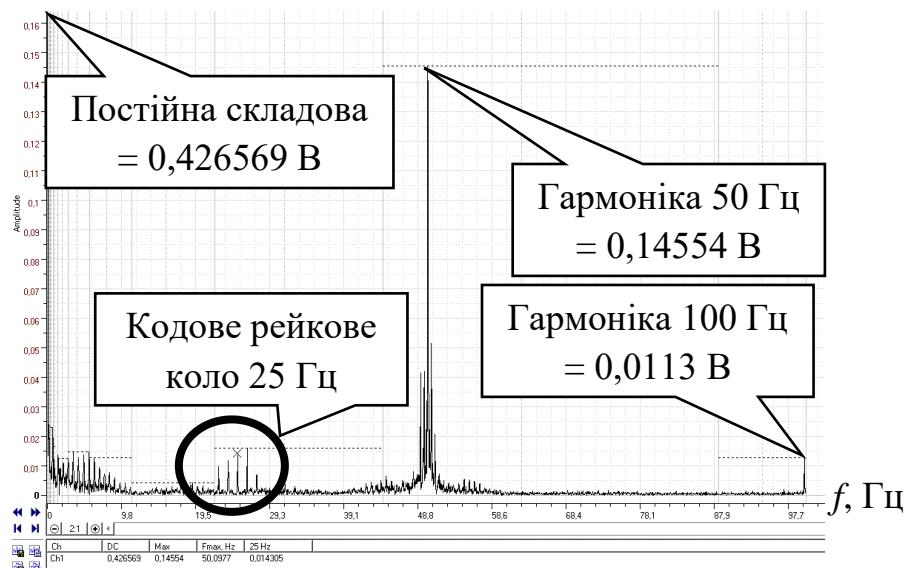


Рисунок 1.15 – Форма спектру зворотного тягового струму в одній рейці при відключенні ТП постійного струму

4. При вимушенному режимі роботи ТП та русі великовагового рухомого складу на перегоні постійного струму винос постійного тягового струму більш суттєвий (виміри в рейках полігону електротяги змінного струму), як можна побачити на формі сигналу (рис. 1.16), та на його спектральному аналізі цього сигналу (рис. 1.17).

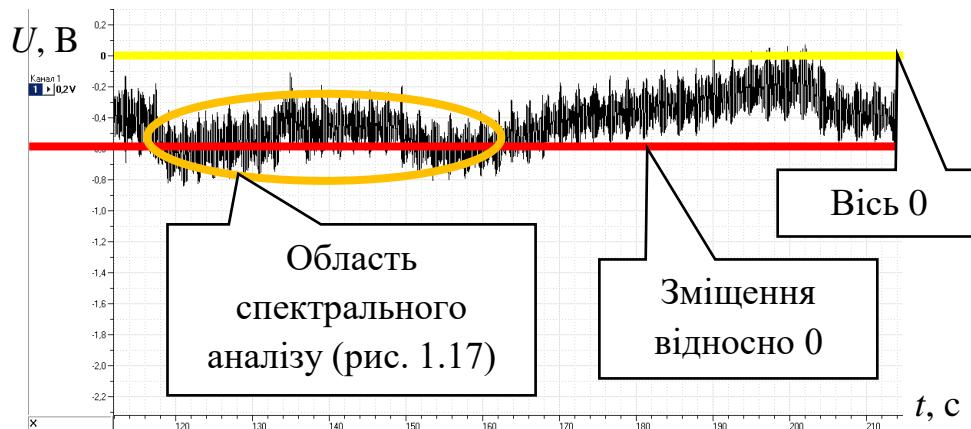


Рисунок 1.16 – Форма зворотного тягового струму в одній рейці рейкової лінії полігону змінного струму при відключенні ТП постійного струму

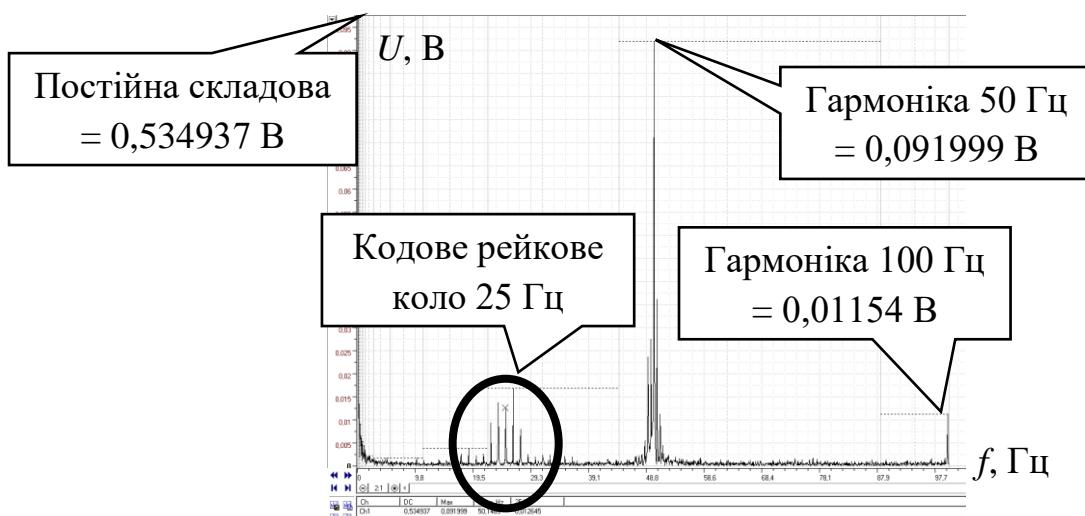


Рисунок 1.17 – Форма спектру зворотного тягового струму в одній рейці при відключенні ТП постійного струму

1.6 Постановка задач дисертаційного дослідження

Згідно проведеного аналізу, встановлено, що максимальне значення постійного тягового струму, що виноситься в бік полігону електротяги змінного струму, може перевищувати 150 А в точці ДП біля вхідного світлофора станції стикування, а по мірі віддалення вглиб перегону змінного струму – зменшується. На відстані 25 км постійна складова становить 20-30 А. Цей струм впливає не тільки на працездатність РК, а і на цілісність колійних металевих конструкцій вздовж колії, полігону електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування.

Також встановлено, що до впливу постійного тягового струму схильні ДТ без повітряного проміжку – ДТ-1-150 [7, 10, 36, 105], а при наявності асиметрії [102, 108] по постійному струму – ДТ з повітряним проміжком – ДТ-0,6-500С, які при насиченні осердя змінюють свої характеристики, що призводить до відмов РК і перекриття світлофорів, що підтверджується статистикою відмов апаратури РК (рис. 1.9).

Для вирішення розглянутих проблем впливу завад постійного тягового струму пропонується заблокувати його поширення в бік полігону електротяги змінного струму та переглянути характеристики А-параметрів ДТ-1-150 для

розрахунку регулювальних таблиць РК. Дослідження цих технічних рішень є одним із завдань даної дисертаційної роботи. Тому необхідно:

1. Розробити математичну модель для аналізу розтікання завад постійного тягового струму у нормальному і вимушенному режимах роботи тягових підстанцій, в бік рейкової мережі полігону електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування.
2. Проаналізувати рівень струму та потенціалу на ізолюочому стику при короткому замиканні в тяговій мережі полігону електротяги змінного струму, і, як наслідок, здійснити блокування протікання змінного тягового струму через середню точку дросельного пункту.
3. Розробити математичну модель, яка описує електромагнітні процеси роботи феромагнетиків, та отримати й оцінити електричні параметри ДТ-1-150, при роботі в нелінійній області, що описується основною кривою намагнічування $B(H)$, яка дозволить врахувати заваду постійного тягового струму. Провести розрахунки основних режимів роботи рейкових кіл, враховуючи підмагнічування ДТ-1-150, та здійснити оцінку зміни параметрів рейкового кола.
4. Розробити метод і засіб захисту рейкових кіл полігону електротяги змінного струму шляхом блокування розтікання змішаних струмів станції стикування.
5. Виконати техніко-економічну оцінку впровадження результатів дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ СТРУМІВ І ПОТЕНЦІАЛІВ В РЕЙКОВИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ДІЛЯНОК

2.1 Аналітична оцінка характеру розподілу постійних струмів в рейкових мережах електрифікованих ділянок змінного струму в зоні станції стикування

Враховуючи міркування в першому розділі за причинами відмов РК систем СЦБ електротяги змінного струму, потрібно розробити математичну модель розподілення постійних тягових струмів та потенціалів при створенні найбільш проблематичних режимів роботи тягової мережі [31, 38, 74, 105]. Основними вихідними даними моделі є нормальні та вимушений режими роботи тягової підстанції, зміна значення переходного опору, колійний розвиток та довжина ділянок (зон).

Для оцінки критеріїв адекватності моделі використаємо раніше отримані експериментальні дані ділянки станції стикування «П'ятихатки – стикова» (рис. 1.10, рис. 2.1).

Було досліджено характер розподілу постійних струмів в тягових мережах електрифікованих ділянок змінного струму в зоні станції стикування «П'ятихатки – стикова», для чого складено системи рівнянь (2.1), що його описують. Розрахунки проводилися на ЕОМ [4, 26, 72, 74, 77, 115] для нормального і вимушеної режими роботи ТП «П'ятихатки» (розрахункова схема рис. 2.2, рис. 2.7).

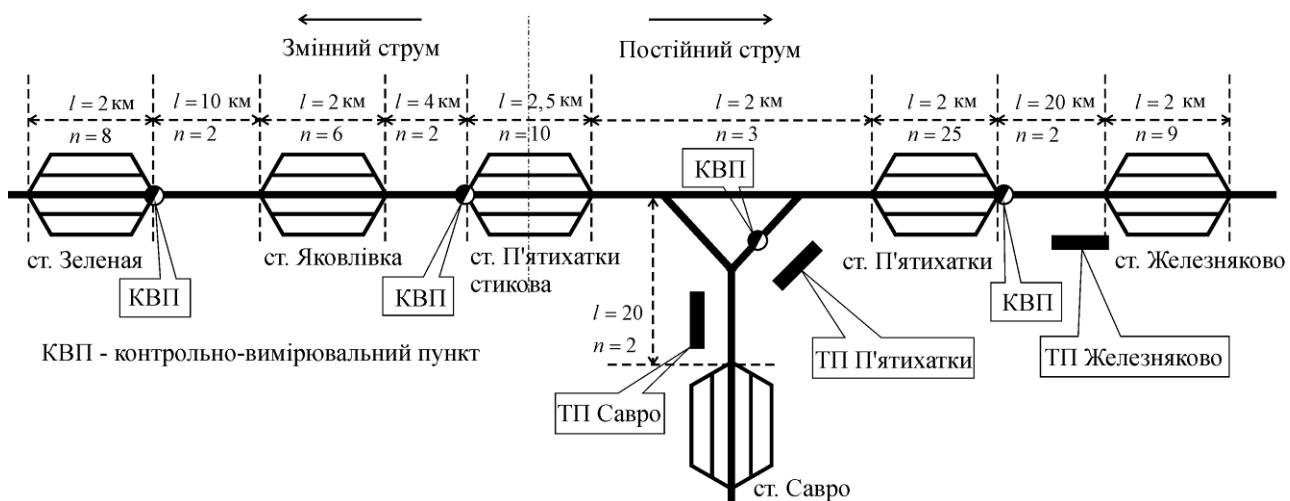


Рисунок 2.1 – Схема ділянки

Для розрахунку струмів і потенціалів складаємо розрахункову схему, в якій об'єднуємо ТП Железняково і Савро. Розглянемо миттєву схему, в якій струм електровоза $I_1 = 300$ А, струм електровоза $I_2 = 2022$ А.

Для нормального режиму роботи тягових підстанцій складаємо миттєву розрахункову схему (рис. 2.2).

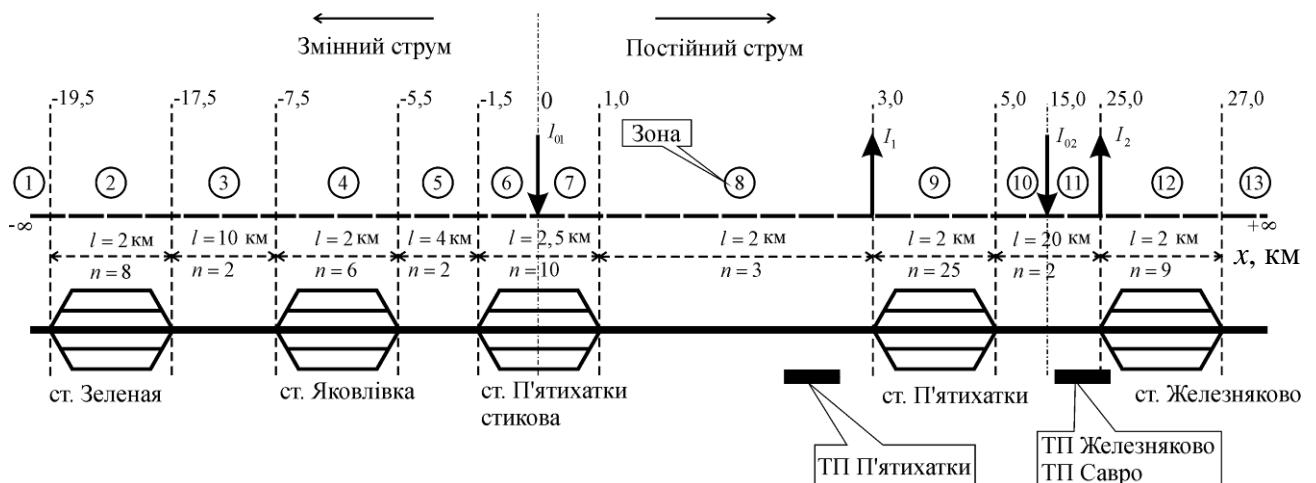


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема, нормальній режим

Як зазначалося вище для моделювання поширення тягового струму і потенціалу рейкової мережі ділянки (рис. 2.2) запропоновано модель, що описується наступними рівняннями:

$$\begin{cases} U_{xj}[i] = (A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) + (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i]), \\ I_{Pxj}[i] = -\frac{1}{R_B[q, i]} [(A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) - (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i])], \end{cases} \quad (2.1)$$

де U_x – потенціал рейки на відстані від початкової координати або навантаження, В; I_{Px} – струм в рейках на відстані від початкової координати або навантаження, А; i – номер розрахункової ділянки; α – коефіцієнт поширення хвилі; j – індекс, що визначає режим роботи ТП (ввімкнена чи відімкнена).

Система рівнянь (2.1) є вдосконаленим підходом вирішення системи рівнянь Гельмгольца [40, 45, 74, 77]:

$$U_{pxi} = A_i \cdot e^{kx} + B_i \cdot e^{-kx},$$

$$I_{pxi} = -\frac{1}{R_{rvi}} \left(A_i \cdot e^{kx} - B_i \cdot e^{-kx} \right),$$

де i – номер зони; x – поточна кілометрова координата; A_i , B_i – постійні коефіцієнти інтегрування; R_{rvi} – хвильовий опір рейкової мережі, Ом,

$$R_{rvi} = \frac{\sqrt{r_p \cdot r_n}}{n_i},$$

де r_p – питомий подовжній опір одноколійної ділянки рейкової мережі, Ом/км; r_n – питомий перехідний опір «рейка – земля» одноколійної ділянки, Ом·км; n_i – кількість колій у зоні i ; k – коефіцієнт розповсюдження рейкової мережі, 1/км, ($k = \sqrt{r_p/r_n}$).

Спільним рішенням (2.1) для визначення струму і потенціалу рейкової мережі кожного з режимів роботи ТП є система з граничними умовами (2.2) з ланцюговою схемою заміщення рейкової лінії [45, 70, 74, 77]:

$$\begin{cases} (A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) + (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i]) = 0 \mid x[i] = \infty, \\ (A[i-1]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) + (B[i-1]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i]) = \\ = (A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) + (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i]) \mid x[i] <> x[n], \\ -\frac{1}{R_B[q, i-1]} [(A[i-1]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) - (B[i-1]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i])] = \\ = -\frac{1}{R_B[q, i]} [(A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) - (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i])] \mid x[i] <> x[n], \\ -\frac{1}{R_B[q, i-1]} [(A[i-1]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) - (B[i-1]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i])] - \\ -\frac{1}{R_B[q, i]} [(A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) - (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i])] = I[n] \mid x[i] = x[n], \end{cases} \quad (2.2)$$

де q – індекс вибору опору ізоляції рейкової лінії; $I[n]$ – струм локомотива або ТП з координатою в точці n , А; R_B – хвильовий опір рейкової лінії (Ом/км), що залежить від особливості ділянки; A , B – постійні інтегрування в конкретно взятій точці i .

Розрахунок було проведено для двох режимів роботи тягової мережі: нормальному – всі ТП ввімкнені; вимушенному – ТП П'ятихатки відімкнена.

Питомий перехідний опір «рейка – земля» приймаємо в діапазоні від 0,1 до 10,0 Ом·км.

2.1.1 Нормальний режим роботи тягової підстанції

Для визначення коефіцієнтів A , B задаємося граничними умовами, взятыми з розрахункової схеми нормального режиму (рис. 2.2) та умовами системи рівнянь (2.2). Підставивши граничні умови в рівняння (2.2), отримаємо систему рівнянь, вирішивши яку знайдемо коефіцієнти A , B .

Систему рівнянь (2.2) вирішимо за допомогою математичних пакетів Maple та Visual Studio, де побудований генератор граничних умов і рівнянь з використанням основних ланцюгових схем [4, 20, 43, 60, 45], та з урахуванням умов розташування об'єктів, наявності стикових з'єднувачів та масиву зміни питомого перехідного опору [72, 115]. Підставивши отримані коефіцієнти A , B в рівняння (2.1), знайдемо розподілення струмів і потенціалів в рейковій мережі (рис. 2.3, рис. 2.4) по дільниці (рис. 2.2). На рис. 2.3, рис. 2.4 вказана кілометрова сітка від $-\infty$ до $+\infty$, з граничними умовами: довжина ділянки обмежена (-25,0 км ... 40 км); розташуванням об'єктів електропостачання (ТП) та споживачів постійного тягового струму (електрорухомий склад постійного струму), з зазначенням постійних тягових струмів .

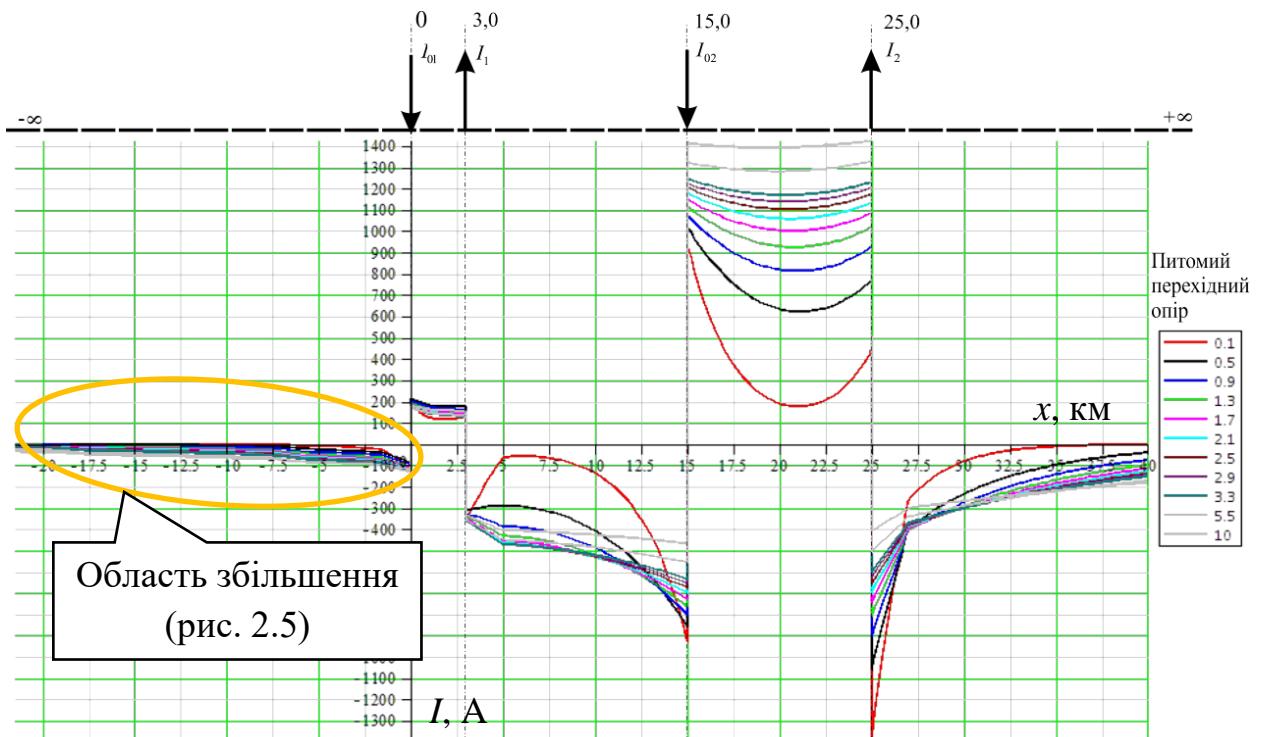


Рисунок 2.3 – Розподіл тягового струму в нормальному режимі роботи ТП

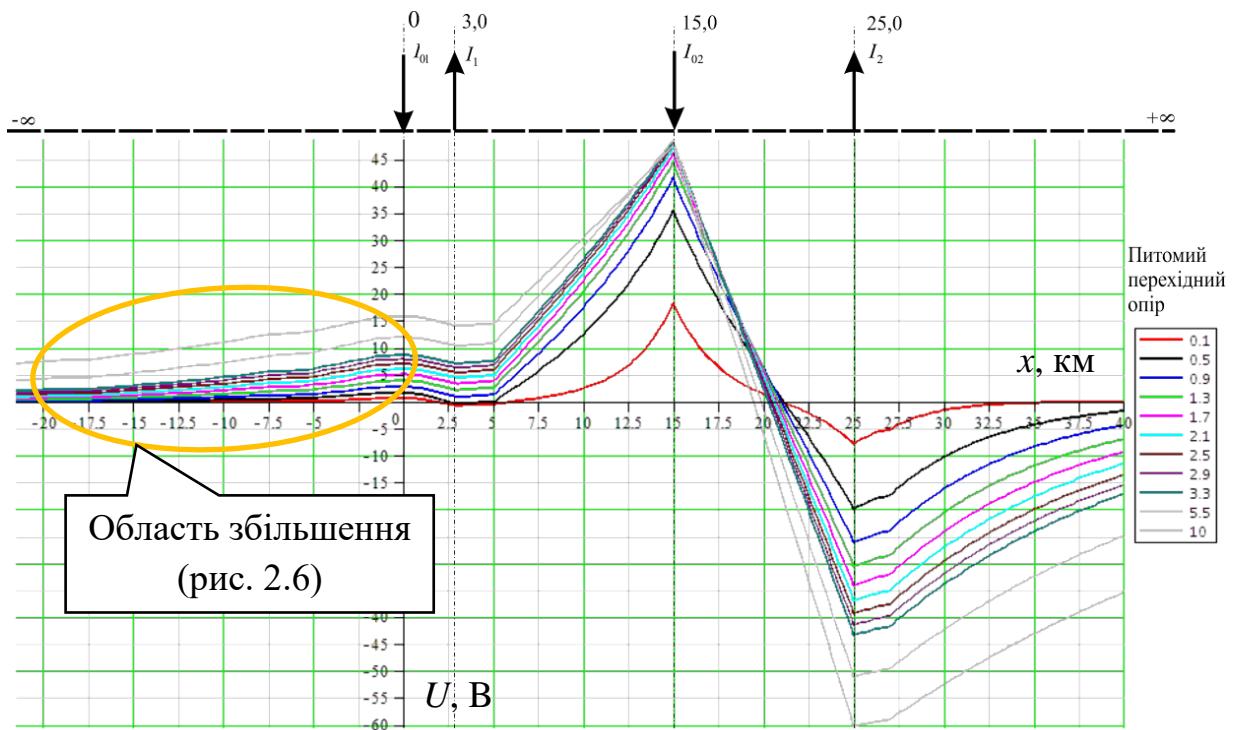


Рисунок 2.4 – Розподіл потенціалу в нормальному режимі роботи ТП

Для здійснення аналізу в нас більшою мірою цікавить ділянка від 0 до $-\infty$, так як вона є полігоном електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування і необхідний для оцінювання рівнів постійних струмів і потенціалів,

які виносяться зі станції стикування. Було збільшено область від 0 до $-\infty$ і представлено її у тривимірному вигляді (рис. 2.5, рис. 2.6).

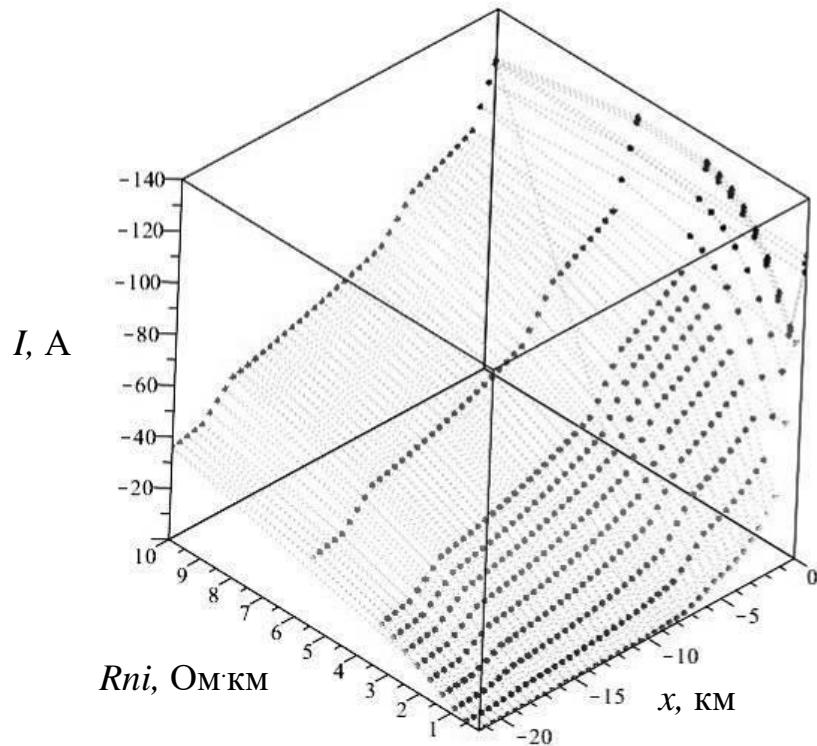


Рисунок 2.5 – Розподіл тягового струму в нормальному режимі (від 0 до $-\infty$)

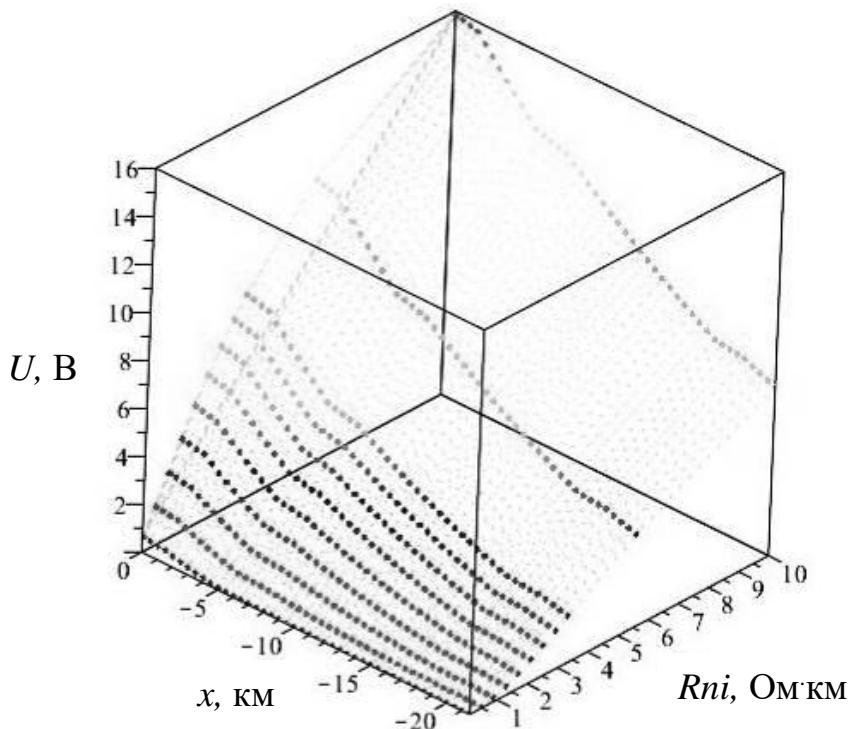


Рисунок 2.6 – Розподіл потенціалу в нормальному режимі (від 0 до $-\infty$)

2.1.2 Вимушений режим роботи тягової підстанцій

Вигляд розрахункової схеми для вимушеної режими проведено на рис. 2.7, де між розрахунковими зонами 8 і 9 відключена ТП П'ятихатки.

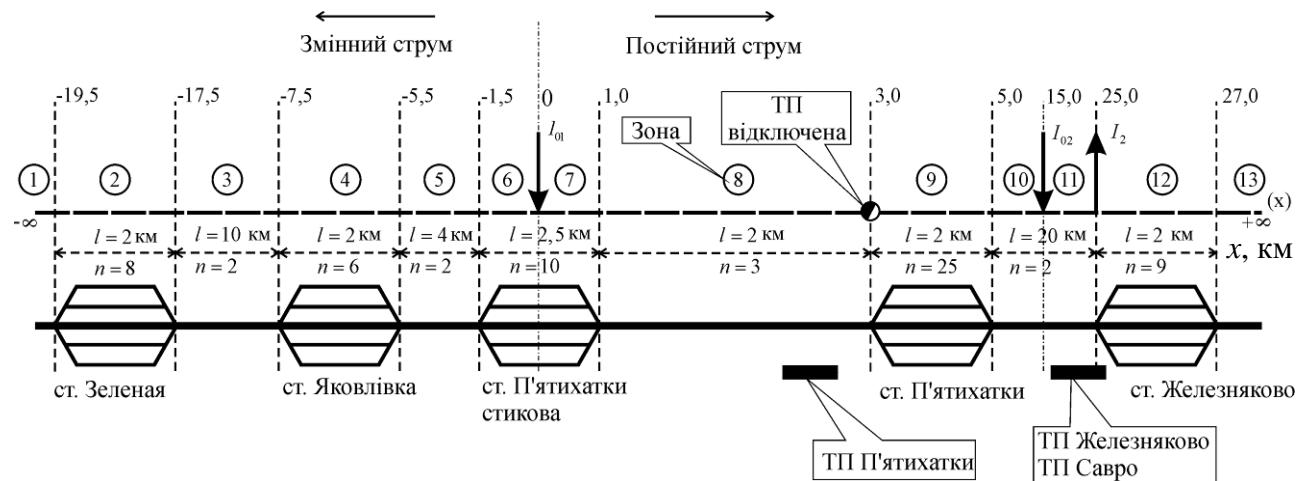
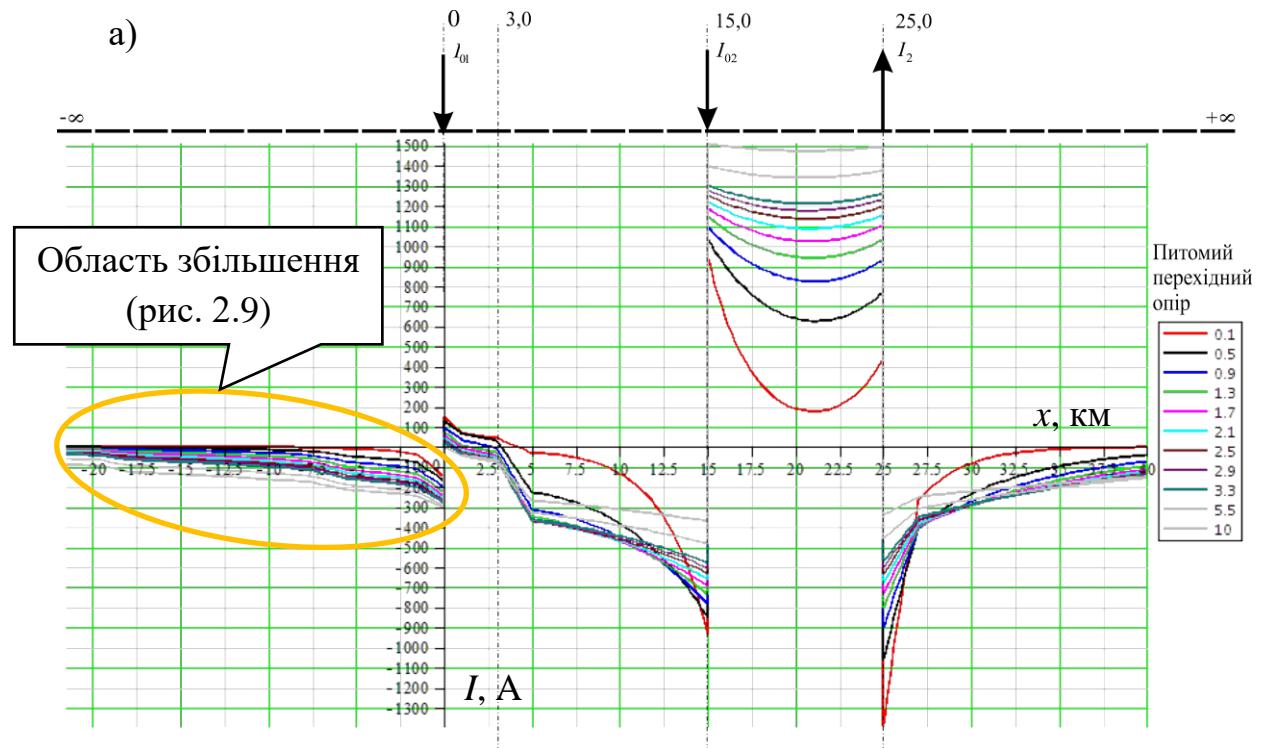


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема, вимушений режим

Для вимушеної режими граничні умови такі ж, як і для нормальногорежиму, крім умови підключення об'єктів. Прийнявши струм ТП П'ятихатки $I_1 = 0$.

Вирішаючи систему (2.2) і підставивши отримані коефіцієнти A , B в рівняння (2.1), знайдемо розподілення струмів і потенціалів в рейковій мережі (рис. 2.8) по розрахунковій схемі (рис. 2.7).



б)

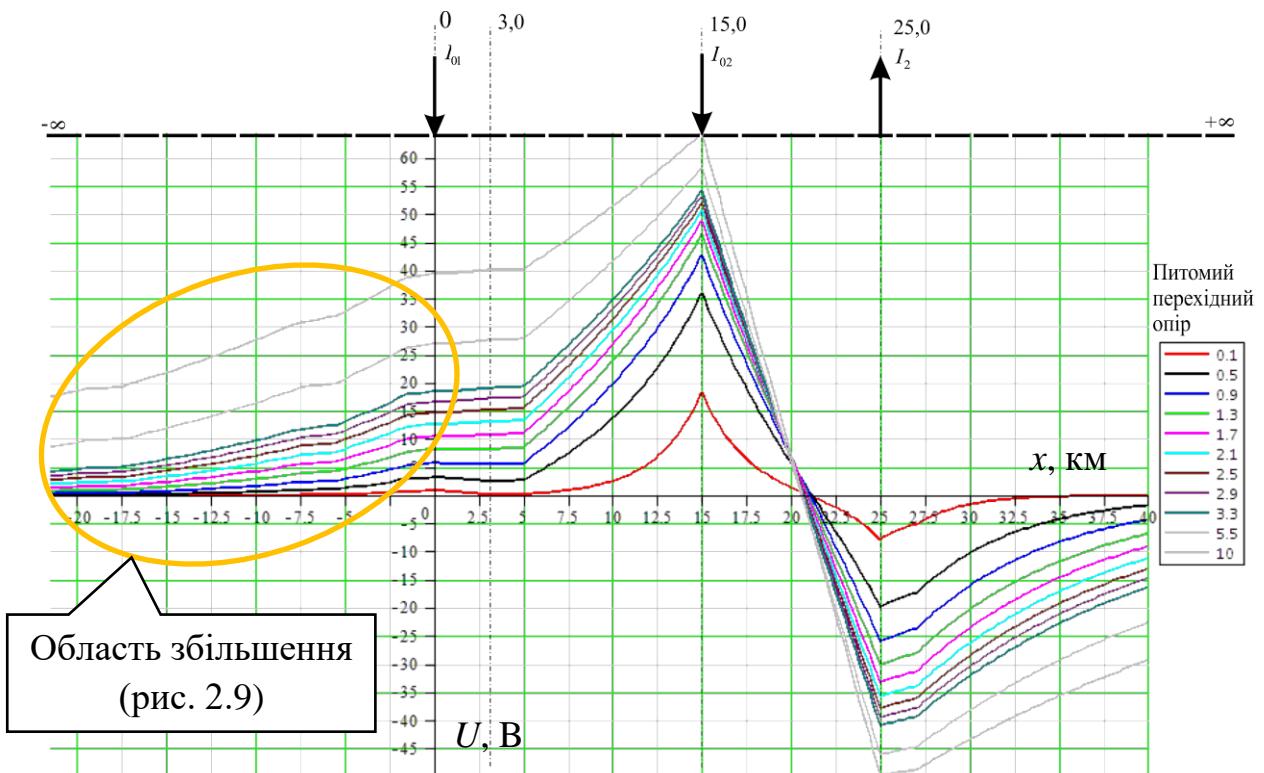
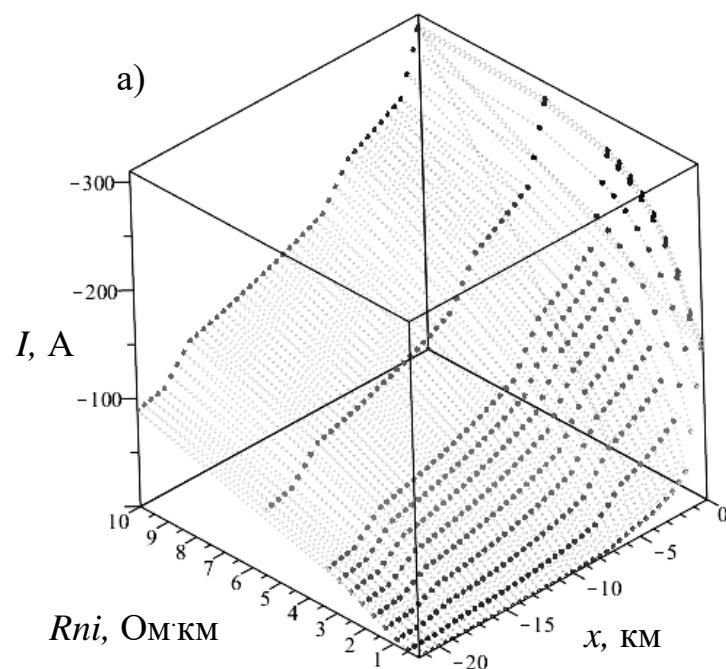


Рисунок 2.8 – Розподіл тягового струму (а) та потенціалу (б) у вимушенному режимі роботи ТП

Для оцінювання рівнів постійних струмів і потенціалів наведена ділянка від 0 до $-\infty$ рис. 2.9.



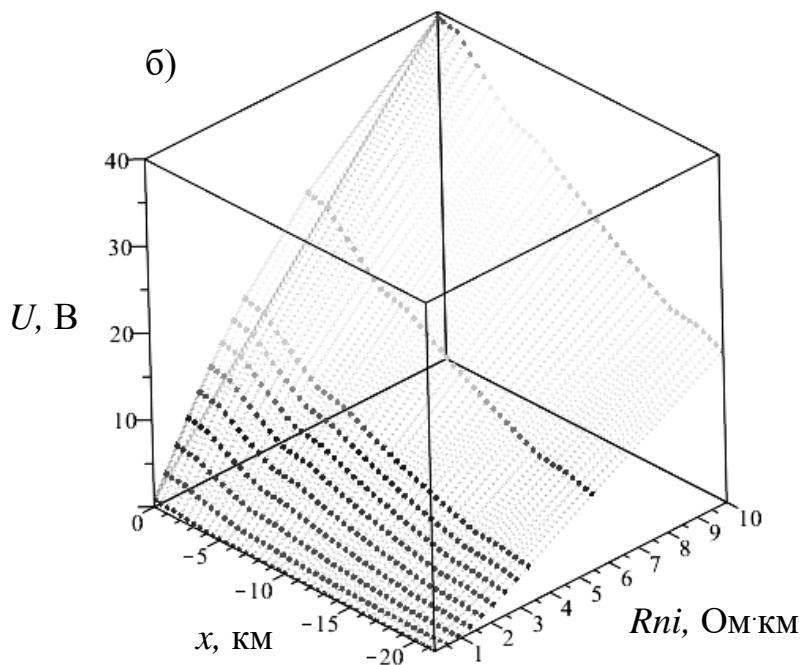


Рисунок 2.9 – Розподіл тягового струму (а) та потенціалу (б) в вимушенному режимі (від 0 до $-\infty$)

Розрахунки показують, що досить високі рівні постійних тягових струмів проходить через дросель – трансформатори станції «Зелена», що розташована на відстані близько 20 км від станції стикування «П'ятихатки – стикова» (рис. 2.5). При відключені ТП П'ятихатки тягові постійні струми різко зростають (рис. 2.9) особливо при високому перехідному опорі «рейка – земля» в зимовий період при сильних морозах і в літній період при сухій і спекотній погоді. За рахунок поздовжньої і поперечної асиметрії РК викликаної станом колійних з'єднувачів струмопровідних стиків, зусиллям затягування болтів колійних накладок, станом заземлення опор контактної мережі та інших споруд, заземлених на рейки, відбувається підмагнічування магнітопроводів колійних дросель – трансформаторів, що призводить до збою в роботі пристрій СЦБ та перекриття світлофорів.

2.2 Експериментальне дослідження струмів і потенціалів рейкового кола на ділянках змінного струму при нормальному і вимушенному режимі роботи тягової підстанції

Експериментальна оцінка рівня потенціалів «рейка – земля» здійснювалася шляхом вимірювання та реєстрації потенціалів і струмів в

західних горловинах станції «П'ятихатки – Стикова» і «Яковлівка» (рис. 2.1). З метою оцінки розподілу струмів і потенціалів в рейкових мережах при нормальному і вимушенному режимах роботи тягових підстанцій були проведені вимірювання параметрів тягових підстанцій Савро, Железняково і П'ятихатки.

Загальна витрата електроенергії тягових підстанцій за період з 8.00 годин 17.01.2014 р. по 8.00 годину 18.01.2014 р. наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Загальна витрата електроенергії тягових підстанцій

Зафіксовані значення	Підстанція		
	П'ятихатки	Железняково	Савро
W, кВтгодин	78948	88704	17090
U, кВ (вхід)	35,4	35,0	37,0
U, кВ (шини)	3,3	3,4	3,5
I, А (вхід)	32,5	103	19,2
I, А (шини)	488	1545	289

Загальна витрата електроенергії тягової підстанції в вимушенному режимі (тягова підстанція П'ятихатки відключена) за період з 12.00 години до 16.00 години 18.01.2014 р. представлена в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Загальна витрата електроенергії підстанцій в вимушенному режимі

Зафіксовані значення	Підстанція		Зафіксовані значення	Підстанція	
	Савро	Железняково		Савро	Железняково
U, кВ (вхід)	37,0	34,9	W, кВтгодин	-	22134
U, кВ (шини)	3,56	3,4	I, А (шини)	580	1590

У 2013 році ТП Савро була відключена і її навантаження сприйняла на себе ТП Зав'яловка. Загальна витрата електроенергії ТП наведена в табл.2.3.

Таблиця 2.3 – Загальна витрата електроенергії підстанцій
при відключені ТП Савро

Зафіксовані значення	Підстанція:		
	П'ятихатки	Железняково	Зав'яловка
U, кВ (шини)	33	34,6	34,8
W, кВтгодин (жовтень)	2278596	2680289	692599
W, кВтгодин (14.30-16.47 17.11.13.)	63383	101476	-

У табл. 2.1 – табл. 2.3 наведені витрати електроенергії на тягу поїздів, середня напруга на шинах тягових підстанцій і середні струми тягових

підстанцій. Наведені витрати електроенергії на тягу поїздів говорять про те, що струмові навантаження тягових підстанцій у 2014 році у порівнянні з 2013 роком практично не змінилися. Вплив системи тягового електропостачання постійного струму на роботу пристройів СЦБ на електрифікованих ділянках змінного струму в зоні станції стикування «П'ятихатки – стикова» залишився незмінним, що підтвердили результати вимірювань струмів і потенціалів рейок на перегоні між станцією стикування «П'ятихатки – стикова» і станцією «Яковлівка».

Вимірювання і реєстрація струмів та потенціалів в рейкових колах здійснювалися вимірювальним приладом М – 231 і вимірювальними шунтами, АЦП типу L-Card E-14-140 з ЕОМ.

Потенціали «рейка – земля», зафіксовані приладом М – 231 в західній горловині станції «П'ятихатки – стикова» 17.11.2014 р, наведені у табл. 2.4, а в західній горловині станції «Яковлівка» у табл. 2.5.

Таблиця 2.4 – Зміна потенціалу «рейка – земля» станції «П'ятихатки – стикова»

t, хв 14.21...14.30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Up, В	18	12	13	14	16	18	18	17	18	17
Up cp, В	16,1									
t, хв 14.31...14.40	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Up, В	18	15	14	10	12	5	7	10	11	10
Up cp, В	11,2									

Продовження таблиці 2.4

t, хв 14.41...14.50	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Up, В	9	6	10	12	11	10	13	12	18	10
Up cp, В	11,1									
t, хв 14.51...15.00	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Up, В	17	20	22	20	20	20	20	22	23	15
Up cp, В	19,9									

Таблиця 2.5 – Зміна потенціалу «рейка – земля» станції «Яковлівка»

t, хв 15.51...16.00	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Up, В	13	8	11	13	20	21	20	14	5	7
Up cp, В	13,2									
t, хв 16.01...16.10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Up, В	12	15	10	10	5	10	11	16	10	15
Up cp, В							11,4			
t, хв 16.11...16.20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Up, В	10	12	17	16	20	10	4	1	12	10
Up cp, В							11,2			

Характерні приклади вимірювання струмів і потенціалів рейок в момент відключення ТП П'ятихатки наведені на рис. 2.9 – рис. 2.11.

На рис. 2.10 приведена форма струму в середній точці біля дросельного пункту (ДП), виміряного в західній горловині станції «П'ятихатки – стикова». На рис.2.11. наведено спектральний склад цього струму. Максимальне значення тягового постійного струму – 125 А, максимальне значення на колію тягового змінного струму склало 81 А.

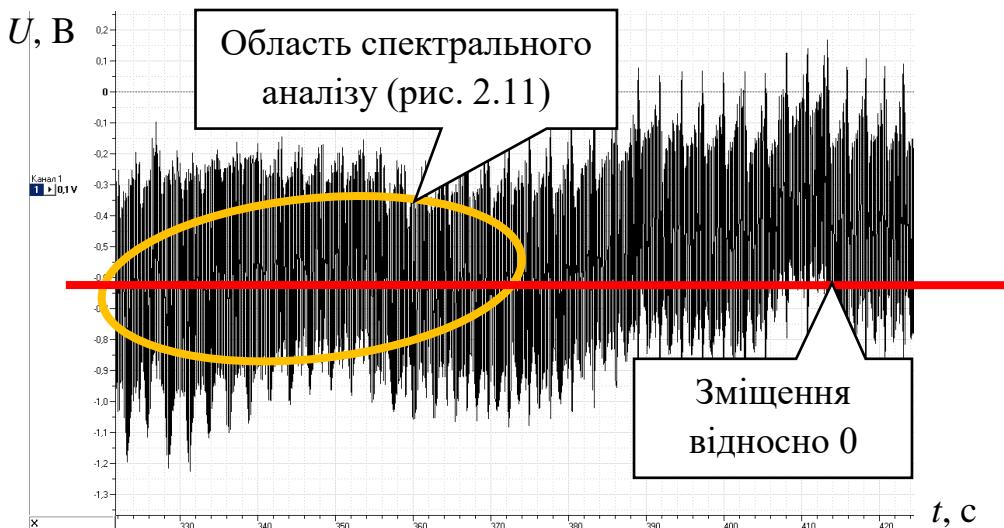


Рисунок 2.10 – Викопіювання форми тягового струму в середній точці ДП біля вхідного світлофора західної горловини станції стикування

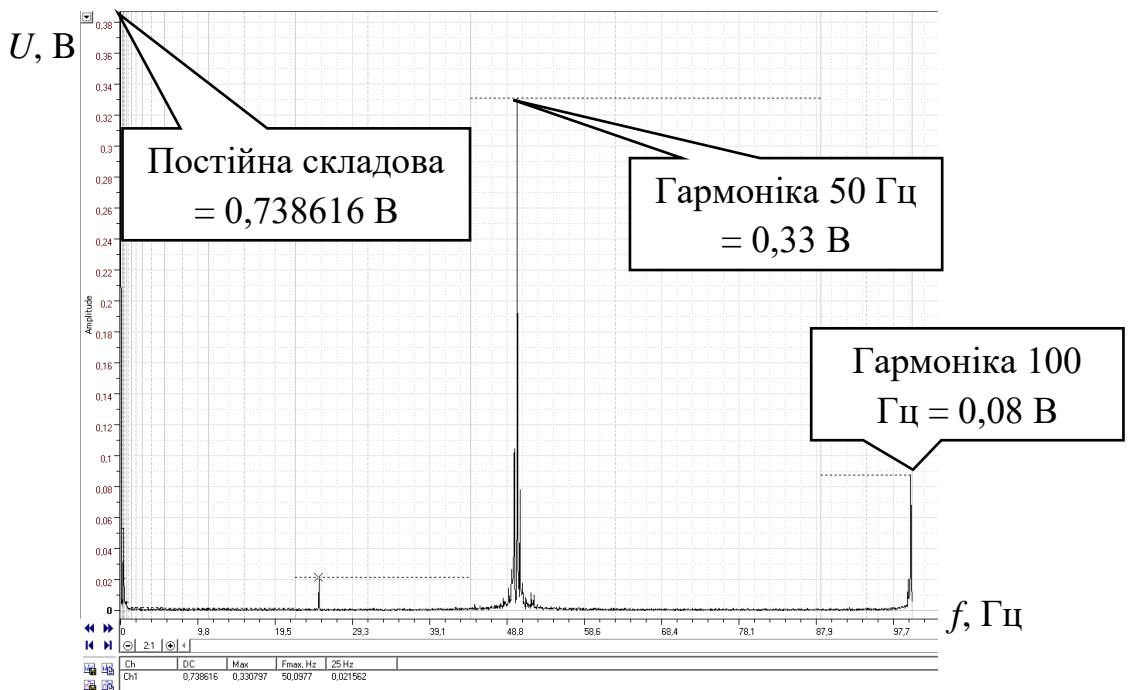


Рисунок 2.11 – Спектр тягового струму в середній точці ДП

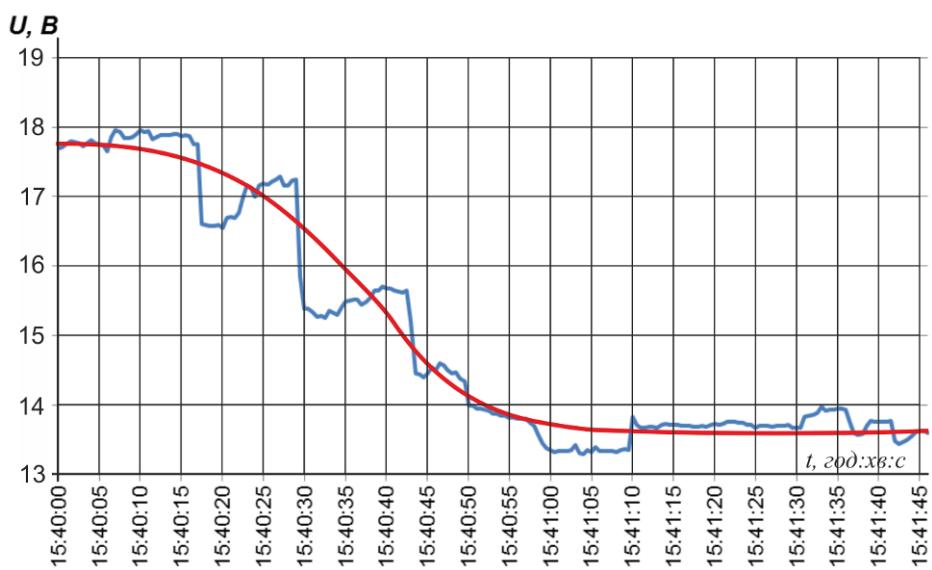


Рисунок 2.12 – Вимірювання потенціал «рейка-земля» біля вхідного світлофора західної горловини станції «Яковлівка»

На рис. 2.12 наведено постійний потенціал «рейка – земля», вимірюваний в західній горловині станції «Яковлівка».

Максимальне значення потенціалу постійного струму склало ≈ 18 В.

Проведені вимірювання підтвердили результати розрахунків і дали можливість зробити висновок, що тягові постійні струми досить далеко проникають на полігон електрифікованих ділянок змінного струму, а при

асиметрії (поздовжній і поперечній) параметрів РК (опір рейок і перехідний опір «рейка – земля») можуть підмагнічувати магнітопроводи колійних дросель – трансформаторів типу ДТ-1-150, які знаходяться в глибині полігону електротяги змінного струму, що є причиною збоїв у роботі пристройів СЦБ.

У зв'язку з цим для забезпечення нормальної роботи пристройів СЦБ на електрифікованих ділянках змінного струму, що примикають до станції стикування необхідно:

1. Для обмеження впливу тягових постійних струмів на РК електрифікованої ділянки змінного струму, профілактичні роботи на ТП П'ятихатки з повним її відключенням необхідно проводити в весняний – осінній період при зниженому перехідному опорі «рейка – земля».

2. Для запобігання корозійного пошкодження залізобетонних опор і фундаментів контактної мережі і елементів залізничної колії незалежно від опору розтікання опор на полігоні контактної мережі змінного струму необхідно виконати такі ж заходи як і на електрифікованих ділянках постійного струму (в індивідуальне заземлення опор встановити іскрові проміжки, в групові заземлення встановити іскрові проміжки і діодні заземлювачі, ізолювати хомут і закладні деталі від тіла опор і т. п.).

3. Для усунення розтікання тягових постійних струмів в РК електрифікованої ділянки змінного струму необхідно не з'єднувати нульові точки дросель-трансформаторів дросельного пункту вхідного світлофора станції стикування. У цьому випадку, особливо при коротких замиканнях в тягової мережі, можлива поява небезпечних потенціалів на ізоляючому стику, який можна знизити включенням у розтин між нульовими точками дросель-трансформаторів силових захисних комутуючих блоків (СЗКБ).

Адекватність математичної моделі (2.1, 2.2) експериментальним даним була досягнута завдяки збільшенню кількості рівнянь ланцюгових схем, що описують струм та потенціал, і оцінювалася за критерієм Вілкоксона на 5% рівні значності.

Основною причиною відмов РК систем СЦБ в зоні примикання електротяги змінного струму, як встановлено розрахунками й експериментальними дослідженнями, є насичення магнітопроводів колійних дросель-трансформаторів ДТ-1-150 постійним зворотним тяговим струмом витоку зі станції «П'ятихатки – Стикова». Крім цього встановлено, що струм, який насичує магнітопровод в основній обмотці ДТ-1-150, виникає і внаслідок асиметрії рейкової лінії по постійному струму (для ДТ-0,6-500 не більше 60,0 А – 6 %), що значно перевищує нормативні величини (для ДТ-1-150 не більше 12 А – 4 % по змінному струму) [108].

Вимірювання коефіцієнта асиметрії в діючих пристроях систем СЦБ показують, що його величина, як і слід було очікувати, є найбільшою взимку, аніж влітку. Обробка статистичних даних вимірювань опору струмопровідних стиків, які здійснюють значний вплив на величину асиметрії рейкової лінії, показала, що опір стиків розділено по несиметричному закону. Розкид опорів коливається від 1,8 до 15 м.ц.р. (метрів цілого рейки) [84]. Також встановлено, що коефіцієнт поздовжньої асиметрії влітку сягає 10% ... 12%, взимку 18% ... 28%.

2.3 Розрахунок небезпечного потенціалу на ізоляючому стику

Режим короткого замикання в тягової мережі характеризується різким зростанням струму, а, отже, і потенціалів рейок [103]. Максимальний потенціал рейок при короткому замиканні (КЗ) виникає в місці розриву рейкової мережі і пропорційний току КЗ, що впадає в рейки, і хвильовому (вхідному) опору рейок. Розрахункова схема представлена на рис. 2.13.

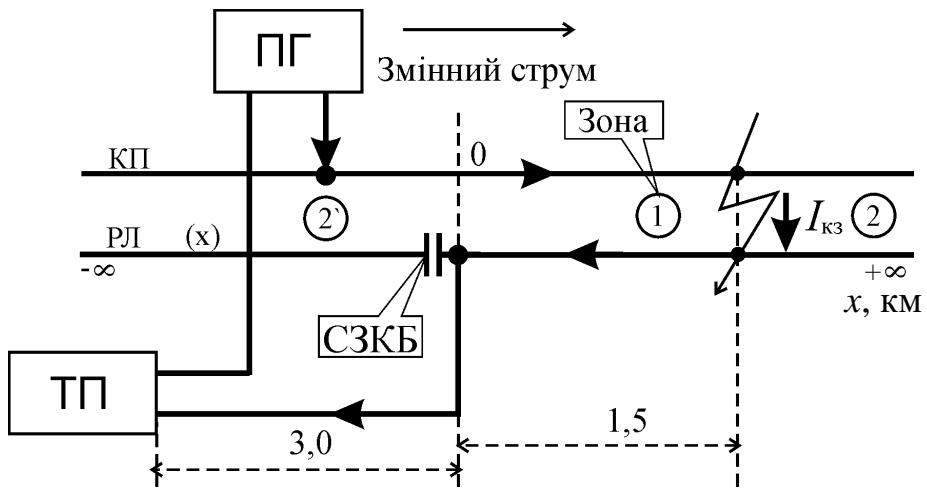


Рисунок 2.13 – Розрахункова схема струмів та потенціалів при КЗ (ТП – тягова підстанція; ПГ – пункт групування)

Пункт групування станції стикування призначений для перемикання роду струму в контактній мережі без навантаження на станціях стикування 3,3 кВ постійного струму і 27,5 кВ змінного струму електрифікованих дільниць.

Визначимо величину струму короткого замикання $I_{K3} = U/Z_k$, де U – напруга на шинах ТП, $U = 27,5$ кВ; Z_k – опір контуру струму короткого замикання $Z_k = Z_n \cdot l_{PROB}$, де Z_n – опір живлячих проводів А-185, 0,5 Ом/км [72, 74, 115] (Опором рейок нехтуємо, адже він буде дуже малим у порівнянні з опором живлячих проводів); l_{PROB} – довжина живильних дротів. Тоді $Z_k = 0,5 \cdot 8 = 4$ Ом/км, $I_{K3} = 27,5/4 = 6,875$ кА.

Враховуючи, що струм у контактному проводі і струм в рейкової мережі, при короткому замиканні, будуть рівними, представимо рівняння (2.1, 2.2) для розрахунків потенціалів і струмів рейкової мережі при короткому замиканні у в наступному виді:

$$\begin{cases} U_{x_j}[i] = (A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) + (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i]), \\ I_{Px_j}[i] = -\frac{1}{R_B[q, i]} [(A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) - (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i])] - I_{K3} \cdot \frac{Z_{kp}}{Z_p}, \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
& (A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) + (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i]) = 0 \Big| x[i] = \infty, \\
& -\frac{1}{R_B[q, i]} [(A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) - (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i])] - I_{K3} \cdot \frac{Z_{kp}}{Z_p} = I_{K3} \Big| x[i] = 0, \\
& (A[i-1]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) + (B[i-1]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i]) = \left| \begin{array}{l} x[i] < x[n], \\ (A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) + (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i]) \end{array} \right. \\
& -\frac{1}{R_B[q, i-1]} [(A[i-1]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) - (B[i-1]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i])] = \left| \begin{array}{l} x[i] < x[n], \\ (A[i]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) - (B[i]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i]) \end{array} \right. \\
& = -\frac{1}{R_B[q, i]} [(A[i-1]) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) - (B[i-1]) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i])] + \left| \begin{array}{l} x[i] = x[n], \\ + I_{K3} \cdot \frac{Z_k}{Z_p} - \end{array} \right. \\
& -\frac{1}{R_B[q, i]} [(A \parallel i) \cdot \exp(\alpha[q] \cdot x[i]) - (B \parallel i) \cdot \exp(-\alpha[q] \cdot x[i])] = I_{K3} \quad \left| \begin{array}{l} x[i] = x[n], \\ x[i] = x[n], \\ x[i] = x[n], \end{array} \right. \tag{2.3}
\end{aligned}$$

де Z_p – повний опір рейкової мережі, Ом/км:

$$Z_p = \sqrt{X_p^2 + r_p^2},$$

де X_p – індуктивний опір рейкової мережі, для Р65 – 0,11 Ом/км; r_p – активний опір рейкової мережі, 0,252 Ом/км. Підставивши значення отримуємо:

$$Z_p = \sqrt{0,11^2 + 0,252^2} = 0,275 \text{ Ом/км}.$$

Нехай r_n – перехідний опір «рейка – земля», при $r_{n2} = 1$ Ом·км (для двох рейок), тоді $Z_{p\theta}$ – хвильовий опір рейкової мережі, Ом:

$$Z_{p\theta} = \sqrt{\frac{Z_p}{n} \cdot \frac{r_{n2}}{n}} \equiv R_B[q, i] \equiv R_B[q, i-1],$$

$$Z_{p\theta} = \sqrt{\frac{0,275 \cdot 1}{10 \cdot 10}} = 0,0524 \text{ Ом.}$$

Вирішуючи систему (2.3) і підставивши отримані коефіцієнти A , B в рівняння (2.1), отримуємо розподілення струмів і потенціалів (рис. 2.14) в рейковій мережі по дільниці рис. 2.13.

I_{K3}, A

a)

U_{K3}, B

б)

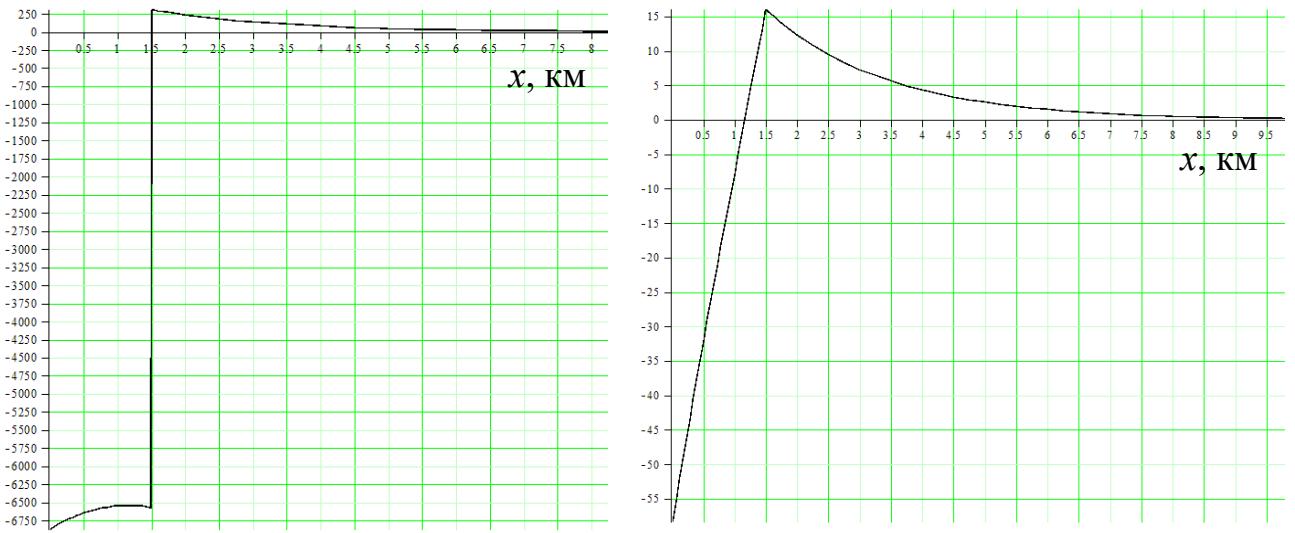


Рисунок 2.14 – Розподіл струму (а) та потенціалу (б) короткого замикання

Як показали розрахунки потенціали рейкової мережі при КЗ (рис. 2.14) в тяговій мережі, в місці розташування ізоляючого стику перевищують допустимі значення цих параметрів при КЗ в тяговій мережі на ділянках змінного струму [43, 72, 115]. Тому необхідно передбачити в конструкції СЗКБ, установку лавинних діодів [87, 88], що з'єднують нульові точки дросель-трансформаторів в місці установки СЗКБ для їх захисту від пошкоджень в режимі короткого замикання контактної мережі на рейкову.

2.4 Висновки за розділом 2

У розділі розроблена математична модель для дослідження рівня завади постійного тягового струму, яка розтікається в бік полігону електротяги змінного струму в залежності від стану перехідного опору ізоляції. Було отримано наступні результати:

1. Зростом перехідного опору ізоляції зростає завада постійного тягового струму та потенціал «рейка-земля», що призводить до збільшення дистанції розтікання та здійснення впливу на більшу кількість колійних металевих конструкцій та пристройів СЦБ.
2. Як показали розрахунки, потенціали рейок при КЗ в тяговій мережі в місці розташування ізоляючого стику перевищують допустимі значення цих параметрів при короткому замиканні в контактній мережі на ділянках змінного

струму [72, 103], тому в пристрої СЗКБ необхідно встановити лавинні діоди, що з'єднують нульові точки дросель-трансформаторів в місці установки блоків для їх захисту від пошкоджень в режимі короткого замикання контактної мережі на рейки [87, 88].

3. Розроблена модель та програмне забезпечення, призначені для розрахунку тягових струмів та потенціалів, можуть використовуватися не тільки для вирішення поставленої задачі для даної дільниці (див. рис 2.1), а й для визначення розподілу струмів і потенціалів на будь-яких інших ділянках залізниць.

4. Адекватність отриманої моделі перевірена за критерієм Вілкоксона на 5% рівні значності для різних режимів роботи ТП, при двох значеннях опору баласту 1,3-2,7 Ом·км (опір ізоляції баласту виміряно приладом ИСБ-2). Це дає можливість стверджувати, що отримана в цьому розділі математична модель коректна описує електромагнітні процеси в тяговій мережі постійного струму, та може бути використані для дослідження та проектування систем тягового електропостачання.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ФЕРОМАГНІТНОМУ ОСЕРДІ ДРОСЕЛЬ-ТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Комп'ютерне моделювання

Намагнічування і перемагнічування феромагнетиків широко використовується в різних галузях науки і техніки, у тому числі в магнітних методах неруйнівного контролю. Ці процеси є нелінійними і визначаються трьома чинниками: інверсією, обертанням і намагнічування [114, 123, 125]. Їх точний аналітичний опис є дуже трудовим, тому технічні розрахунки магнітних кіл з феромагнетиками проводяться з використанням великої кількості математичних моделей [2, 3, 15, 24, 46, 76, 79, 82, 119, 124], проте вибір тієї або іншої математичної моделі у кожному конкретному випадку ускладнений через відсутність аналізу меж застосування різноманітних формул.

Проаналізуємо найбільш поширені аналітичні вирази для опису основної кривої намагнічування і петель магнітного гістерезису та детально розглянемо математичну модель з використанням арктангенсовых функцій.

Основною вимогою при побудові моделі є достатня у кожному конкретному випадку точність і простота опису основної кривої намагнічування і петель магнітного гістерезису в усьому діапазоні зміни поля, що перемагнічує.

Комп'ютерне моделювання динамічних режимів електротехнічних систем змінного струму є актуальним завданням, для вирішення якого застосовуються такі відомі програмні комплекси Pspice, Simulink, Colo. Перші два програмні продукти - ліцензійні і вимагають фінансових витрат. Їх істотним недоліком є використання для моделювання динамічних процесів в трансформаторі методу Джилса-Атертона, що відрізняється перевантаженістю початковими даними і нечітким представленням петлі гістерезису. Останній програмний комплекс є вітчизняною розробкою [118], набагато доступнішого, а ніж ліцензійні програмні продукти, на відміну від яких Colo дозволяє проводити моделювання динамічних режимів в магнітоелектричних колах, що містять велику кількість

нелінійних елементів. Водночас застосування цієї програми вимагає певної підготовчої роботи по побудові нормального дерева кола з використанням пріоритету гілок, отриманню матриць інциденцій, контурів і перерізів, а також запису рівнянь зв'язку струмів і напруг на елементах дерева [118]. Крім того, при моделюванні нелінійних магнітних кіл не надається можливість аналізу гістерезису, який значною мірою впливає на форму струмів у колі і визначає втрати в сталі магнітопроводу.

Апроксимації петлі гістерезису і знаходженню способів її математичного опису присвячено немало робіт [2]. Аналіз феромагнітних схем [12, 89-95] методами математичного моделювання вимагає наявності відповідної методики, використання якої дозволяє отримувати як якісні, так і кількісні характеристики об'єкту. Така методика була запропонована в [37]. Феромагнітні схеми аналізуються на підставі розрахунку переходних і усталених процесів, описаних системою нелінійних диференційних рівнянь стану електричних і магнітних кіл. При вирішенні рівнянь використовуються методи чисельного інтегрування із застосуванням аналітичної апроксимації нелінійних характеристик сталі магнітопроводів трансформаторів.

Методика аналізу феромагнітних схем передбачає математичне моделювання окремих елементів схем і складається з наступних етапів.

1. Обґрунтування вибору методу розрахунку феромагнітних схем, його основні переваги й особливості застосування.

2. Розробка математичних моделей електромагнітних трансформаторів, в яких використовується аналітична апроксимація характеристик намагнічування трансформаторів (в рамках вирішення цієї задачі проводиться обґрунтування і вибір апроксимуючої функції, розробка методу визначення коефіцієнтів апроксимації і визначення коефіцієнтів апроксимації для тих типів і електротехнічних сталей магнітопроводів трансформаторів, які застосовуються).

3. Дослідження особливостей застосування й оцінка ефективності методів чисельного інтегрування для розрахунку ферорезонансних схем, визначення критеріїв вибору окремих методів.

При аналізі феромагнітних схем необхідно здійснити розрахунок перехідних і усталених процесів, що протікають в схемі, визначити струми і напругу. Оскільки феромагнітні схеми відносяться до нелінійних електричних кіл, то на відміну від лінійних, де дотримуються принципу накладення, не існує загальних прийомів аналітичного вирішення нелінійних диференційних рівнянь [16, 75]. У нелінійних колах всяка зміна форми і амплітуди діючого сигналу призводить до нового завдання з новим рішенням. Тому, для розрахунку нелінійних кіл застосовуються або чисельні методи розрахунку, або наближені аналітичні методи, придатні лише для обмеженого класу завдань.

Для розрахунку феромагнітних схем використовується метод, який ґрунтуються на складанні рівнянь кола з використанням аналітичної апроксимації нелінійних характеристик намагнічування трансформаторів і їх вирішенні методами чисельного інтегрування [75].

Цей метод у порівнянні з графоаналітичним методом умовної лінеаризації, кусково-лінійної апроксимації, гармонійного балансу і методом ізоклин [16, 43, 75], дозволяє отримати рішення з найбільш високою точністю наближення аналітичних виразів, що апроксимують нелінійні елементи, і точністю методу чисельного інтегрування.

Точність апроксимації нелінійних характеристик трансформаторів залежить від вибору апроксимуючої формули і визначення її коефіцієнтів.

Особливість застосування методів чисельного інтегрування полягає в тому, що при розрахунку потрібна обчислювальна техніка. Крім того, при розрахунку "жорстких" систем диференційних рівнянь (змінні, змінюються зі швидкостями, що відрізняються одна від одної на декілька порядків), до яких відносяться, наприклад, рівняння стану феромагнітних схем, необхідно проаналізувати чисельну стійкість і величину похибки конкретного вибраного методу [43].

Метод розрахунку ферорезонансних схем складається з наступних етапів:

1. За складеною розрахунковою схемою заміщення записується початкова система нелінійних диференційних рівнянь стану по першому і другому законам Кірхгофа для електричного і магнітного кола.

2. Здійснюється вибір змінних стану і перетворення початкової системи рівнянь в нормальну форму Коши. Вибір змінних стану виконується виходячи з умов відповідності правилам комутації і отримання найбільш простого математичного виразу для рівнянь стану.

3. Вирішення рівнянь стану методами наближеного чисельного інтегрування. Чисельне інтегрування вхідної системи рівнянь досить складне, вимагає тривалого часу та певних потужностей обчислювальних засобів. Тому система рівнянь перетворюється в нормальну форму Коши, оскільки для цього випадку детально розроблений математичний апарат, що дозволяє використати незалежно від виду функцій різні методи чисельного інтегрування [4, 20, 55, 60].

Щоб почати розрахунок переходного процесу визначаються початкові умови для вибраних змінних стану. Для точного визначення початкових умов при розрахунку переходних процесів у феромагнітних схемах розраховується схема мережі до комутації при нульових початкових умовах. Система диференційних рівнянь стану у формі Коши і вираз для струмів і напруг в обмотці трансформатора є кінцевою формою математичної моделі феромагнітної схеми.

У роботі одним із завдань є пошук найбільш раціональних математичних моделей для моделювання магнітних властивостей феромагнетиків [54, 123], які можуть бути застосовані в розробці методів розрахунку РК [113, 114].

Нижче розглянуті різні моделі, що описують криву намагнічування.

3.2 Аналіз методів моделювання кривої намагнічування

Модель Релея

В області слабких магнітних полів ($H \ll H_{CS}$) основна крива намагнічування добре описується формулою Релея[123]:

$$M = x_H H + b_R H^2,$$

де H – напруженість поля, що намагнічує, H_{CS} – коерцитивна сила за граничним циклом, M – намагніченість феромагнетика в магнітному полі з напруженістю H , x_H – початкова магнітна сприйнятливість, b_R – коефіцієнт Релея.

В області, близькій до насилення використовується формула Фреліха [124]:

$$M = \frac{M_S H}{a_S + H}, \quad (3.1)$$

де M_S – намагніченість насилення, a_S – стала для матеріалу, що описується.

Вираз (3.1) може бути представлене також у вигляді:

$$\frac{H}{M} = \frac{a_S + H}{M_S},$$

і дозволяє досить точно визначити величину M_S в полях, де M ще значно менше M_S .

Для опису кривої намагнічування у всій зоні зміни магнітного поля використовується велика кількість різноманітних функцій. У випадку коли H і M (чи магнітна індукція B) не змінюють знак, моделююча функція може бути парною чи непарною. У випадку коли H і B змінюють знак, то функція, що їх пов'язує, може бути тільки непарною. Коефіцієнти в моделюючих функціях визначаються за методом обраних точок або методом найменших квадратів [124].

По методу обраних точок результати розрахунку прив'язуються до експериментальних даних в заданих точках. Кількість цих точок на кривій намагнічування визначається кількістю незалежних коефіцієнтів, що входять до моделюючої функції. Обрані точки повинні знаходитися на ділянці кривої

намагнічування, що апроксимується, і відображати його характерні особливості.

Методом найменших квадратів коефіцієнти моделюючої функції визначаються з умови мінімуму середньоквадратичного відхилення її значень від експериментальних даних. Цей метод забезпечує кращий збіг моделюючої функції з реальною кривою намагнічування, але є більш громіздким у порівнянні з методом обраних точок.

У [15] виділені одинадцять груп функцій, які використовуються різними авторами для опису кривої намагнічування. Розглянемо можливості найбільш перспективних функцій з кожної групи.

Кусково-лінійна апроксимація

Для розрахунку магнітопроводів з малою нелінійністю магнітних властивостей матеріалу, з якого вони виготовляються, застосовують кусково-лінійну апроксимацію, при якій криву, що апроксимується, замінюють ламаною лінією з однією або декількома точками зламу (рис. 3.1) [3, 16, 123]. Кількість апроксимуючих ділянок залежить від необхідної точності розрахунку і діапазону зміни поля, що намагнічує. Наприклад, якщо матеріал знаходитьться поблизу області насычення, то для апроксимації кривої намагнічування використовують зазвичай дві прямі (рис. 3.1). В цьому випадку вважають, що в області від 0 до $H_i - B = \mu_i H$, а в області $H > H_i - B = B_i + \mu'_i (H - H_i)$, де H_i і B_i – відповідно напруженість і індукція в точці зламу, $\mu_i = B_i/H_i$, $\mu'_i = (B_i - B_0)/H_i$, а $B = B_0$ при $H = 0$ для другої кривої.

Якщо феромагнетик намагнічується від розмагніченого стану до стану магнітного насычення, то для побудови моделі вимагається не менше трьох прямих, при цьому тангенс кута нахилу першої прямої встановлюють рівним величині початкової магнітної проникності (рис. 3.1).

Перевагою кусково-лінійної апроксимації є те, що при її використанні нелінійне завдання можна звести до лінійного, а головним недоліком є стрибкоподібна зміна похідної при переході від однієї ділянки моделі до іншої,

що при використанні чисельних методів розрахунку може привести до неприпустимих похибок.

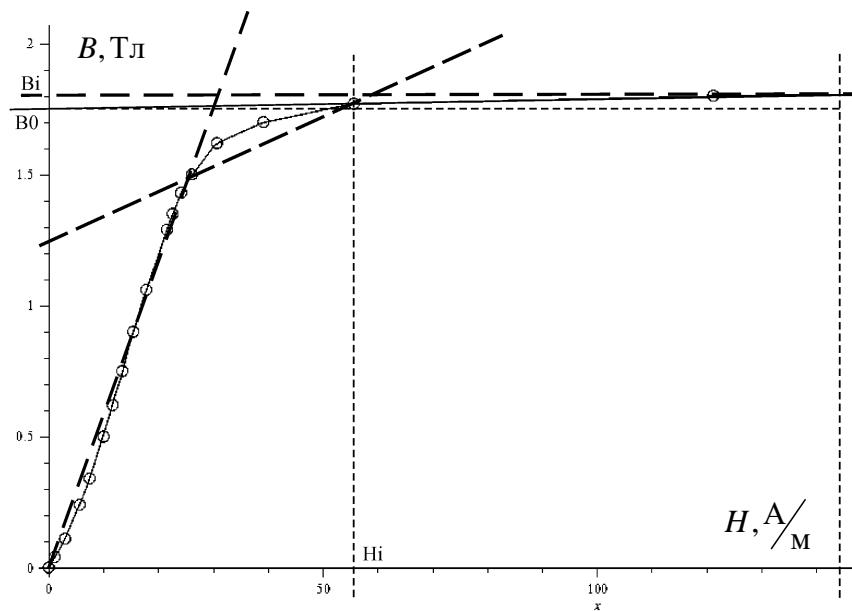


Рисунок 3.1 – Кусково-лінійна апроксимація

Гіперболічна апроксимація

Для апроксимації основної кривої намагнічування в області, близькій до насычення, використовується формула Фрелиха у вигляді гіперболічної функції

$$B = \frac{H}{p_1 + p_2 H},$$

де p_1 і p_2 – коефіцієнти, які визначаються методом обраних точок.

Проте крива намагнічування, яка визначається цією функцією, несиметрична відносно початку координат і може бути використана тільки у випадку, коли H і B не змінюють знак і лише в області напружених полів. Причому з неї витікає, що магнітна проникність не має екстремуму, а це не відповідає дійсності.

Апроксимація з використанням арктангенсу

Математична модель кривої намагнічування з використанням арктангенсу має вигляд

$$B = p_1 \arctan(p_2 H) + p_3 H. \quad (3.2)$$

Оскільки перший доданок у виразі (3.2) зі зростанням H асимптотично наближається до прямих, паралельних осі абсцис і розташованих від неї на відстані $\pm p_1$, то зміну магнітної індукції в цій області характеризує другий доданок.

Ця апроксимація є непарною і може бути використана для розрахунку магнітних кіл, як з постійним, так і зі змінним полем. При малих значеннях H розрахункова крива йде зазвичай дещо вище, а при великих - трохи нижче реальної кривої намагнічування.

Коефіцієнти p_1 , p_2 і p_3 можна визначити, обравши три точки на кривій намагнічування. При цьому для визначення коефіцієнта p_2 слід розв'язати рівняння [73, 76]

$$\frac{B_1 H_2 - B_2 H_1}{B_3 H_2 - B_2 H_3} = \frac{H_2 \arctan(p_2 H_1) - H_1 \arctan(p_2 H_2)}{H_2 \arctan(p_2 H_3) - H_3 \arctan(p_2 H_2)},$$

коефіцієнти p_1 і p_3 можна визначити з наступних рівнянь:

$$p_1 = \frac{B_1 H_2 - B_2 H_1}{H_2 \arctan(p_2 H_1) - H_1 \arctan(p_2 H_2)}, \quad p_3 = \frac{B_1 - p_1 \arctan(p_2 H_1)}{H_1}.$$

Експоненціальна апроксимація

Серед апроксимацій експоненціальної групи формул найбільшого поширення набув вираз [3, 24]

$$B = e^{\frac{H}{p_1 + p_2 H}} - 1,$$

$$p_1 = \frac{H_1 H_2 \ln\left(\frac{B_2 + 1}{B_1 + 1}\right)}{(H_2 - H_1) \ln(B_1 + 1) \ln(B_2 + 1)}, \quad p_2 = \frac{H_2 \ln(B_1 + 1) - H_1 \ln(B_2 + 1)}{(H_2 - H_1) \ln(B_1 + 1) \ln(B_2 + 1)},$$

де коефіцієнти p_1 і p_2 визначені за методом обраних точок.

Для мінімізації розбіжностей з експериментальною кривою точки для прив'язки слід вибирати так, щоб одна з них знаходилася в ненасиченийй області, а інша – після перегину, але поблизу неї.

Цю апроксимацію рекомендується застосовувати для розрахунку магнітних кіл з постійним полем.

Логарифмічна апроксимація

Апроксимація основної кривої намагнічування за допомогою логарифмічної функції має вигляд [3]

$$B = p_1 \sqrt{\ln(p_2 H + 1)}. \quad (3.3)$$

У виразі (3.3) для $H = 0$, $B = 0$ під знак логарифма введена 1. Це різко знижує точність опису кривої намагнічування в області слабких полів.

Коефіцієнти p_1 і p_2 для вираження (3.3) визначаються методом обраних точок і мають вигляд

$$p_1 = \frac{B_1}{\sqrt{\ln\left(\frac{H_1 e^{(B_1^2 - B_2^2)}}{H_1 - H_2}\right) + 1}}, \quad p_2 = \frac{e^{(B_1^2 - B_2^2)}}{H_1 - H_2}.$$

Логарифмічну апроксимацію рекомендується застосовувати для розрахунку магнітних кіл з постійним полем.

Апроксимація степеневим поліномом

Непогані результати можна отримати при апроксимації основної кривої намагнічування непарним степеневим поліномом виду [3, 16, 93, 123]

$$H = p_1 B + p_2 B^3 + p_3 B^5 + \dots \quad (3.4)$$

або

$$B = q_1 H + q_2 H^3 + q_3 H^5 + \dots, \quad (3.5)$$

де $p_1, p_2, p_3 \dots, q_1, q_2, q_3 \dots$ – коефіцієнти, які зазвичай визначаються методом обраних точок.

Чим більше членів в правій частині виразу (3.4) або (3.5), тим краще співпадає розрахункова і реальна криві намагнічування.

У багатьох випадках обмежуються тільки двома членами полінома

$$H = p_1 B + p_2 B^3$$

або

$$B = q_1 H + q_2 H^3. \quad (3.6)$$

У цьому випадку розрахункова крива до загину зазвичай йде дещо нижче, а за загином трохи вище за реальну криву намагнічування. При використанні трьох членів степеневого полінома спостерігається зворотна картина – до загину розрахункова крива йде дещо вище, а за загином трохи нижче реальної кривої намагнічування. При цьому допустима точність наближення досягається лише на обмежених ділянках кривої намагнічування.

При використанні двох членів степеневого полінома коефіцієнти для виразу (3.6) мають наступний вигляд

$$q_1 = \frac{B_1 H_2^3 - B_2 H_1^3}{H_1 H_2^3 - H_1^3 H_2}, \quad q_2 = \frac{B_2 H_1 - B_1 H_2}{H_1 H_2^3 - H_1^3 H_2}.$$

Збільшення числа членів степеневого полінома призводить до складнощів у визначенні коефіцієнтів апроксимації. Апроксимація степеневим поліномом є непарною і може бути використана для розрахунку магнітних кіл як з постійним, так і за змінним полем.

Апроксимація гіперболічним синусом

Апроксимація гіперболічним синусом (3.7) основної кривої намагнічування [82] в принципі близька до апроксимації поліномом по степенях, оскільки розкладавши гіперболічний синус в ряд, отримуємо поліном по степенях B . Тому ця апроксимація поводиться подібно до апроксимації поліномом по степенях B .

$$H = p_1 \sinh(p_2 B), \quad (3.7)$$

Коефіцієнти p_1 і p_2 для виразу (3.7), визначені методом обраних точок, мають вигляд

$$p_2 = \frac{\ln(H_2/H_1)}{B_2 - B_1}, \quad p_1 = \frac{H_2}{\sinh(p_2 B_2)}.$$

Апроксимація гіперболічним синусом є непарною і може бути використана для розрахунку магнітних кіл, як з постійним, так і зі змінним полем.

Апроксимація гіперболічним тангенсом

Апроксимація гіперболічним тангенсом може мати вигляд [15, 82]

$$H = p_1 \tanh(p_2 B) \quad (3.8)$$

або

$$B = q_1 \sinh(q_2 H). \quad (3.9)$$

Вона близька до апроксимації поліномом по степенях B (чи H), оскільки розкладши гіперболічний тангенс в ряд, отримуємо поліном по степенях B (чи H). Тому ця апроксимація поводиться подібно до апроксимації поліномом по степенях B (чи H). У [15] відзначається, що гіперболічний тангенс гірше описує криву намагнічування, ніж гіперболічний синус. Оскільки вирази (3.8) і (3.9) є непарними функціями, то вони можуть бути використані для розрахунку магнітних кіл як з постійним, так і зі змінним полем.

Апроксимація методом сплайнів

За наявності значної кількості експериментальних точок і високих вимог до точності апроксимації досить ефективним виявився метод сплайнів [46], що полягає у використанні на вибраних ділянках кривої намагнічування різних апроксимацій. Метод сплайнів дозволяє підібрати апроксимуючі функції таким чином, щоб результатуєща сплайн-функція і її похідні були безперервними в точках стикування. Обмеженням методу сплайнів є громіздкість розрахунку його коефіцієнтів.

Апроксимація за допомогою раціональних функцій

Хорошу узгодженість з експериментом дає апроксимація основної кривої намагнічування за допомогою раціональних функцій [82]

$$M = \frac{p_n H^n + p_{n-1} H^{n-1} + \dots + p_0}{q_n H^n + q_{n-1} H^{n-1} + \dots + q_0},$$

де p_i и q_i – коефіцієнти, $i = 0 \dots n$.

Старший коефіцієнт полінома в чисельнику дробу дорівнює ординаті експериментальної точки на ділянці насичення і визначає асимптотичний характер поведінки функції на цій ділянці. Молодший коефіцієнт дорівнює нулю в силу проходження основної кривої намагнічування через початок координат. Інші коефіцієнти обчислюються за методом обраних точок. Окрім необхідності великої кількості $(2n+1)$ експериментальних точок спостерігається залежність коефіцієнтів дробу від зміни їх кількості або координат (окрім першого коефіцієнта в чисельнику).

Вибір апроксимуючої функції

Основною проблемою при складанні рівнянь елементів розрахункової схеми заміщення є математичне представлення нелінійних елементів. До таких елементів в даному випадку відносяться нелінійні індуктивності магнітопроводів трансформаторів.

У теорії електричних машин застосовують основну (комутаційну) криву намагнічування, що є геометричним місцем вершин гістерезисних циклів, що виходять при циклічному перемагнічуванні [30]. Вона є залежністю потокозчеплення від струму намагнічування обмотки $\psi = f(i)$, залежністю магнітної індукції від напруженості магнітного поля $B = f(H)$ або зворотними до цих функцій і може виражатися як в абсолютних, так і у відносних одиницях.

До функції, що апроксимує характеристику намагнічування, висуваються наступні вимоги:

- 1) функція повинна давати якомога точніше наближення;
- 2) оскільки функція використовується в операціях диференціювання, її похідна також повинна бути якомога точнішим наближенням;
- 3) похідна функції має бути безперервною на досліджуваній області визначення;
- 4) функція не повинна призводити до занадто складних розрахунків;

- 5) функція має бути непарною;
 6) функція не повинна мати точок перегину на обох пів-осях.

У розрахунках часто використовують кусково-лінійну апроксимацію кривої намагнічування. Основним недоліком цього наближення є стрибкоподібна зміна похідної при переході від однієї ділянки до іншої. Крім того, кусково-лінійна апроксимація не гарантує виконання 5 і 6 пунктів вказаних вимог.

Для апроксимації кривих намагнічування магнітопроводів трансформаторів бажано застосовувати аналітичні функції, які не містять складні многочлени. У роботі [119] представлені функції, найчастіше використовуються і мають одну або дві постійні табл. 3.1. Застосування тієї або іншої формули залежить від конкретних умов моделювання процесу намагнічування. Деякі формули досить точно апроксимують криву намагнічування в початковій частині, інші – на її «коліні».

Таблиця 3.1 – Функції апроксимації основної кривої намагнічування, вираженої через потокозчеплення

Номер	Формула	Номер	Формула
1	$\psi = \alpha \sqrt[\beta]{i}$	6	$\psi = \frac{i}{(\alpha + \beta \cdot i)}$
2	$\psi = \alpha \sqrt{i}$	7	$\psi = \alpha(1 - e^i)$
3	$\psi = \alpha \sqrt[3]{i}$	8	$\psi = \alpha \cdot \tanh(\beta \cdot i)$
3*	$\psi = \sqrt[3]{i}$	9	$\psi = \alpha \cdot \arctan(\beta \cdot i)$
4	$\psi = \alpha \sqrt{i} - \beta \cdot i$	10	$\psi = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\beta \cdot i} e^{-t^2} dt$
4*	$\psi = \sqrt{i} - \beta \cdot i$	11	$\psi = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\beta \cdot i} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$
5	$\psi = \alpha \sqrt{i} + \beta \cdot i$	12	$\psi = \frac{1+\alpha}{1+\beta \cdot i} i$
5*	$\psi = \sqrt{i} + \beta \cdot i$	13	$\psi = \alpha \cdot \sinh(\beta \cdot i)$

Як найповніше вимогам до апроксимуючих функцій задовольняє формула арктангенса з двома коефіцієнтами [73]:

$$\psi = \alpha \cdot \arctan(\beta \cdot i). \quad (3.10)$$

Для підвищення точності опису основної кривої намагнічування (ОКН) введемо в (3.10) третій додатковий коефіцієнт лінійного члена:

$$\psi = \alpha \cdot \arctan(\beta \cdot i) + c \cdot i, \quad (3.11)$$

де α, β, c - лінійні коефіцієнти апроксимації.

Представимо вираз (3.11) у формі $B(H)$:

$$B = \alpha \cdot \arctan(\beta \cdot H) + c \cdot H. \quad (3.12)$$

Вираження (3.12) забезпечує досить точне наближення на усіх характерних ділянках кривої намагнічування, а її похідна має відносно простий математичний опис.

Оскільки коефіцієнти апроксимації α, β, c , завжди додатні величини, відмінні від нуля, то в операціях ділення при чисельному інтегруванні систем нелінійних диференційних рівнянь при будь-якому значенні напруженості H похідна не дорівнює нулю, що підвищує обчислювальну стійкість системи.

3.3 Методи визначення коефіцієнтів апроксимації основної кривої намагнічування

Для більш детальної інформації про відхилення і збіг отриманих результатів налаштування нелінійної модельної функції до даних, визначених експериментально, виконана з використанням універсальний метод оптимізації CDOS (Conjugate Direction with Orthogonal Shift) [83], в якому пов'язані напрями з ортогональним зрушеннем (ПНОЗ). Метод має квадратичну збіжність для квадратичних і близьких до них функцій. При чому необов'язково, щоб цільова функція мала похідні або була неперервною. Метод у вигляді нерівностей враховує обмеження, які не обов'язково повинні мати похідні і бути безперервними; не використовує чисельні значення обмежень у вигляді нерівностей; використовує тільки сам факт їх порушення або відсутності порушень.

Крім того, додатково для визначення налаштування нелінійної модельної функції до експериментальних даних використовувалося 10 наступних алгоритмів [4, 83]:

1. Метод найменших квадратів, що є ефективним, але нестійким до великих відхилень у вихідних даних. Коефіцієнти апроксимації при цьому визначаються з умови мінімуму середньоквадратичної похибки:

$$M = \sum_{i=0}^k [B_i - B(H_i)]^2 = \min,$$

де B_i , H_i – експериментальні значення напруженості й індукції на кривій намагнічування; k – граничне число пар значень B_i і H_i ; $B(H_i)$ – значення апроксимуючої формули в i -ої точці.

2. Метод найменших модулів – більш стійкий до великих відхилень в даних, ніж метод найменших квадратів:

$$F(a) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k w_i \cdot |Y_i - f(X_i; a)|,$$

де Y_i , X_i – експериментальні значення індукції і напруженості на кривій намагнічування B_i , H_i відповідно.

3. Метод найменших усічених квадратів. Стійкість цього методу залежить від величини верхнього перцентіля p ($p = 95$ за замовчуванням):

$$F(a) = \text{TrimmedMean}(r, 0, p), r_i = w_i \cdot |Y_i - f(X_i; a)|^2, (i = 1..k),$$

де $\text{TrimmedMean}()$ – усічене середнє.

4. Метод найменших обмежених квадратів. Стійкість цього методу залежить від величини верхнього перцентіля p ($p = 95$ за замовчуванням>):

$$F(a) = \text{WinsorizedMean}(r, 0, p), r_i = w_i \cdot |Y_i - f(X_i; a)|^2, (i = 1..k),$$

де $\text{WinsorizedMean}()$ – обмежене середнє.

5. Метод мінімаксу. Особливість цього методу є чутливість до великих відхилень:

$$F(a) = \max_i \left(w_i \cdot |Y_i - f(X_i; a)| \right), (i = 1..k);$$

6. Медіанний метод найменших квадратів – максимально стійкий до великих відхилень:

$$F(a) = \text{me} \left(w_i \cdot |Y_i - f(X_i; a)|^2 \right), (i = 1..k),$$

де $\text{me}()$ – вибіркова медіана.

7. Квантільний метод найменших квадратів. Його стійкість залежить від величини порядку квантіля p ($p = 0.75$ за замовчуванням):

$$F(a) = q_p \left(w_i \cdot |Y_i - f(X_i; a)|^2 \right), (i = 1..k),$$

де $q_p()$ - вибірковий квантіль порядку p .

8. Метод трьох середніх. Цей метод стійкий до великих відхилень:

$$F(a) = \frac{1}{2} \left(\text{me}(r_i) + \frac{q_{0,25}(r_i) + q_{0,75}(r_i)}{2} \right), r_i = w_i \cdot |Y_i - f(X_i; a)|, (i = 1..k),$$

де $\text{me}()$, $q_p()$ - вибіркові медіана і квантіль порядку p ;

9. Метод найменших функцій від модуля залишкових помилок. Стійкість цього методу залежить від заданої функції $g()$, яка може приймати дві форми: $g = x - > x^3$; $g = x - > \ln(1+x)$:

$$F(a) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k w_i \cdot g(|Y_i - f(X_i; a)|);$$

Також було проведено аналіз методів, вільних від похідних, що мають квадратичну збіжність [131]:

- метод сполучених напрямків Пауелла [123, 129];
- метод головних осей Брента [126];
- квадратичний метод (метод послідовної квадратичної апроксимації) [4, 60].

Для визначення експериментальних значень B_i і H_i синусоїdalного сигналу однієї частоти [28, 58, 59], зібрана вимірювальна установка (рис. 3.2),

завдяки якій отримано сімейство приватних циклів для визначення ОКН (рис. 3.4).

Приведена схема на рис. 3.2 містить наступні складові: модуль АЦП/ЦАП – для вимірювання значень аналогового сигналу з інтегруючого кола (U_Y) та кола струму (U_X). За допомогою оцифрованих напруг U_X , U_Y на ЕОМ відображається петля гістерезису. За допомогою ЦАП та додаткового вузла узгодження можна плавно регулювати напругу з ЛАТРу і отримувати сімейство граничних циклів без впливу переходних процесів у феромагнетику.

Схема на рис. 3.3 зібрана аналогічно рис. 3.2 з деякими відмінностями, що полягають у наявності: ДТв – дросель-трансформатор типу ДТ-0,6-500С, захищає ПЧ-50/25 від впливу постійного струму (Д1, Д2); ЗБ-ДСШ – захисний блок реле ДСШ, що виключає проникнення гармонік, відмінних від 25 Гц, у коло випробувань; ПОБС-2А – колійний трансформатор, призначений для живлення кола постійного струму, первинні обмотки трансформатору з'єднані паралельно, вторинні – послідовно, обмотки увімкнені зустрічно для виключення проникнення сигналу 25 Гц до мережі; Д1, Д2, С1 – однополярна схема випрямлення з середньою точкою.

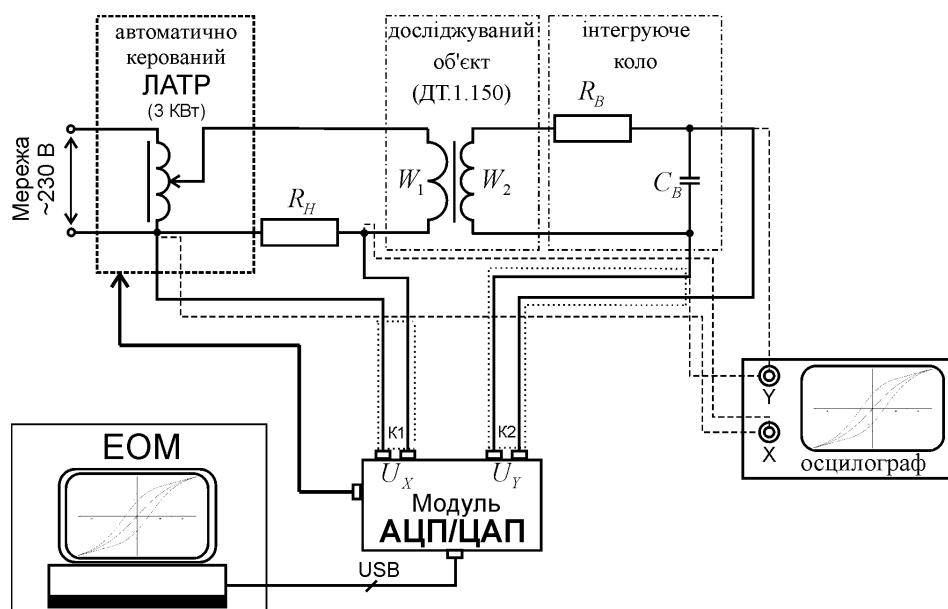


Рисунок 3.2 – Схема вимірювальної установки синусоїdalного сигналу однієї частоти

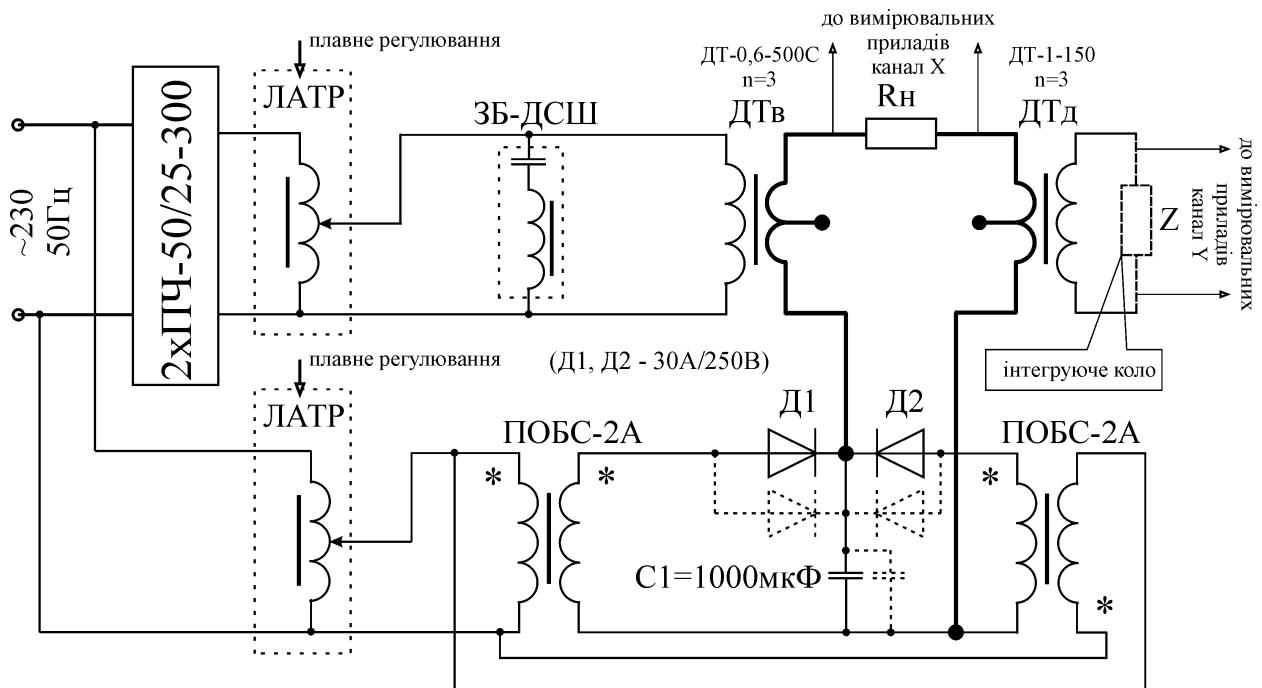


Рисунок 3.3 – Схема включення ДТ-1-150 для дослідження впливу підмагнічування постійним струмом

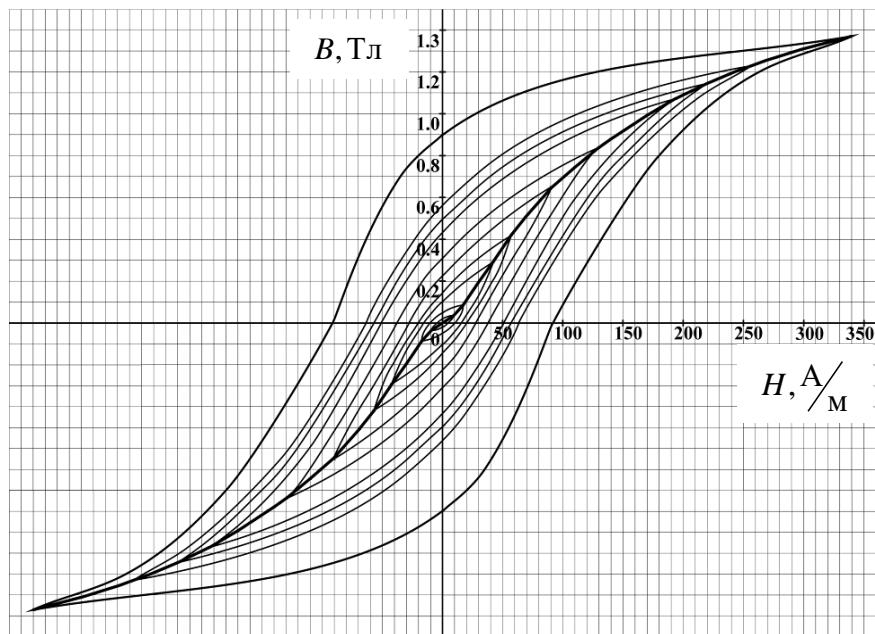


Рисунок 3.4 – Експериментально отримані сімейства приватних циклів для визначення основної кривої намагнічування

Параметри ДТ-1-150 зі сталю Е310 [30, 113, 114]: число витків первинної обмотки $W_1 = 16$; – вторинної обмотки $W_2 = 48$; середня лінія осердя $l_{cp} = 0,58$ м; площа осердя $S = 24,2 \cdot 10^{-4}$ м².

Напруга U_X на першому каналі АЦП (К1), знята з опору R_H , через пристрій сполучення (дільник напруги), еквівалентна напруженості магнітного поля H .

Нехай струм I_h протікає через R_H , створюючи тим самим падіння напруги U_h , тоді по закону Ома $I_h = \frac{U_h}{R_H}$.

Як відомо $H = \frac{I \cdot W}{l_{cp}}$, де I – струм, що протікає в катушці з числом витків W . Для нашого випадку:

$$H = \frac{I_h \cdot W_1}{l_{cp}} = \frac{W_1}{R_H \cdot l_{cp}} \cdot U_X. \quad (3.13)$$

Напруга U_Y на другому каналі АЦП (К2), знята з ємності C_B інтегруючого кола еквівалентна індукції B :

$$B = \frac{U_Y \cdot R_B \cdot C_B}{W_2 \cdot S}. \quad (3.14)$$

Для врахування підмагнічування осердя ДТ розроблена схема рис. 3.3. За допомогою схеми отримано сімейство приватних циклів при підмагнічуванні постійним струмом рис. 3.5.

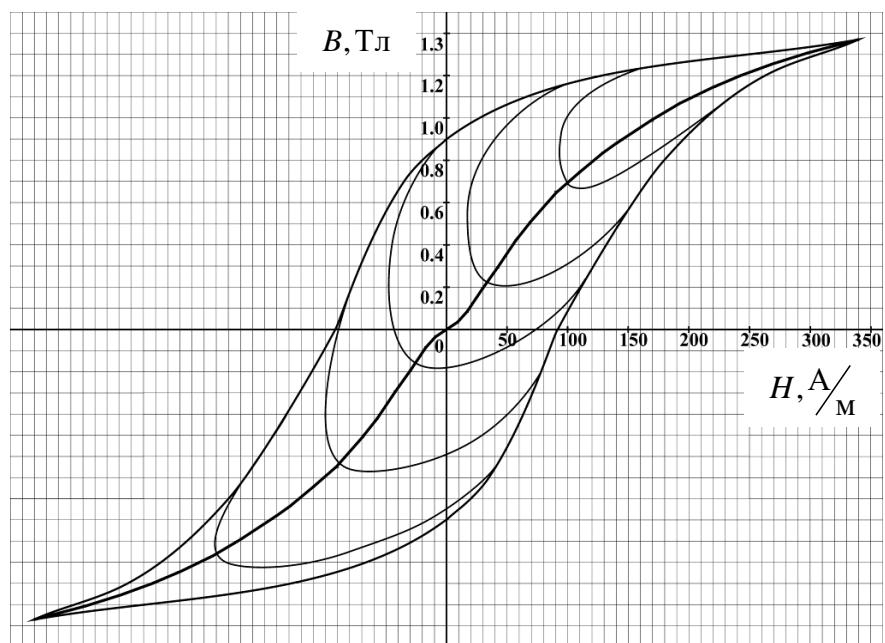


Рисунок 3.5 – Експериментально отримані сімейства приватних циклів при підмагнічуванні постійним струмом

В ході вимірювань і перетворень по (3.13) і (3.14) отримані масиви даних (точок), що представлені графічно на рис. 3.6 точками, які визначають максимуми приватних циклів кривої намагнічування. Додатково побудована кусочно-лінійна апроксимація.

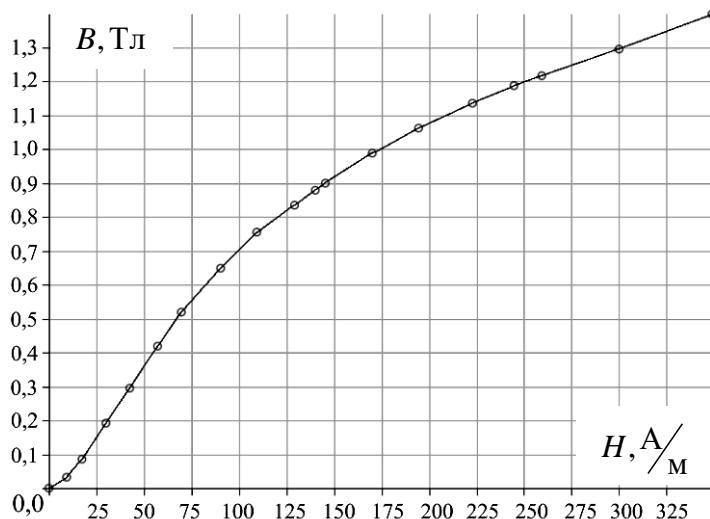


Рисунок 3.6 – Графічне представлення масиву даних B і H

Було складено програму в середовище Maple та VisualStudio з використанням наведених вище методиками опису основної кривої намагнічування і визначення коефіцієнтів апроксимації. Було отримано раціональну функцію опису основної кривої намагнічування $B = \alpha \cdot \arctan(\beta \cdot H) + c \cdot H$ (3.12) і побудовано сімейство кривих, представлених на рис. 3.7.

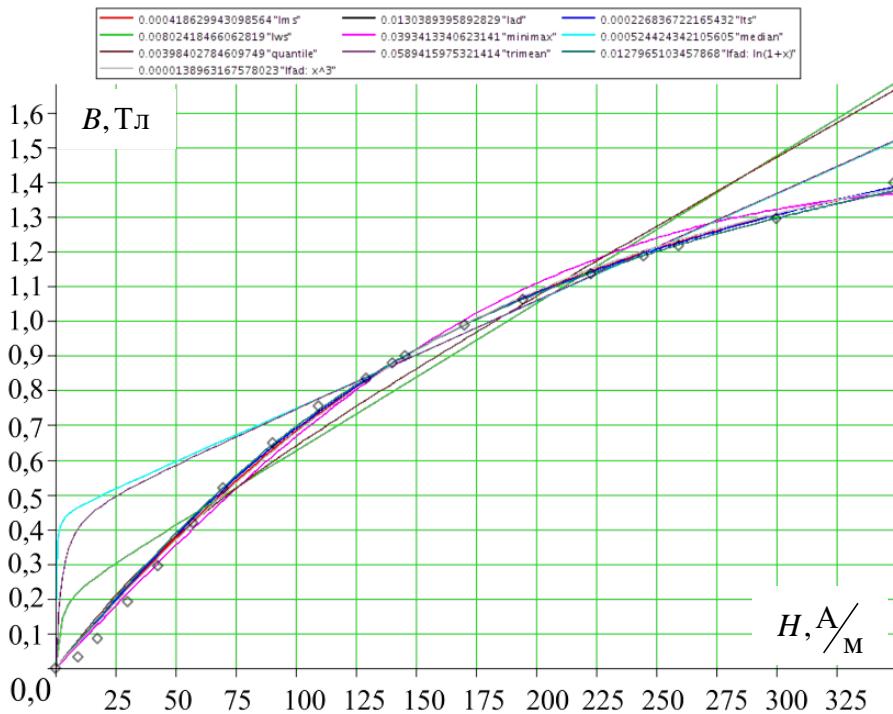


Рисунок 3.7 – Сімейство основних кривих намагнічування для ДТ-1-150

Як видно різні алгоритми рішення надають різні значення точності (рис. 3.7). Для оцінки точності визначення коефіцієнтів апроксимації використовувався метод найменших медіан.

З сімейства кривих (рис. 3.7) виявлена крива, що найбільш раціонально описує отримані експериментальні дані рис. 3.8, розрахована з використанням методу найменших функцій від модуля залишкових помилок з заданою функцією стійкості методу $g = x - \rightarrow x^3$. Тоді лінійні коефіцієнти апроксимації раціональної функції $B(H(t)) = \alpha \cdot \arctan(\beta \cdot H(t)) + c \cdot H(t)$ приймають значення $\alpha \approx 1.111418$, $\beta \approx 0.0066$, $c \approx 0.000295$. Вираз (3.12) для максимального значення напруженості магнітного поля $H(t)$ набуде наступного вигляду:

$$B(H(t)) = 1.111418 \cdot \arctan(0.0066 \cdot H(t)) + 0.000295 \cdot H(t) \quad (3.15)$$

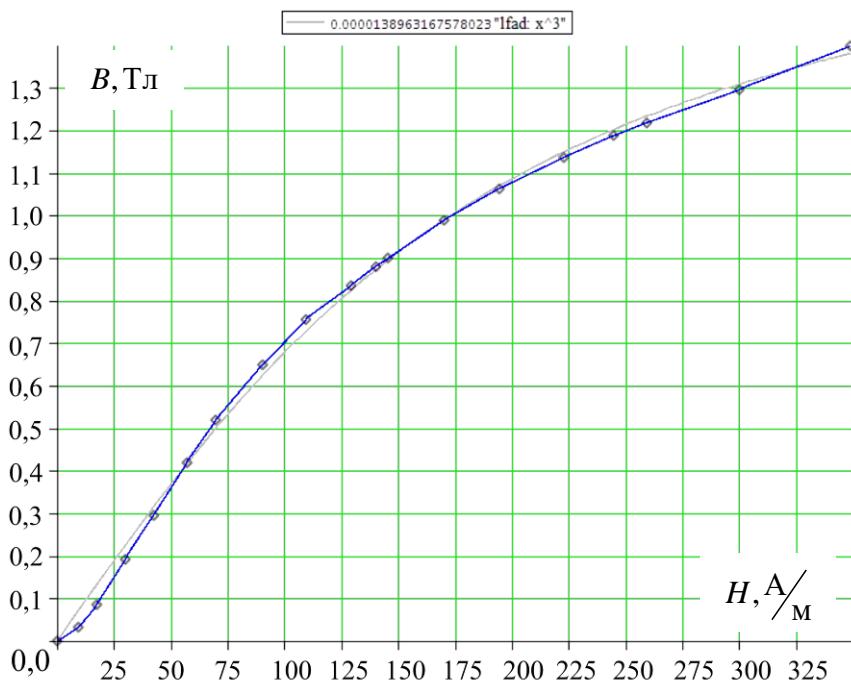


Рисунок 3.8 – Основна крива намагнічування (3.15), розрахована методом найменших функцій від модуля залишкових помилок

Для проведення подальших досліджень цілком достатньо отриманої функції $B(H(t))$, але, поряд з цим, є нелінійні магнітні параметри, які впливають на характеристику об'єкта з феромагнітним осердям, а саме – втрати в магнітопроводі і міді, які, як відомо, в повній мірі описуються площею граничної петлі гістерезису.

3.4 Моделювання петлі магнітного гістерезису

Задачу було сформульовано наступним чином: магнітопровід з феромагнітного матеріалу піддають зовнішньому намагнічуочому впливу. За характером впливу необхідно визначити реакцію феромагнетика і його основні інтегральні характеристики. Інакше кажучи, треба підібрати аналітичні вирази для опису кривих намагнічування і, в кінцевому результаті, розрахувати магнітні характеристики, що визначають зв'язок індуктивності B і напруженості поля H при довільному законі зміни зовнішнього впливу, а також оцінити реакцію феромагнетика на це збурення при різних режимах його роботи.

У технічній літературі магнітні поля, перемагнічуєчи магнітопровід різної структури, підрозділяють на паралельні і неколінеарні [15, 16, 111, 119], причому в останньому випадку в будь-якій точці поля складові індукції утворюють геометричну суму векторів.

При фізичному підході до опису петель гістерезису розглядаються закони перемагнічування феромагнетика і отримуються рівняння, що дозволяють розраховувати режими перемагнічування [16, 36, 55, 76, 104, 107]. При математичному підході намагаються отримати аналітичні вирази, які описують гістерезисний характер процесу перемагнічування. На жаль, математична модель для систем, яким властивий нелінійний гістерезис, також повинна бути нелінійною [16, 24, 99, 107].

Існує велика кількість робіт, присвячених пошуку математичних виразів, що найближче описують процес перемагнічування по петлях гістерезису [3, 24, 41, 46]. Причому деякі моделі враховують зміни не тільки величин і, але і їх похідних [76, 99].

Апроксимація петлі магнітного гістерезису моделлю Релея

В області слабких магнітних полів ($H \ll H_{CS}$) для опису петлі магнітного гістерезису часто використовується формула, запропонована Релеєм [15]:

$$M = (x_H + b_R H_m) \pm \frac{b_R}{2} (H^2 - H_m^2), \quad (3.16)$$

де H_m – максимальне значення поля, що намагнічує H , «+» – висхідна гілка петлі, а «-» – спадна.

Слід зазначити, що розрахунок (3.16) збігається з реальною петлею магнітного гістерезису лише в крайніх точках.

Верхню половину спадної гілки граничної петлі ($H \geq -H_{CS}$) можна отримати введенням в (3.16) відповідних постійних [15]

$$M = \frac{M_r M_s (H + H_{CS})}{M_s H_{CS} + M_r H}, \quad (3.17)$$

де M_r – залишкова намагніченість.

Для опису верхньої половини висхідної гілки граничної петлі магнітного гістерезису ($H \geq H_{CS}$) у виразі (3.17) слід перенести початок координат по осі

$$\text{абсцис направо на відрізок } 2H_{CS}. \text{ Тоді } M = \frac{M_r M_s (H - H_{CS})}{H_{CS} (M_s - 2M_r) + M_r H}.$$

У [15] розглянуто ряд виразів, що описують петлю магнітного гістерезису за допомогою тригонометричних функцій, гармонійного ряду фігур Ліссажу, еліпса (метод Аркадьєва), закону Гука, S-подібної кривої (метод Акулова), за допомогою рядів, з використанням полярних координат та інші, однак вони не знайшли широкого практичного застосування.

Цікавим є підхід до побудови моделі гістерезисного циклу на основі узагальнених правил Маделунга [41], який дозволяє відтворити криві повернення. Його недоліком є необхідність використання певних відрізків експериментальних кривих намагнічування для побудови замкнутих циклів і передбачення траекторії перемагнічування.

У [47] показано, що для тонкої електротехнічної сталі після визначення модифікованих коефіцієнтів перетворення Кондорського можна лише по одній ОКН обчислити всі основні гістерезисні характеристики матеріалу.

Апроксимації на основі функції арктангенсу

Найбільшого поширення для опису петель магнітного гістерезису отримали аналітичні вирази з використанням функцій арктангенсу [2, 39, 79].

Даний спосіб опису базується на введенні так званого гістерезисного поля [15]. У найбільш узагальненій формі [99] ця апроксимація має вигляд:

$$M(H) = p_1 \arctan(p_2 [H + H_G(M, H)]) + M_K(M, H), \quad (3.18)$$

де $H_G(M, H)$ – гістерезисне поле, яке в загальному випадку може бути функцією миттєвих значень напруженості магнітного поля H або намагніченості матеріалу M і напрями їх зміни; $M_K(M, H)$ – коригувальна функція поля або намагніченості, необхідна для компенсації фізично

неприйнятних особливостей намагніченості M як функції перемагнічуючого поля H , зумовлених першим додатком у правій частині виразу (3.18). Параметри апроксимації визначають методом обраних точок.

Залежно від обраних точок прив'язки до експериментальних даних з (3.10) виходять всі відомі апроксимації з використанням функції арктангенсу для опису основної кривої намагнічування і петель магнітного гістерезису [15, 39, 79, 80, 99]. Області застосування цих апроксимацій і завдання які можуть бути вирішенні ними, є різними внаслідок особливостей їх побудови. Розглянемо можливості найбільш поширеніх з них.

Апроксимація Зацепіна

Прийнявши у (3.18) $M_K = 0$ і врахувавши, що при $H \rightarrow +\infty M = M_s$, при $H = 0 M = \pm M_{rs}$, а при $H = -H_C$ для спадної і при $H = +H_C$ для висхідної гілок петлі магнітного гістерезису $M = 0$, отримуємо наступну систему рівнянь для визначення p_1 , p_2 і H_Γ :

$$\begin{cases} M_s = p_1 \frac{\pi}{2} \\ \pm M_{rs} = p_1 \arctan(p_2 H_\Gamma) \\ 0 = p_1 \arctan(p_2 [\mp H_{CS} + H_\Gamma]) \end{cases}, \quad (3.19)$$

де знак «-» відноситься до спадної, а знак «+» – до висхідної гілкам петлі магнітного гістерезису.

З (3.19) слідує, що

$$p_1 = \frac{2}{\pi} M_s; H_\Gamma = \pm H_{CS}; p_2 = \frac{1}{H_{CS}} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{M_{rs}}{M_s}\right), \quad (3.20)$$

де знак «+», який визначається напрямом перемагнічуючого поля, відноситься до спадної, а «-» – до висхідної гілки петлі магнітного гістерезису.

З урахуванням (3.20) вираз (3.18) набуде вигляду [39]:

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \arctan\left[\frac{H \pm H_{CS}}{H_{CS}} \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{M_{rs}}{M_s}\right)\right], \quad (3.21)$$

де знак «+» відповідає спадній, а знак «-» – висхідній гілкам граничної петлі магнітного гістерезису.

Формула (3.21) є однією з найбільш простих і компактних серед апроксимацій з використанням функції арктангенсу, вона знайшла широке застосування в роботах, що пов'язані з методом вищих гармонік [22].

Одним з недоліків апроксимації (3.21) є те, що вона може бути застосована тільки для опису граничної петлі магнітного гістерезису [99]. Щоб використовувати вираз (3.21) для опису приватного гістерезисного циклу, необхідно замінити величини намагніченості насиження M_s , залишкової намагніченості M_{rs} і коерцитивної сили H_{CS} за граничним циклом на відповідні величини при амплітуді перемагнічуючого поля H_m (M_m , M_r і H_C). Тоді

$$M = \frac{2}{\pi} M_m \arctan \left[\frac{H \pm H_C}{H_C} \tan \left(\frac{\pi}{2} \frac{M_r}{M_m} \right) \right]. \quad (3.22)$$

Однак при описі приватного гістерезисного циклу виразом (3.22) петля магнітного гістерезису виявляється незамкненою внаслідок стрибкоподібного зміни гістерезисного поля H_Γ від $-H_C$ до $+H_C$ при переході від висхідної гілки петлі до спадної і від $+H_C$ до $-H_C$ при переході від спадної гілки до висхідної.

Крім того, намагніченість M по приватній петлі магнітного гістерезису не може дорівнювати її максимальному значенню M_m при $H = H_m$ з огляду на те, що функція арктангенсу приймає значення тільки $\pm\pi/2$ при $H \pm \infty$.

Апроксимація Пономарьова

Для усунення вищезазначених недоліків апроксимації (3.21) Ю. Ф. Пономарьовим було запропоновано [99] вибрati M_K рівною

$$M_K = \mp \frac{p_1}{2} \left[\arctan(p_2(H_m + H_{CS})) - \arctan(p_2(H_m - H_{CS})) \right]. \quad (3.23)$$

Гістерезисне поле обрано таке ж, як і в попередній апроксимації, $H_\Gamma = \pm H_{CS}$, де верхні знаки відносяться до спадної, а нижні – до висхідної гілки петлі магнітного гістерезису.

Вибір M_K відповідно до (3.23) забезпечує замикання гілок петлі магнітного гістерезису. Параметр p_1 визначено за умови збігу намагніченості насиження M_s по граничної петлі магнітного гістерезису з її дійсним значенням. Тоді з (3.18) з урахуванням того, що $M_K \rightarrow 0$ при $H_m \rightarrow +\infty$ слідує наступне:

$$p_1 = \frac{2}{\pi} M_s. \quad (3.24)$$

Параметр p_2 обрано з умови збігу максимальної диференціальної магнітної сприйнятливості x_{dm}^{II} за граничною петлею з її дійсним значенням. Так як M_K не залежить від поточного значення H , то диференціальна магнітна сприйнятливість x_d^{II} має вигляд

$$x_d^{\text{II}} = \frac{dM}{dH} = p_1 \frac{p_2}{1 + p_2^2 (H \pm H_{CS})^2}. \quad (3.25)$$

Умовою максимуму x_d^{II} є вираз

$$\frac{d^2M}{dH^2} = \frac{-2p_1p_2^3(H \pm H_{CS})}{\left[1 + p_2^2(H \pm H_{CS})^2\right]^2} = 0. \quad (3.26)$$

З (3.26) отримуємо, що $x_d^{\text{II}} = x_{dm}^{\text{II}}$ при $H = H_{CS}$. Тоді

$$x_{dm}^{\text{II}} = p_1 p_2. \quad (3.27)$$

З (3.27) з урахуванням (3.24) $p_2 = \frac{\pi}{2} \frac{x_{dm}^{\text{II}}}{M_s}$.

Для зручності розрахунків в [99] введена величина

$$H_s = \frac{M_s}{x_{dm}^{\text{II}}}, \quad (3.28)$$

яка має розмірність напруженості магнітного поля.

В результаті апроксимація, запропонована Ю. Ф. Пономарьовим, має вигляд

$$M = \frac{M_s}{\pi} \left\{ \begin{aligned} & 2 \cdot \arctan \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{H \pm H_{CS}}{H_C} \right) \right) \mp \\ & \mp \left[\arctan \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{H_m + H_{CS}}{H_C} \right) \right) - \arctan \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{H_m - H_{CS}}{H_C} \right) \right) \right] \end{aligned} \right\}, \quad (3.29)$$

де верхні знаки відносяться до спадної, а нижні – до висхідної гілки петлі магнітного гістерезису.

Для ілюстрації фізичного значення величини H_s було введено поняття еквівалентної кусочно-лінійної апроксимації граничної петлі магнітного гістерезису, що складається з чотирьох відрізків і має ті ж значення x_{dm}^{II} , H_{CS} і M_s , що і реальна петля граничного циклу. Тоді величина $2H_s$ визначає область магнітного поля, на якій відбувається зміна намагніченості від $-M_s$ до $+M_s$ і навпаки по еквівалентній кусочно-лінійної апроксимації.

Прийнявши $H_m \rightarrow +\infty$ з (3.29) отримується вираз для граничної петлі магнітного гістерезису:

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \arctan \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{H \pm H_{CS}}{H_s} \right) \right], \quad (3.30)$$

а з урахуванням (3.28)

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \arctan \left[\frac{\pi}{2} \cdot x_{dm}^{II} \left(\frac{H \pm H_{CS}}{M_s} \right) \right]. \quad (3.31)$$

За формулою виразу (3.30) збігається з виразом (3.21), якщо в останній ввести позначення

$$H'_s = \frac{\pi H_{CS}}{2 \tan \left(\frac{\pi}{2} \frac{M_{rs}}{M_s} \right)}, \quad (3.32)$$

яке має, як і в (3.28), розмірність напруженості магнітного поля.

Формула Акулова-Лучевського

Н. С. Акулов і Б. А. Лучевський, застосувавши при статистичному обліку розподілу коерцитивної сили і внутрішніх магнітних полів різних кристалітів або груп доменів, функцію розподілу типу Коші [2] (за аналогією з роботою [78] для сегнетоелектриків), отримали наступний аналітичний вираз для петлі магнітного гістерезису:

$$M = x_r H \pm \frac{M_{sm}(H_m)}{\pi} \left[\begin{aligned} & 2 \cdot \arctan \left(\frac{H \pm H_{CS}}{q_0} \right) - \\ & - \left(\arctan \left(\frac{H_m + H_{CS}}{q_0} \right) + \arctan \left(\frac{H_{CS} - H_m}{q_0} \right) \right) \end{aligned} \right], \quad (3.33)$$

де зворотна сприйнятливість x_r і величини M_{sm} , q_0 визначаються експериментально, верхні знаки відносяться до спадної, а нижні – до висхідної гілок петлі.

При цьому авторами [2] пропонується апроксимувати наступним чином

$$x_r = x_H \text{ (для } H \leq H_{CS}) \text{ та } x_r = x_H e^{-\frac{H-H_{CS}}{H_{cs}}} \text{ (для } H > H_{CS}), \quad (3.34)$$

де x_H – початкова сприйнятливість, яка визначається як тангенс кута нахилу дотичної до основної кривої намагнічування в точці $H = 0$.

Величина M_{sm} визначається за виразом

$$M_{sm}(H_m) = \frac{2M_s}{\pi} \arctan \left(\frac{H_m}{p_0} \right), \quad (3.35)$$

де коефіцієнт p_0 визначається з (3.33) і (3.34) для петлі гістерезису будь-якого приватного циклу

$$p_0 = \frac{H_{me}}{\tan \left[\frac{\pi^2}{2} \frac{M_{re}}{M_s} \left(\begin{aligned} & 2 \cdot \arctan \left(\frac{H_{CS}}{q_0} \right) - \\ & - \arctan \left(\frac{H_{CS} + H_{me}}{q_0} \right) - \arctan \left(\frac{H_{CS} - H_{me}}{q_0} \right) \end{aligned} \right)^{-1} \right]}. \quad (3.36)$$

Величини H_{me} і M_{re} являють собою відповідно граничне поле і залишкову намагніченість будь-якого приватного циклу.

Вираз $p_0 = H_{CS} \sqrt{\frac{x_d^0 - x_{rm}}{x_d^m - x_d^0}}$ спрощено, де x_d^0 і x_d^m – диференціальна магнітна сприйнятливість по петлі гістерезису при $H = 0$ і $H = -H_{CS}$ відповідно, x_{rm} – зворотна магнітна сприйнятливість по основній кривої намагнічування при $H = H_m$.

З (3.33) при $H_m \rightarrow +\infty$ $M_{sm} \rightarrow M_s$ отримано вираз для граничної петлі магнітного гістерезису

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \arctan \left(\frac{H_{CS} \pm H}{p_0} \right), \quad (3.37)$$

де верхні знаки відносяться до спадної, а нижні – до висхідної гілок петлі.

Аналіз виразу (3.33) показує, що його можна отримати з (3.18), якщо прийняти коригувальну функцію:

$$M_K = x_r H \pm \frac{M_{sm}}{\pi} \cdot \left\{ 2 \cdot \left(1 - \frac{M_s}{M_{sm}} \right) \cdot \arctan \left(\frac{H_{CS} \pm H}{q_0} \right) - \left(\arctan \left(\frac{H_{CS} + H_m}{q_0} \right) + \arctan \left(\frac{H_{CS} - H_m}{q_0} \right) \right) \right\}. \quad (3.38)$$

Перевагою виразу (3.33) є те, що його отримано теоретично і він значною мірою відображає процеси перемагнічування феромагнітних матеріалів. Основний його недолік полягає у використанні нестандартних магнітних параметрів, таких як залишкова намагніченість M_{re} по приватному циклу при $H = H_{me}$, зворотна магнітна сприйнятливість x_{rm} і диференціальні магнітні сприйнятливості x_d^0 і x_d^m по основній кривій намагнічування. Тому вираз (3.33) не знайшов широкого застосування при вирішенні практичних задач.

Апроксимація Мельгуя

У роботах М. А. Мельгуя [79], за аналогією з описом гістерезисних процесів для сегнетоелектриків запропоновано апроксимацію, подібною (3.33). Основна відмінність цієї апроксимації полягає в тому, що коригувальну функція для неї має наступний вигляд:

$$M_K = \frac{x_H H_{CS}^2 H}{H^2 + H_{CS}^2} \pm \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{CS}} \times \left\{ \begin{array}{l} \left[2 \cdot \arctan \left[\frac{H_{CS} \pm H}{H_{CS}} \cdot \tan \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \left[1 - \frac{H_m^2 + k_0 H_{CS}^2}{H_m^2} \right] \right] - \\ - \arctan \left[\frac{H_{CS} + H_m}{H_{CS}} \cdot \tan \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right) \right] + \\ + \arctan \left[\frac{H_{CS} - H_m}{H_{CS}} \cdot \tan \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right) \right] \end{array} \right\}, \quad (3.39)$$

де k_0 – коефіцієнт, який визначається за умови якщо $H = H_m = H_{CS}$ і намагніченість по ОКН дорівнює експериментально виміряній величині M_c , верхні знаки відносяться до спадної, а нижні – до висхідної гілок петлі.

Коефіцієнти p_1 і p_2 , і гістерезисне поле H_Γ в цій апроксимації вводяться з урахуванням того, що при $H_m \rightarrow +\infty$ $M_K = 0$.

Так при $H = \pm H_{CS}$ і $H_m \rightarrow 0$ $M_K = 0$ і $M = 0$. Тоді за аналогією з (3.20) $H_\Gamma = \pm H_{CS}$, де знак «+» – для спадної, а «-» – для висхідної гілок петлі.

При $H = H_m \rightarrow +\infty$ $M_K = 0$ і $M = M_s$. Тоді для p_1 маємо вираз, аналогічне (3.20). При $H = 0$ і $H_m \rightarrow +\infty$ $M_K = 0$ і $M = M_{rs}$, тоді

$$M_{rs} = \frac{2M_s}{\pi} \arctan(p_2 H_{CS}). \quad (3.40)$$

Звідки

$$p_2 = \frac{\tan \left(\frac{\pi M_{rs}}{2 M_s} \right)}{H_{CS}}. \quad (3.41)$$

Замість (3.41) для зручності використовується величина, що має розмірність напруженості магнітного поля і подібна за формою виразу (3.32) для апроксимації Ю. Ф. Пономарьова.

$$H_0 = \frac{H_{CS}}{\tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{M_{rs}}{M_s}\right)}. \quad (3.42)$$

Величини H_s , H'_s і H_0 мають значення одного порядку з коерцитивною силою граничної петлі магнітного гістерезису.

Таким чином, з (3.18) з урахуванням (3.39), (3.41), (3.42) і знаків перемагнічуочого поля випливає апроксимація М. А. Мельгуга

$$M_K = \frac{x_H H_{CS}^2 H}{H^2 + H_{CS}^2} \pm \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{CS}} \cdot \begin{cases} 2 \cdot \arctan\left[\frac{H_{CS} \pm H}{H_0}\right] - \\ - \left(\arctan\left[\frac{H_{CS} + H_m}{H_0}\right] + \right. \\ \left. + \arctan\left[\frac{H_{CS} - H_m}{H_0}\right] \right) \end{cases}, \quad (3.43)$$

де верхні знаки відносяться до спадної, а нижні - до висхідної гілок петлі, а k_0 визначається з умови, що при $H = H_m = H_{CS}$ $M = M_c$

$$k_0 = \frac{M_s}{\pi} \frac{\arctan\left(2 \frac{H_{CS}}{H_0}\right)}{M_c - x_H \frac{H_{CS}}{2}} - 1. \quad (3.44)$$

Порівняння цієї апроксимації з експериментальними даними, проведене у [80], показало її придатність для вирішення ряду задач неруйнівного контролю.

При $H_m \rightarrow +\infty$

$$M = \frac{2}{\pi} M_s \arctan\left(\frac{H_{CS} \pm H}{H_0}\right) = \frac{2}{\pi} M_s \arctan\left[\frac{H_{CS} \pm H}{H_{CS}} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{M_{rs}}{M_s}\right)\right], \quad (3.45)$$

що з урахуванням прийнятих позначень збігається з (3.21), (3.30) і (3.37).

Більша кількість точок прив'язки з експериментальними даними (четири замість трьох) в порівнянні з апроксимацією Пономарєва передбачає більш точний опис гістерезисних явищ, більш просте визначення входить до виразу

(3.43) і у порівнянні з формулою Акулова-Лучевського робить апроксимацію Мельгужа зручнішого для практичного використання.

Аналіз математичних моделей петель магнітного гістерезису на основі функції арктангенсу

Вирази (3.21), (3.29), (3.33) і (3.43) використовують різні параметри для опису петель магнітного гістерезису, чим суттєво відрізняються між собою.

При $H_m \rightarrow +\infty$ петля магнітного гістерезису є граничною. Оскільки до (3.21) величина H_m не входить, то її вигляд при $H_m \rightarrow +\infty$ не змінюється. При переході до граничної петлі цей же вигляд приймають і інші апроксимації (3.30), (3.37), (3.45), хоча вони і відрізняються параметрами використовують, які з огляду на те, що до (3.21) і (3.45) входять одні й ті ж параметри, ці апроксимації для граничної петлі гістерезису тотожно рівні.

Оскільки вирази (3.21) і (3.45) для граничної петлі магнітного гістерезису збігаються, то порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними проведемо тільки для моделей (3.30) і (3.45). Це порівняння показує, що в ряді випадків розрахунок граничної петлі магнітного гістерезису по (3.30) підтверджується з точністю в декілька відсотків. Однак в інших випадках похибка розрахунку перевищує 20%. Відзначимо також, що розрахунок граничної петлі гістерезису по (3.30) завжди призводить до завищених значень залишкової намагніченості M_{rs} . Дану обставину слід враховувати при практичному застосуванні виразу (3.30).

У задачах, де визначальним параметром є диференціальна магнітна проникність, використання виразів (3.30) і (3.45) необхідно додатково обґрунтувати. У неруйнівному контролі такі задачі виникають при аналізі вищих гармонійних складових сигналу. Для них можна рекомендувати вираз (3.45), так як він спочатку розроблявся для вирішення подібних задач.

У той же час на всьому інтервалі зміни намагніченості за граничною петлею магнітного гістерезису для її опису краще підходять вирази (3.21) і (3.45), які використовують основні магнітні параметри граничної петлі і тому за

величиною намагніченості краще узгоджені з експериментом. Необхідно також відзначити, що для всіх чотирьох моделей максимум диференціальної сприйнятливості за граничною петлею гістерезису знаходиться в полі, рівному коерцитивної сили.

Для полів в області коерцитивної сили матеріалу найбільш точно петля магнітного гістерезису описується виразом (3.30), оскільки саме в цій області знаходяться два параметра, які використовуються цією моделлю. За межами цієї області полів розрахунок по (3.30) може призводити як до завищених, так і до занижених результатів.

Загальним обмеженням для виразів (3.21), (3.30), (3.45) є недостатньо точний опис гілок петлі магнітного гістерезису при підході до насищення. Уже при полях порядку декількох коерцитивних сил ці моделі дають результати, що істотно відрізняються від експериментальних незалежно від магнітних характеристик матеріалу. Максимум похиби доводиться зазвичай на інтервал полів, менших коерцитивної сили і більших трьох коерцитивних сил.

Наведені математичні моделі на основі арктангенса в цілому задовільно описують процес намагнічування і перемагнічування феромагнетику. Однак при вирішенні конкретних задач для матеріалів з різними магнітними властивостями вибір тієї чи іншої моделі істотно неоднозначний. В першу чергу ці моделі не відповідають закону Релея. Значні відхилення від експериментальних даних спостерігаються також при полях від однієї до кількох коерцитивних сил і при наближенні феромагнетику до магнітного насищення. Тому достатньо актуальним залишається завдання вдосконалення математичних моделей на основі функції арктангенсу для їх застосуванні у вирішенні більш широкого класу задач з використанням більшої кількості матеріалів у всьому діапазоні можливих змін величин намагнічуочого поля.

Модель Джилса-Атертона

Існують готові моделі процесів перемагнічування в феромагнітних осердя в системах автоматичного проектування (САПР), наприклад, в LabVIEW.

Недоліком є те, що такі моделі важко пристосовуються до вирішення певних задач, оскільки не в повній мірі інтерпретують процес, що відбувається в досліджуваному об'єкті.

Для опису експериментальних магнітних характеристик осердь дросель-трансформаторів було перевірено два різновиди класичної моделі Джилса-Атертона: перша буде заснована на використанням безгістерезисної кривої намагнічування $M_A(H)$, побудованої на основі гіперболічного котангенса:

$$M_A(H) = M_S \left[\operatorname{cth} \left(\frac{H_E}{A} \right) - \frac{A}{H_E} \right], \quad H_E = H + ALPHA \cdot M_A,$$

і друга, більш складна, оскільки на кожному кроці інтегрування диференціального рівняння перемагнічування доводиться вирішувати нелінійне рівняння алгебри з першої моделі

$$\frac{d}{dH}[M(H)] = \frac{M_A(H) - M(H)}{K \cdot (1+C)} \cdot \delta + \frac{C}{1+C} \cdot \frac{d}{dH}[M_A(H)],$$

де M_S – намагніченість насичення, А/м; H – напруженість магнітного поля в осерді, А/м; A – параметр форми безгістерезисної кривої намагнічування; H_E – ефективна напруженість магнітного поля, А/м; $ALPHA$ – параметр ефективності поля, K – постійна незворотної деформації доменних кордонів, C – постійна пружної деформації доменних кордонів, δ – знак зміни напруженості магнітного поля H .

САПР засновані на моделі Джилса-Атертона [76, 118], використовують деякі відмінності в рівняннях, і мають спільні недоліки:

- необхідність додаткового розрахунку параметрів моделі згідно експериментальних даних;
- при підборі параметрів для точного моделюванняграничних петель похибка при описі приватних петель може становити десятки відсотків, при цьому не враховуються залежності форми петель від температури, частоти або швидкості перемагнічування.

3.5 Математична модель перемагнічування феромагнетику в паралельному магнітному полі

Розглянемо нелінійну котушку індуктивності, підключену до джерела напруги, що змінюється за довільним періодичним законом. Нехай індукція магнітного поля має вигляд:

$$b = b_0 + \sum_{k=1}^m b_{ks} \sin k\omega t + \sum_{k=1}^m b_{kc} \cos k\omega t. \quad (3.46)$$

Похідна індукції (3.46):

$$\frac{db}{dt} = \sum_{k=1}^m \omega k \cdot b_{ks} \cos k\omega t - \sum_{k=1}^m \omega k \cdot b_{kc} \sin k\omega t. \quad (3.47)$$

В цьому випадку феромагнітне осердя перемагнічується по динамічній петлі гістерезису, яка має складну форму.

Напруженість поля h при розкладанні в ряд Фур'є має вигляд:

$$h = h_0 + \sum_{k=1}^N h_{ks} \sin k\omega t + \sum_{k=1}^N h_{kc} \cos k\omega t. \quad (3.48)$$

Представимо (3.48) в такому вигляді:

$$h = h_0 + \sum_{n=1}^N h_{ns} \sin n\omega t + \sum_{n=1}^N h_{nc} \cos n\omega t + \sum_{\ell=1}^N h_{\ell s} \sin \ell\omega t + \sum_{\ell=1}^N h_{\ell c} \cos \ell\omega t, \quad (3.49)$$

де $n = 1, 2, \dots, N$; $\ell = 1, 2, \dots, N$.

Видно, що рівності (3.48) і (3.49) мають місце, якщо

$$\begin{aligned} h_{ns} + h_{\ell s} &= h_{ks}, \\ h_{nc} + h_{\ell c} &= h_{kc}. \end{aligned}$$

З порівнянь (3.46), (3.47) з рівнянням (3.49) випливає, що напруженість поля h є функцією як індукції b , так і її похідної $\frac{db}{dt}$. Тоді (3.49) можна представити:

$$h = f_1(b) + f_2\left(\frac{db}{dt}\right), \quad (3.50)$$

Нелінійне диференціальне рівняння (3.50) в площині $b - h$ описує динамічну петлю гістерезису. Для доведення важливих властивостей рівняння (3.50) напишемо його у вигляді:

$$\frac{db}{dt} = f_2^{-1}[h - f_1(b)], \quad (3.51)$$

де f_2^{-1} – зворотна функціональна залежність нелінійної функції f_2 .

Рівняння (3.51) має властивості, притаманні реальним феромагнетикам. Їх доведення випливає з аналізу рівняння в площині $b - h$ з використанням методу фазової площини. Рівняння (3.51) має рішення в тому випадку, якщо функції f_1 і f_2 обмежені на деякому інтервалі, неспадні і мають безперервні похідні.

Нехай досліджувана динамічна петля гістерезису розташовується в площині $b - h$. На цій площині будується графік нелінійної функції $f_1(b) = h$ (рис. 3.4, рис. 3.5). Праворуч від кривої $f_1(b)$ значення $h - f_1(b)$ позитивні, зліва – негативні. Теж стосується похідної $\frac{db}{dt}$: зліва $\frac{db}{dt} < 0$, справа $\frac{db}{dt} > 0$. Точки, що лежать на кривій $f_1(b)$, мають $\frac{db}{dt} < 0$, таким чином праворуч від кривої $f_1(b)$ функція $b(h)$, яку шукали, не зменшується, а зліва – не збільшується.

Якщо $b_j(t) = b_j(t + T)$, $b_i(t) = b_j(\alpha t)$ при $0 < \alpha < 1$, то площа S , обмежена замкнutoю лінією Γ_j є більшою за S , обмеженою Γ_i .

Якщо підібрati функцію f_1 i f_2 відповідним чином, то (3.50) описуватиме потрібну петлю гістерезису.

З фізики процесів перемагнічування ясно, що функції f_1 i f_2 відображають реактивні i дисипативні процеси. Оскільки функція $b(t)$ періодична, то завжди знайдуться дві точки t_i i t_j , в яких

$$b(t_i) = b(t_j), \quad (3.52)$$

для всіх $t_i, t_j \in [0, T]$. Тоді

$$\left. \frac{db}{dt} \right|_{t=t_i} = - \left. \frac{db}{dt} \right|_{t=t_j}. \quad (3.53)$$

Підставляючи (3.52) і (3.53) у рівняння (3.50), отримаємо:

$$\begin{aligned} h(t_i) &= f_1(b(t_i)) + f_2\left(\left.\frac{db}{dt}\right|_{t_i}\right), \\ h(t_j) &= f_1(b(t_i)) - f_2\left(\left.\frac{db}{dt}\right|_{t_i}\right). \end{aligned} \quad (3.54)$$

Складаючи та віднімаючи рівняння (3.54), отримуємо:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{2} [h(t_i) + h(t_j)], \\ f_2 &= \frac{1}{2} [h(t_i) - h(t_j)]. \end{aligned} \quad (3.55)$$

Таким чином $f_1(b)$ дорівнює напівсумі напруженості поля висхідної і спадної гілок петлі гістерезису при фіксованій індукції. Залежність $f_1(b)$ введена вперше [104, 107] і названа середньою кривою намагнічування (СКН). СКН відрізняється від ОКН – основної кривої намагнічування, оскільки ОКН має точку перегину і два «коліна» (нижнє і верхнє), а СКН – лише верхнє. Суттєво різниця в СКН і ОКН полягає в 1 і 2 похідних.

Друга функція f_2 , як випливає з (3.55), визначається різницею h спадної і висхідної гілок ПГ ($b_{3\alpha\delta}$).

Для розрахунку пристройів, що містять феромагнітні сердечники, необхідно вибрати f_1 (ОКН) і f_2 (СКН) аналітично.

На рис. 3.3, рис. 3.9 представлени f_1 і f_2 .

3.6 Побудова математичної моделі магнітного гістерезису

Беручи до уваги вище викладене, застосуємо метод розщеплення кривої намагнічування уздовж координатних осей, використовуючи граничну петлю (рис. 3.3) і використовуючи критерій X^2 (Пірсона) при визначені відсотка відхилення від експериментальних даних:

$$y(t) = f(x(t)) + \varphi\left(x(t), \frac{dx(t)}{dt}\right), \quad (3.56)$$

де $f(x(t))$ – апроксимація основної кривої намагнічування (3.12, 3.15); $\varphi\left(x(t), \frac{dx(t)}{dt}\right)$ – функція визначає відхилення від основної кривої намагнічування.

Функції виразу (3.50) ніщо інше як (3.56) $f_1 = f(x(t))$ і $f_2 = \varphi\left(x(t), \frac{dx(t)}{dt}\right)$.

Розщеплення повинне проявлятися лише в межах області гістерезису і поза нею повинне забезпечувати перемагнічування по основній кривій. Зручним засобом для цього є симетричні дзвоноподібні функції.

Зробимо розщеплення петлі гістерезису (рис. 3.3, рис. 3.9) вздовж осі індуктивності. Тоді функція $\varphi\left(x(t), \frac{dx(t)}{dt}\right)$ прийматиме наступний вигляд:

$$\varphi(x) = \underbrace{-\alpha_2 \cdot \tanh\left(\beta_2 \cdot \frac{dx}{dt}\right)}_1 \cdot \underbrace{\exp(-(c_2 \cdot x)^2)}_2, \quad (3.57)$$

де коефіцієнти апроксимації α_2 , β_2 , c_2 вибираються за характерними параметрами граничної петлі гістерезису: залишкова індукція $B_r = 0,88$ Тл, H_C коерцитивної сили (90,8 А/м), гранична точка діючих значень $B_m = 1,37$ Тл, $H_m = 345$ А/м.

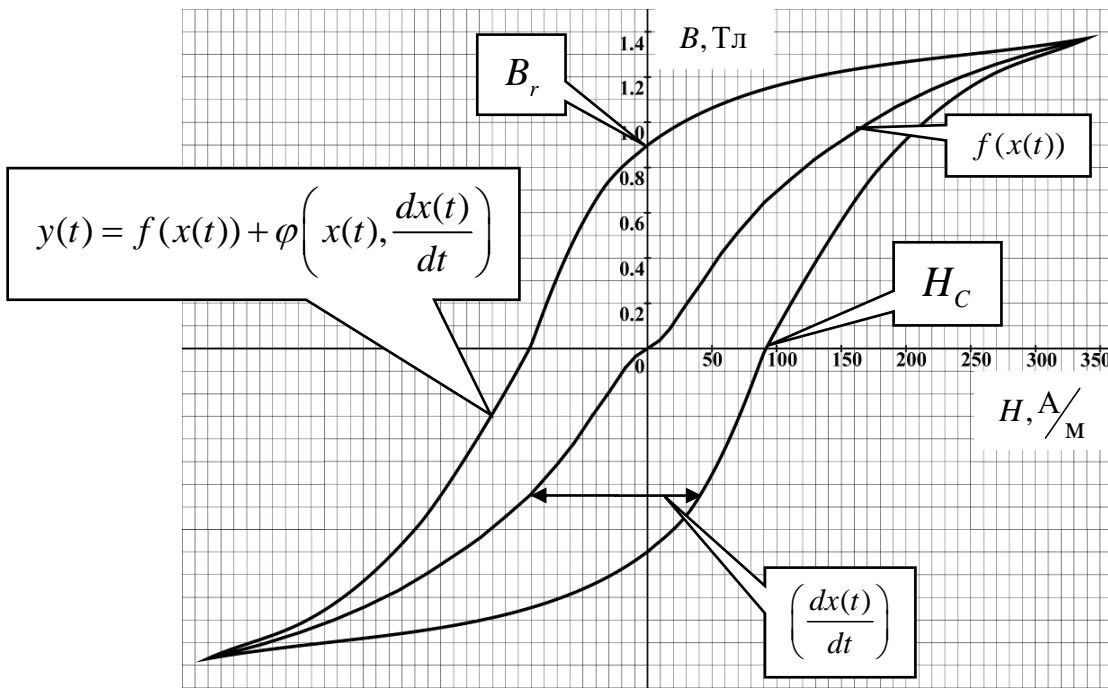


Рисунок 3.9 – Експериментальна гранична петля гістерезису ДТ-1-150

Перший співмножник в (3.57) забезпечує розщеплення кривої намагнічування на висхідну і спадну області в залежності від знаку похідної, а другий – формування граничних розмірів петлі.

Напишемо вираз (3.56) в розгорнутому вигляді для функції $B(H)$ для визначення коефіцієнтів $\alpha 2$, $\beta 2$, $c 2$:

$$B(t) = \underbrace{\alpha \cdot \arctan(\beta \cdot H(t)) + c \cdot H(t)}_{f(x)} - \underbrace{-\alpha 2 \cdot \tanh\left(\beta 2 \cdot \frac{dH(t)}{dt}\right) \cdot \exp(-(c 2 \cdot H(t))^2)}_{\varphi(x)}. \quad (3.58)$$

Нехай при $H = 0$ отримаємо максимальну швидкість зміни магнітного стану, тоді з виразів (3.58) для визначення коефіцієнта $\alpha 2$ отримуємо, $f(x) = 0$, а $\varphi(x)$ дасть нам ніщо інше як B_r (рис. 3.9). Тому виходячи з властивостей функції $\tanh(x)$, (3.58) прийме вигляд $B_r = \alpha 2 \cdot \tanh\left(\frac{\pi}{2}\right)$, звідси

$$\alpha 2 = \frac{B_r}{\tanh\left(\frac{\pi}{2}\right)} \approx 0,98.$$

За граничним значенням петлі, точки збіжності висхідної і низхідної гілок, а саме H_m , визначимо коефіцієнт $c2$ у другому співмножнику виразу (3.58). Нехай $\exp(-(c2 \cdot H_m)^2) = \varepsilon$, де ε – мале позитивне число $10^{-1} \dots 10^{-5}$ [51], тоді $c2 = 0,046$.

У точці $B = 0$ отримано значення H_C (рис. 3.9) і оцінено швидкість зміни напруженості магнітного поля $\frac{dH}{dt}$ в точці H_C . З (3.58) отримаємо рівняння для визначення $\beta2$:

$$0 = \underbrace{\alpha \cdot \arctan(\beta \cdot H_C) + c \cdot H_C}_{f(H_c)} - \underbrace{\alpha 2 \cdot \tanh\left(\beta 2 \cdot \frac{dH_C}{dt}\right) \cdot \exp(-(c2 \cdot H_C)^2)}_{\varphi(H_c)},$$

звідки: $\beta2 \cdot \frac{dH_C}{dt} = \operatorname{arctanh}\left(f(H_C) \cdot \alpha 2^{-1} \cdot \exp(-(c2 \cdot H_C)^2)\right) = -2,311$. У підсумку отримуємо $\beta2 = -0,000023$.

Підставивши отримані значення коефіцієнтів апроксимації в вираз (3.58), отримаємо математичний опис експериментально отриманої петлі гістерезису рис. 3.10.

Подібним чином отримана петля магнітного гістерезису при підмагнічуванні постійним струмом (4,5 A) (рис. 3.11).

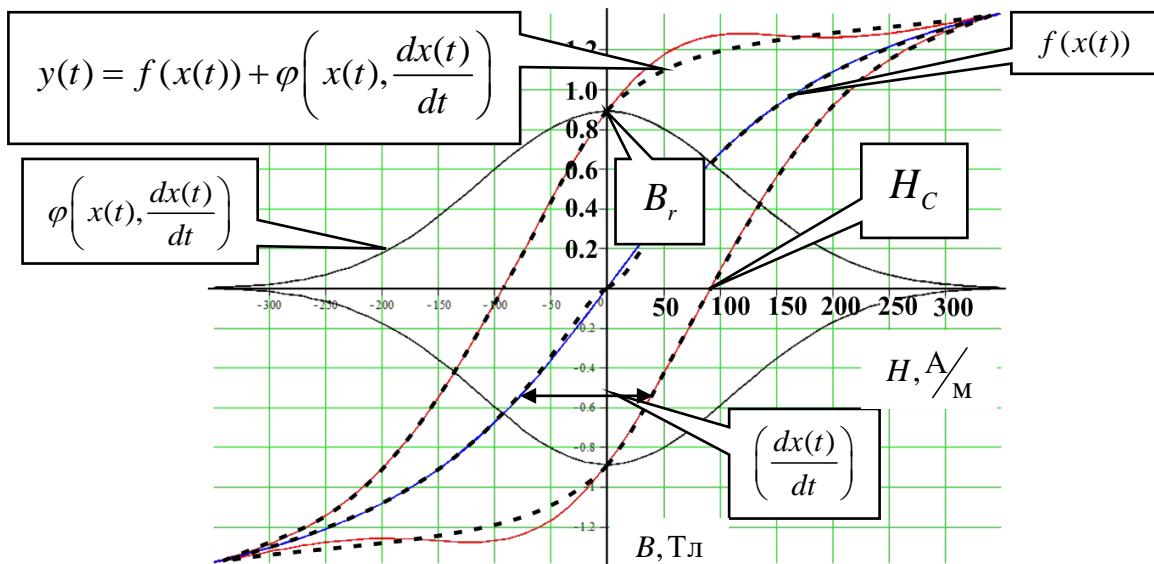


Рисунок 3.10 – Результат математичного опису петлі магнітного гістерезису

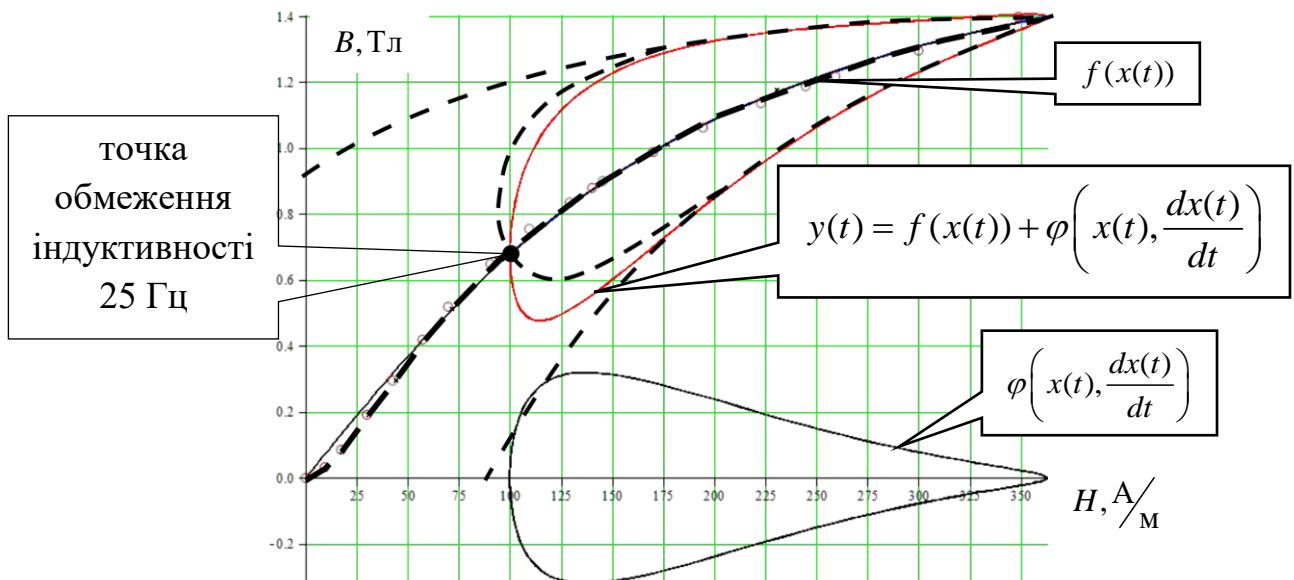


Рисунок 3.11 – Результат математичного опису петлі магнітного гістерезису з урахуванням підмагнічування постійним струмом

Отриману математичну модель, що описує ОКН і петлю магнітного гістерезису, використовуємо для отримання більш детальної інформації про досліджуваний об'єкт (ДТ-1-150).

Таким чином, спрощений алгоритм програми отримання електромагнітної характеристики феромагнітного об'єкту, що наведено на рис. 3.12, дозволяє отримати раціональну функцію ОКН і ПГ з мінімальною похибкою.

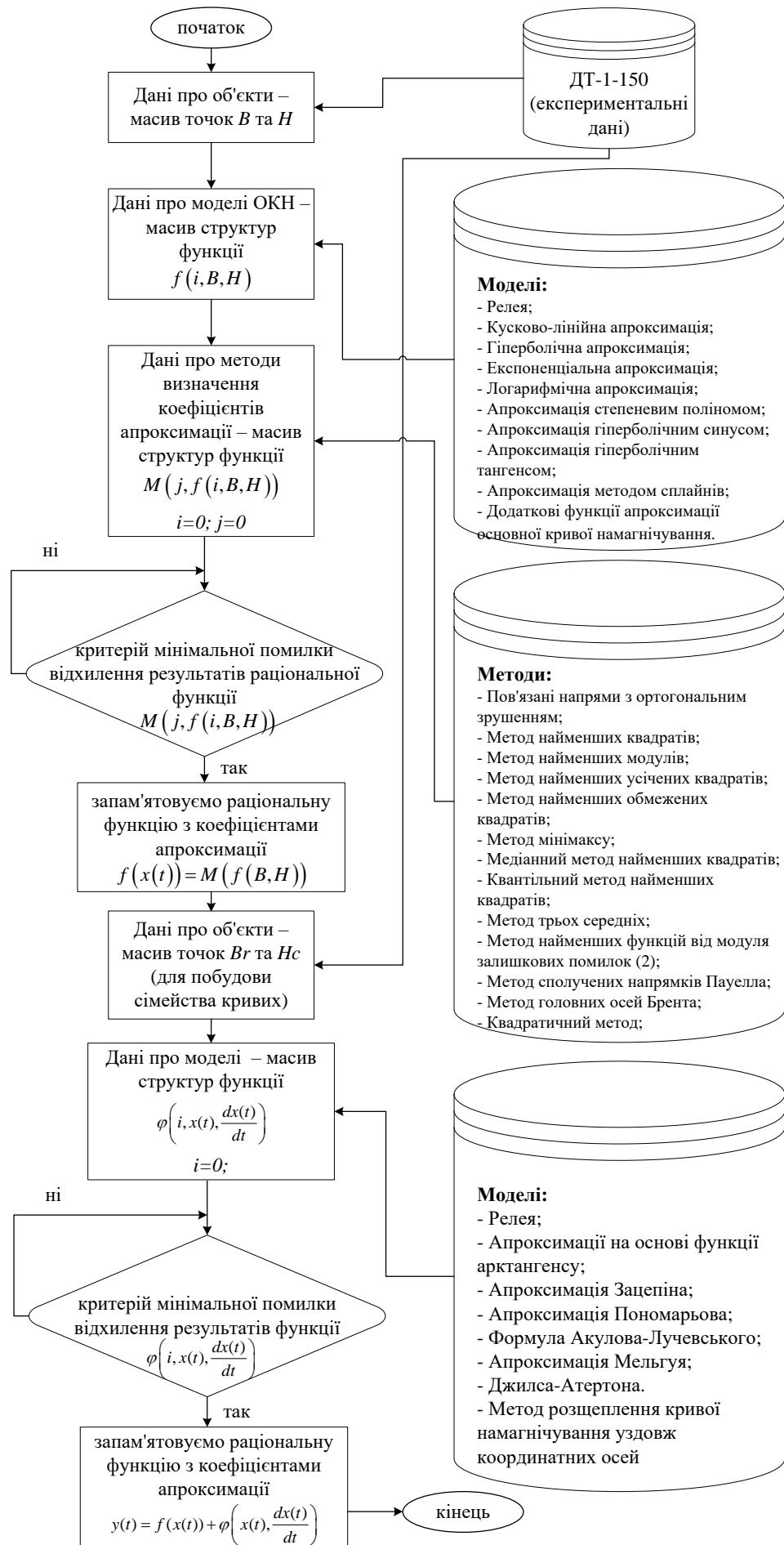


Рисунок 3.12 – Спрощений алгоритм програми отримання функції ОКН і ПГ

Використовуючи гіперболічної функції $\tanh(\)$ для опису ПГ, функції $y(t)$ (3.56) за критерієм Пірсона, дала меншу похибку відхилення від експериментальних даних, на рівні 10 % значності.

3.7 Модель дросель-трансформатора на основі отриманої апроксимації

Найбільш ефективним рішенням, для дросель-трансформатора, є побудова моделі на об'єкті схожому за своїми фізичними характеристиками з однофазним трансформатором напруги, схема заміщення якого представлена на рис. 3.13.

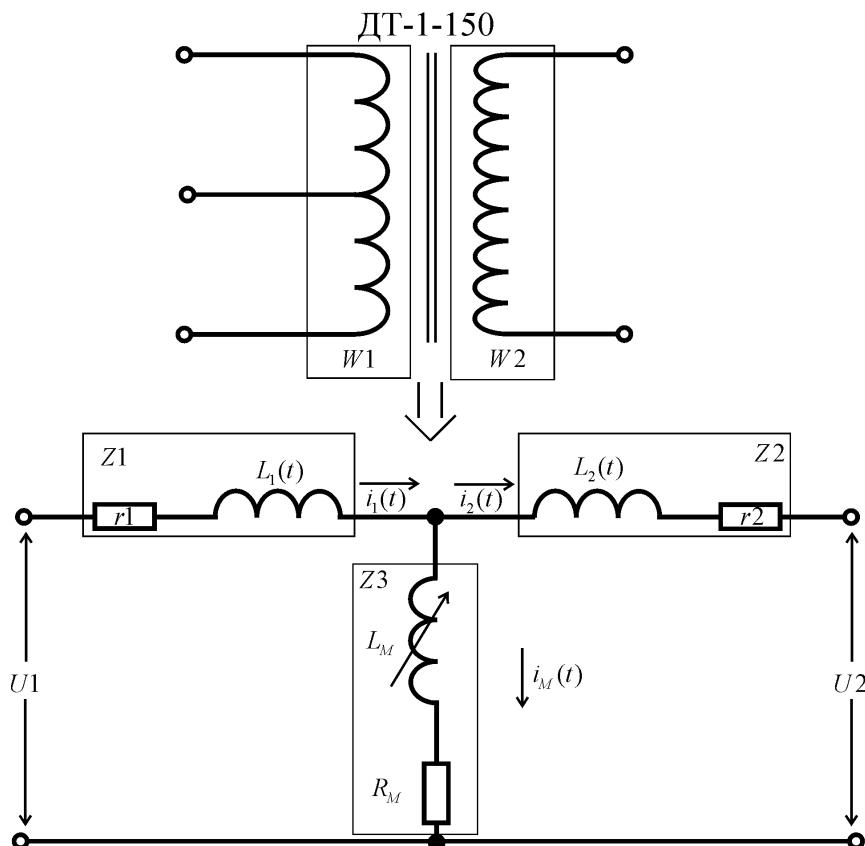


Рисунок 3.13 – Схема заміщення однофазного трансформатора

Складемо рівняння електричного кола однофазного трансформатора по законам Кірхгофа для магнітного кола:

$$\begin{cases} u_1(t) = i_1(t)r_1 + \frac{d\Psi_1(t)}{dt} + L_{1P} \frac{di_1(t)}{dt}, \\ u_2(t) = \frac{d\Psi_2(t)}{dt} + i_2(t)(r_2 + R_n) + L_{2P} \frac{di_2(t)}{dt}, \end{cases} \quad (3.59)$$

де $u_1(t)$ – миттєве значення напруги первинної обмотки; $u_2(t)$ – прийняте, рівним 0; $i_1(t)$, $i_2(t)$ – миттєві значення струмів в обмотках трансформатора; $\Psi_1(t)$, $\Psi_2(t)$ – миттєве значення потокозчеплення; r_1 , r_2 – активний опір обмоток; L_{1P} , L_{2P} – індуктивності розсіювання обмоток.

Враховуючи те, що у дросель-трансформаторів індуктивність розсіювання обмоток досить мала, можна прийняти $L_{1P} = 0$, $L_{2P} = 0$. Крім того, представимо, $\Psi_1(t)$, $\Psi_2(t)$ рівняння (3.59) у вигляді індуктивності, що змінюється і залежить від струмів $L_1(i_1(t))$, $L_2(i_2(t))$.

Представимо доданок $\frac{d\Psi}{dt}$ у вигляді змінних індуктивностей, для цього

зробимо перетворення:

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = \frac{d\Psi_1}{dt} \cdot \frac{dF}{dF} = \frac{\partial\Psi_1}{\partial F} \cdot \frac{dF}{dt}, \quad \frac{d\Psi_2}{dt} = \frac{d\Psi_2}{dt} \cdot \frac{dF}{dF} = \frac{\partial\Psi_2}{\partial F} \cdot \frac{dF}{dt}, \quad (3.60)$$

де $F = i_1W_1 + i_2W_2$ – намагнічуоча сила обмоток; $\Psi_{1,2} = W_{1,2} \cdot \Phi$ – потокозчеплення первинної і вторинної обмоток відповідно.

Уявімо (3.60) в розгорнутому вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_1}{dt} &= \frac{\partial\Psi_1}{\partial F} \cdot \frac{dF}{dt} = W_1 \frac{\partial\Phi}{\partial F} \cdot \frac{d(W_1i_1 + W_2i_2)}{dt} = W_1^2 \frac{\partial\Phi}{\partial F} \cdot \frac{di_1}{dt} + W_1W_2 \frac{\partial\Phi}{\partial F} \cdot \frac{di_2}{dt}, \\ \frac{d\Psi_2}{dt} &= \frac{\partial\Psi_2}{\partial F} \cdot \frac{dF}{dt} = W_2 \frac{\partial\Phi}{\partial F} \cdot \frac{d(W_1i_1 + W_2i_2)}{dt} = W_2^2 \frac{\partial\Phi}{\partial F} \cdot \frac{di_2}{dt} + W_1W_2 \frac{\partial\Phi}{\partial F} \cdot \frac{di_1}{dt}. \end{aligned} \quad (3.61)$$

Перетворимо систему (3.59) з урахуванням (3.61) в нормальній формі Коші:

$$\begin{cases} U_1 - i_1r_1 = \underbrace{W_1^2 \frac{\partial\Phi}{\partial F}}_{L_{11}} \cdot \frac{di_1}{dt} + \underbrace{W_1W_2 \frac{\partial\Phi}{\partial F}}_{L_{12}} \cdot \frac{di_2}{dt}, \\ -i_2(r_2 + R_H) = \underbrace{W_2^2 \frac{\partial\Phi}{\partial F}}_{L_{22}} \cdot \frac{di_2}{dt} + \underbrace{W_1W_2 \frac{\partial\Phi}{\partial F}}_{L_{21}} \cdot \frac{di_1}{dt}. \end{cases} \quad (3.62)$$

де

$$L_{11} = W_1^2 \frac{\partial\Phi}{\partial F}, \quad L_{12} = W_1W_2 \frac{\partial\Phi}{\partial F}, \quad L_{21} = W_1W_2 \frac{\partial\Phi}{\partial F}, \quad L_{22} = W_2^2 \frac{\partial\Phi}{\partial F}, \quad (3.63)$$

несуть в собі фізичний зміст загальної індуктивності обмоток, яка і буде визначати головну індуктивність і магнітний взаємозв'язок [7, 14, 15, 16].

Для знаходження похідної $\frac{\partial \Phi}{\partial F}$ з метою обчислення індуктивностей за формулами (3.63) в процесі розрахунку було використано отримані в ході апроксимації $B(H)$ рівняння і описано нелінійний магнітний параметр – динамічну магнітну провідність – $G_D(F)$ (3.64):

$$G_D(F) = \frac{\partial \Phi}{\partial F} = \frac{\mu_0 \mu_D(H) \cdot S}{\ell}. \quad (3.64)$$

$$\text{Динамічний магнітний опір } R_D(F) = \frac{1}{G_D(F)}.$$

З теорії відомо [7, 15, 16], що існують такі поняття як статична магнітна проникність μ_{CT} (в довідниках початкова і максимальна – P_1) і диференціальна магнітна проникність μ_D , що встановлює зв'язок між нескінченно малими прирошеннями (P_2) індукції і напруженості, описаних наступними рівняннями:

$$\mu_{CT} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H} \Bigg|_{P_1}, \quad \mu_D = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \Bigg|_{P_2}. \quad (3.65)$$

З урахуванням розглянутих виразів (3.63, 3.64, 3.65) напишемо систему (3.62) в наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_D(t) = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB(t)}{dH(t)}, \\ G_D(t) = \frac{\mu_0 \mu_D(t) \cdot S}{\ell}, \\ L_{11}(t) = W_1^2 \cdot G_D(t), \\ L_{12}(t) = W_1 W_2 \cdot G_D(t), \\ L_{21}(t) = W_1 W_2 \cdot G_D(t), \\ L_{22}(t) = W_2^2 \cdot G_D(t), \\ U_1(t) - i_1(t) r_1 = L_{11}(t) \cdot \frac{di_1(t)}{dt} + L_{12}(t) \cdot \frac{di_2(t)}{dt}, \\ -i_2(t)(r_2 + R_H) = L_{22}(t) \cdot \frac{di_2(t)}{dt} + L_{21}(t) \cdot \frac{di_1(t)}{dt}. \end{array} \right. \quad (3.66)$$

Сімейство кривих динамічної магнітної провідності, статичної магнітної проникності та диференціальної магнітної проникності, динамічного магнітного опору для ДТ-1-150 наведено на рис. 3.14 – рис. 3.17 відповідно.

Завдання розрахунку динамічних режимів однофазного трансформатора полягає у визначенні змінних електричних параметрів трансформатора на основі заданих.

Для розглянутої системи (3.66) вихідними даними вважаємо напругу первинної обмотки. Необхідно визначити індуктивності опору магнітних гілок, а також зміну в часі струмів первинної і вторинної обмоток. Вирішуючи (3.66), можна оцінити перехідний процес однофазного трансформатора.

$\mu, \text{Гн}/\text{м}$

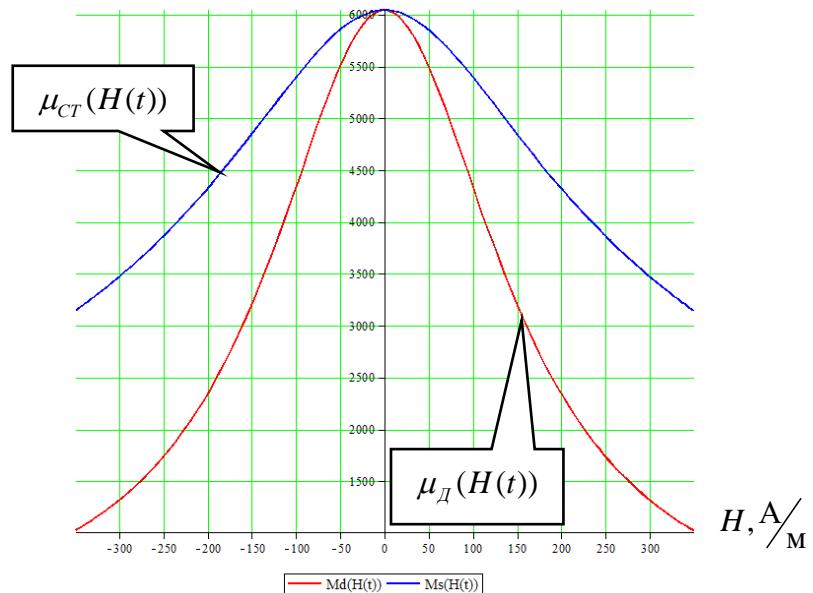


Рисунок 3.14 – Динамічна та статична магнітна проникність

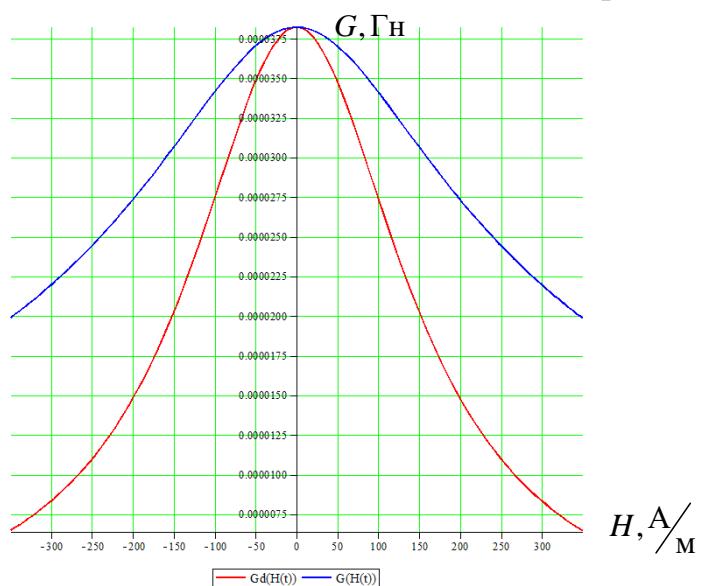


Рисунок 3.15 – Динамічна та статична магнітна провідність

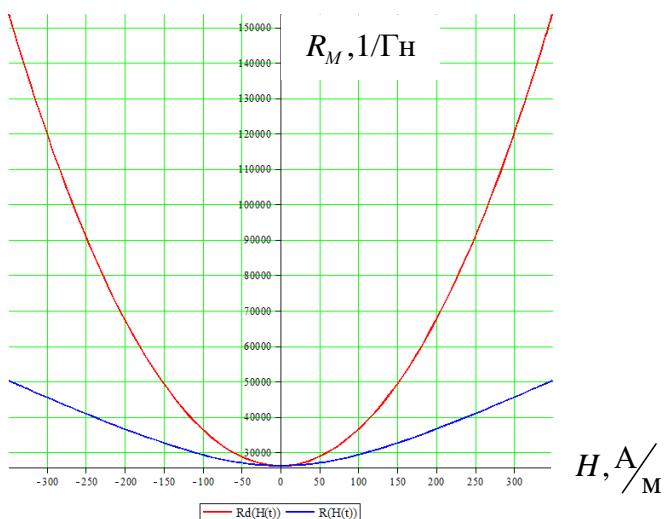


Рисунок 3.16 – Динамічний та статичний магнітний опір

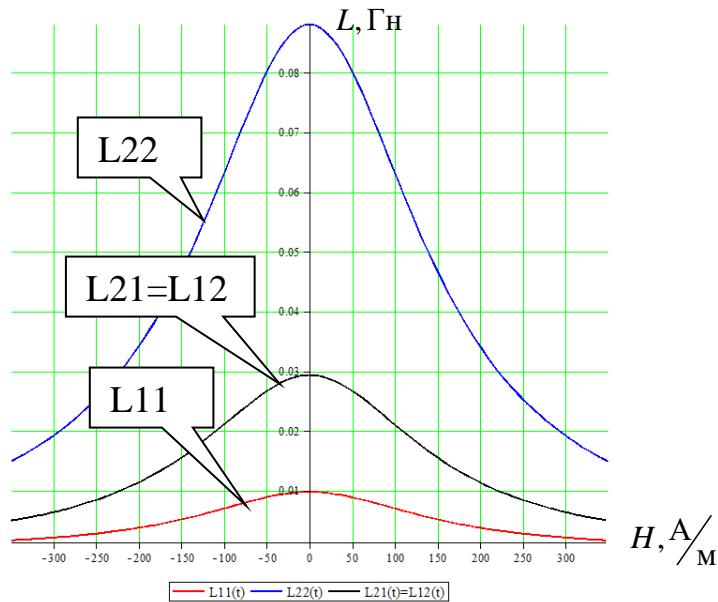


Рисунок 3.17 – Загальні індуктивності

Представлення реального трансформатора у вигляді схеми заміщення (СЗ) (рис. 3.18), що містить каскадне з'єднання ідеального трансформатора (ІТ) і Т-подібного пасивного чотириполюсника, дозволяє врахувати розсіювання магнітного потоку і втрати в міді і сталі (площа ПГ).

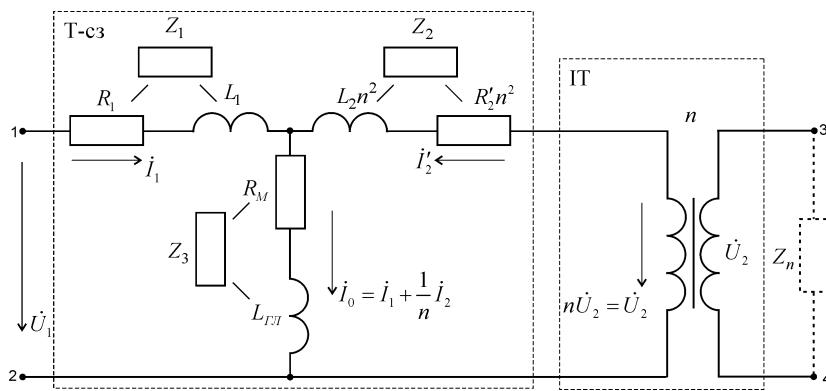


Рисунок 3.18 – Т-подібна схема заміщення з ідеальним трансформатором

При вирішенні (3.66), окрім визначення індуктивностей при різних значеннях B і H , можна проаналізувати переходний процес в ДТ.

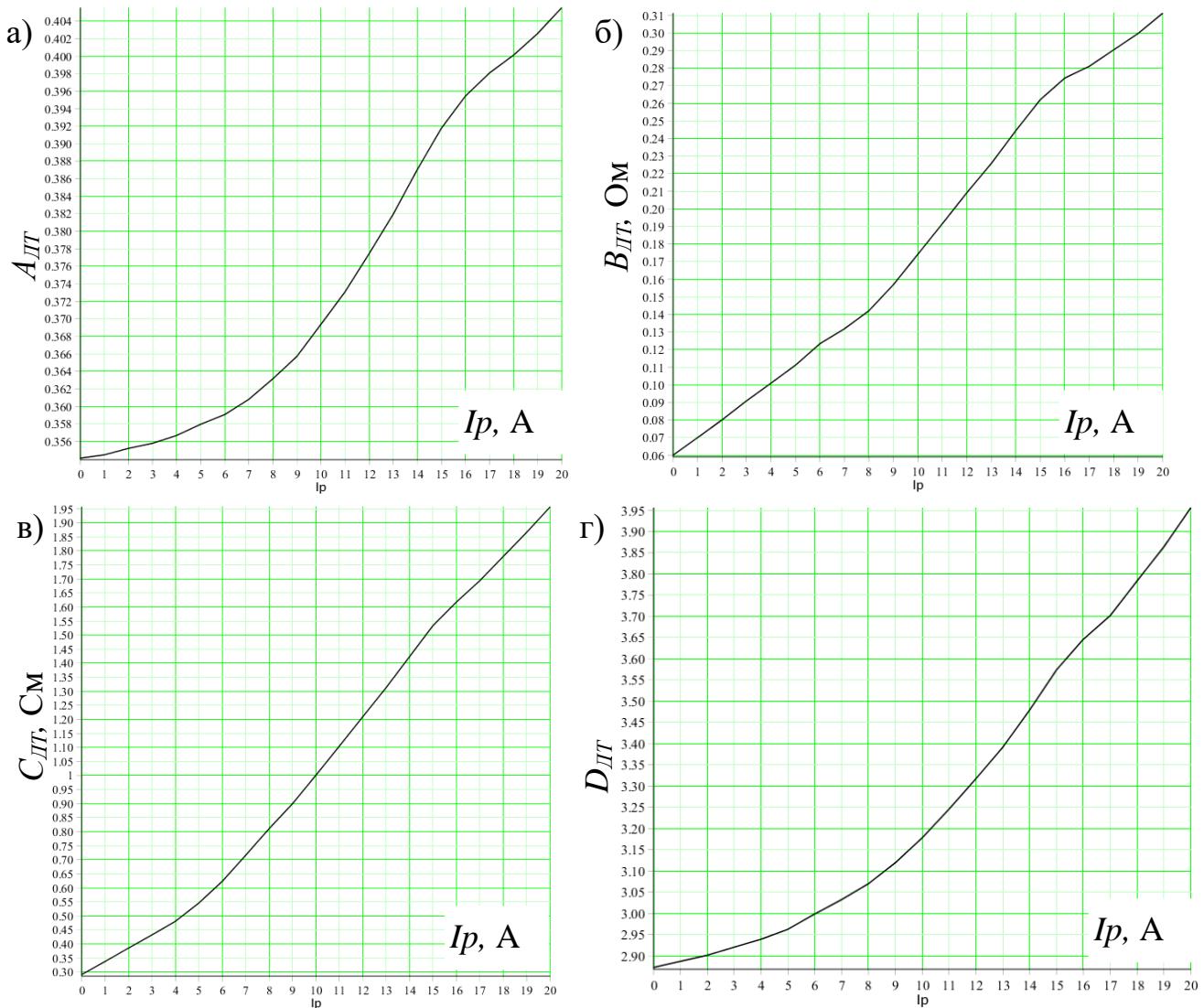
Отримані індуктивності використовуються в СЗ у Z-формі (рис. 3.18) і потім перетворюються в А-форму.

У Z-формі матриця коефіцієнтів виглядає наступним чином:

$$Z_T = \begin{vmatrix} z_{11} & z_{12}=z_M \\ z_1+z_3 & z_3 \\ z_3 & z_1+z_3 \\ z_{22}=z_M & z_{21} \end{vmatrix}.$$

Матриця А-параметрів СЗ результуюча Т-подібного чотириполюсника та

$$\text{IT: } A_{12} = A_T A_{IT}, \quad A_{IT} = \begin{vmatrix} 1/n & 0 \\ 0 & n \end{vmatrix}, \quad A_T = \frac{1}{z_M} \begin{vmatrix} \det Z & \\ z_{11} & z_{11}z_{12}-z_M^2 \\ 1 & z_{22} \end{vmatrix}, \quad n = \frac{W_2}{W_1}.$$



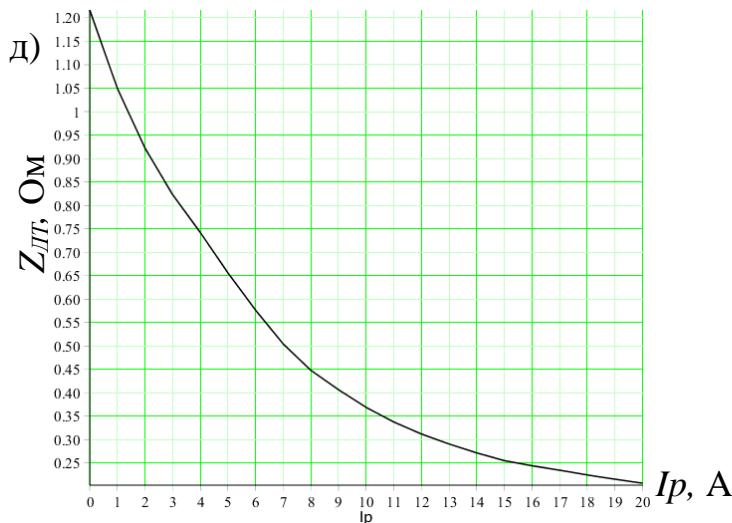


Рисунок 3.19 – Залежність модуля коефіцієнта А (а), В (б), С (в), D (г) та модуля вхідного опору (д) ДТ-1-150 від струму підмагнічування

Значення коефіцієнтів чотириполюсника ДТ А, В, С, D при дії різних рівнів постійного струму підмагнічування наведені на рис. 3.19 (а, б, в, г). Зі зростанням струму підмагнічування модулі коефіцієнтів А, В, С, D теж збільшуються.

Значення зміни вхідного опору при дії різних рівнів постійного струму підмагнічування наведені на рис. 3.19 (д), де наведено зменшення вхідного опору ДТ при зростанні струму підмагнічування.

3.8 Розрахунок основних режимів роботи РК з урахуванням підмагнічування ДТ на релейному та живлючому кінцях

3.8.1 Загальні відомості про режими роботи рейкових кіл

У роботі РК розрізняють три основних режими: нормальній, шунтовий, контрольний.

Нормальний (регулювальний) – режим роботи РК при справних рейкових нитках і відсутності рухомого одиниці. Колійний приймач в цьому режимі повинен надійно утримувати якір притягнутим і фіксувати вільність ділянки колії, що контролюється цим РК.

Шунтовий – режим роботи РК при наявності рухомої одиниці, колійний приймач повинен відпустити якір і зафіксувати зайнятість ділянки колії.

Контрольний – режим роботи РК при зламі або вилученні рейки, колійний приймач повинен показувати зайнятість ділянки колії.

На умови роботи РК в кожному з режимів впливають три незалежні змінні величини:

- опір ізоляції ($r_{I \min} \dots r_{I \max}$);
- опір рейок ($z_{\min} \dots z_{\max}$);
- напруга джерела струму ($U_{T \min} \dots U_{T \max}$).

Оскільки колійний приймач повинен працювати за будь-яких умов, в розрахунках РК завжди враховуються найбільш критичні умови для кожного режиму роботи РК, що наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Умови роботи (існування) рейкового кола

Режим	Параметри		
	U_T	z	r_I
Нормальний	min	max	min
Шунтовий	max	min	max
Контрольний	max	min	критичне

Критичний опір ізоляції ($r_{I_{kp}}$) – найгірша умова для виконання контрольного режиму, ($r_{I \min} \dots r_{I_{kp}} \dots r_{I \max}$), для кожного РК розраховується індивідуально за відповідними формулами.

Окрім основних режимів роботи РК є два додаткових: короткого замикання (КЗ) і автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС).

Режим КЗ настає при в'їзді поїздів на живильний кінець. Потужність, що споживається від джерела живлення РК при цьому повинна бути меншого, за допустиму.

Режим АЛС повинен забезпечувати нормальну роботу локомотивних пристройів АЛС, для чого розрахований струм ($I_{P_{ALC}}$) в рейках під приймальними котушками локомотива в точці, найбільш віддаленій від

джерела, не повинен бути меншим нормативної величини ($I_{H_{ALC}}$). Найгірші умови для цього режиму збігаються з нормальним режимом.

У нашому випадку режими КЗ та АЛС розраховуватися не будуть, адже вони не впливають на загальну картину роботи РК.

Для розрахунків було обрано типові нерозгалужені фазочутливі (нормаль РЦ25-ЭТ50-С-90) та кодово (нормаль РЦ25-01П) РК з двома ДТ типу ДТ-1-150 (рис. 1.7, рис. 1.8), складено загальні схеми заміщення для розрахунків електричних характеристик РК (рис. 3.20, рис. 3.23) [8, 9, 21, 22, 63, 97].

Загальна схема заміщення РК використовується для інженерних розрахунків, при чому усі елементи РК відомі, необхідно перевірити, виконання вимог усіх режимів. Цей метод в теорії РК має назву «інженерний» або «метод порівняння напруг».

3.8.2 Нерозгалужене фазочутливе РК 25 Гц

Як показали розрахунки фазочутливого РК, крім струму підмагнічування ДТ на нормальну роботу РК впливає також кут розстроки реле ДСШ-13. Таким чином розрахунки, основних показників, згідно рекомендацій ГТСС, виконано при питомому опорі ізоляції баласту $r_{min} = 0,8 \text{ Ом}\cdot\text{км}$, різних значеннях струму підмагнічування ДТ та кутах розстроки реле, довжина РК приймалася рівною 500 м.

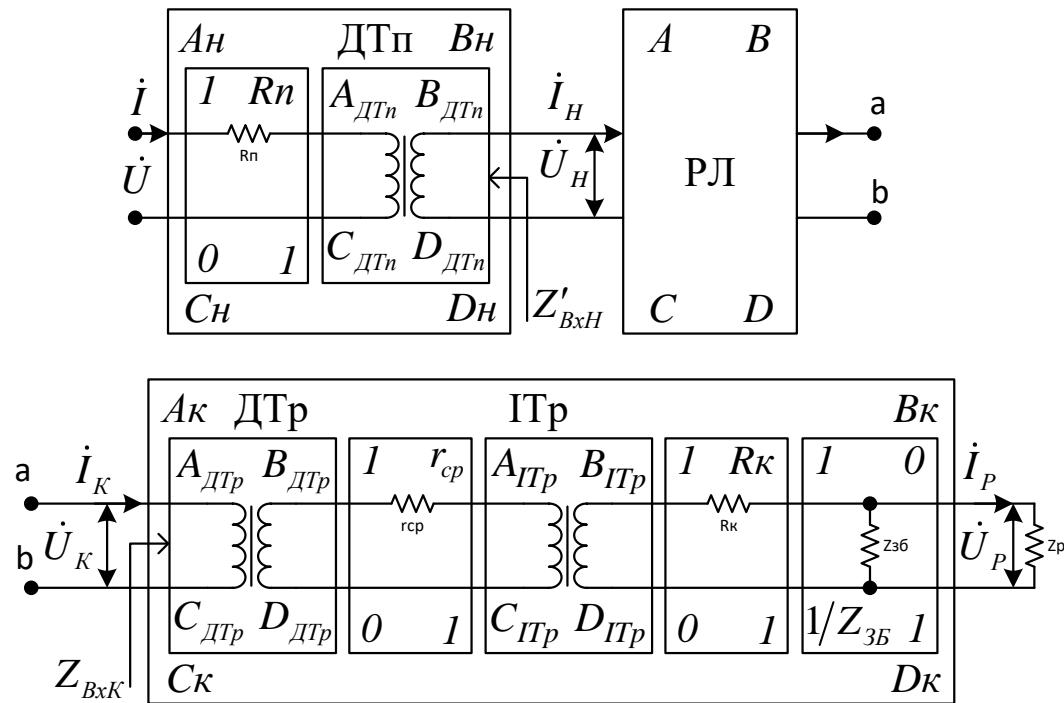


Рисунок 3.20 – Схема заміщення нерозгалуженого фазочутливого РК 25 Гц з колійним приймачем ДСШ-13

У наведеній на рис. 3.20 схемі заміщення:

- A, B, C, D – коефіцієнти загального рейкового чотириполюсника, залежать від r_I, z, l_{PK} (довжина РК), режиму роботи РК;
- A_H, B_H, C_H, D_H – коефіцієнти загального чотириполюсника Н, залежать від параметрів апаратури живильного кінця РК, незмінні для всіх режимів;
- A_K, B_K, C_K, D_K – коефіцієнти загального чотириполюсника К, залежать від параметрів апаратури релейного кінця РК, незмінні для всіх режимів;
- Z_P – опір колійного реле;
- \dot{U}, \dot{I} – напруга і струм джерела живлення РК.

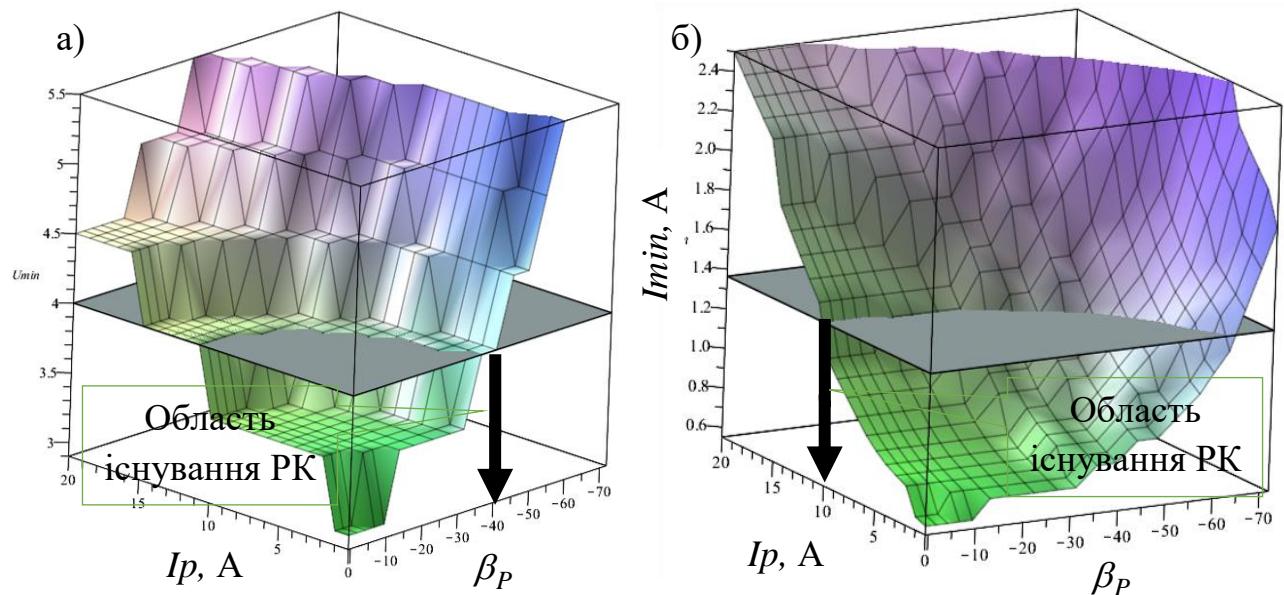


Рисунок 3.21 – Мінімальне значення напруги (а) та струму (б) живлючого трансформатора

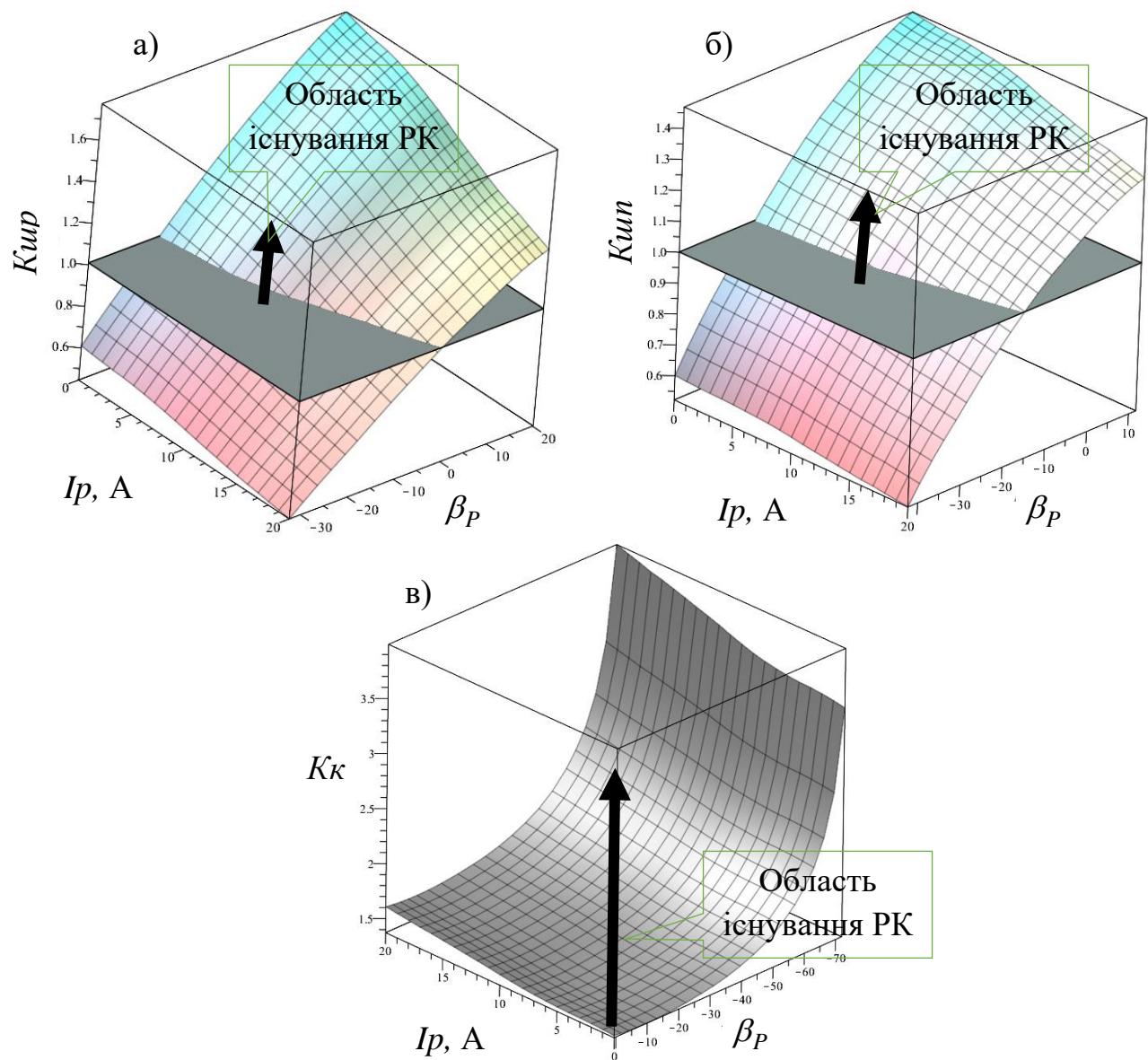


Рисунок 3.22 – Основні коефіцієнти режимів роботи РК

На рис. 3.21 наведено мінімальне значення напруги (U_{\min} , В) та струму (I_{\min} , А) живлячого трансформатора, вказана область існування РК в залежності від струму підмагнічування (I_P , А) та кута розстройки реле (β_P).

На рис. 3.22 приведено значення основних характеристик, які визначаються основними режимами роботи: а) – коефіцієнт шунтової чутливості на релейному кінці; б) – коефіцієнт шунтової чутливості на живлячому кінці; (в) – коефіцієнт чутливості до зламаної рейки, та область існування фазочутливого РК.

У табл. 3.3 приведені порівняльні розрахункові параметри фазочутливих РК [36, 104], отримані двома методами розрахунку – класичним і запропонованим, із застосуванням математичної моделі магнітних характеристик феромагнетиків без урахування дії струму підмагнічування.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків фазочутливих РК

Методи розрахунку	\dot{U}_{DT} , В	\dot{I}_{DT} , А	\dot{U}_{TP} , В	S, ВА	β_P , град
Класичний	$3,75e^{j95,5^0}$	$0,82e^{j60^0}$	$5,1e^{j78,6^0}$	4,58	$6^032'$
Запропонований	$4,1e^{j89^0}$	$0,77e^{j54^0}$	$5,5e^{j78^0}$	4,23	6^0
Різниця в розрахунках, %	9,3	9,3	7,8	7,64	–

Як показали розрахунки, область існування РК обмежена кутом розстройки реле до -37^0 та постійний струмом підмагнічування 11 А, оскільки обмеження накладає живильний трансформатор і більшою мірою шунтовий режим. Коефіцієнт четыріполюсника DT-1-150 при підмагнічуванні осердя сприятливо впливають на контрольний режим роботи фазочутливого РК.

3.8.3 Нерозгалужене кодове РК 25 Гц

Кодове РК розраховувалось з урахуванням струму підмагнічування DT та зміни опорі ізоляції баласту r_{min} від 0,2 до 1,5 Ом·км, довжина РК – 1500 м.

За відсутності двоелементного секторного реле у розрахунках кута розстройки реле немає сенсу, натомість було введено діапазон $r_{I \min}$.

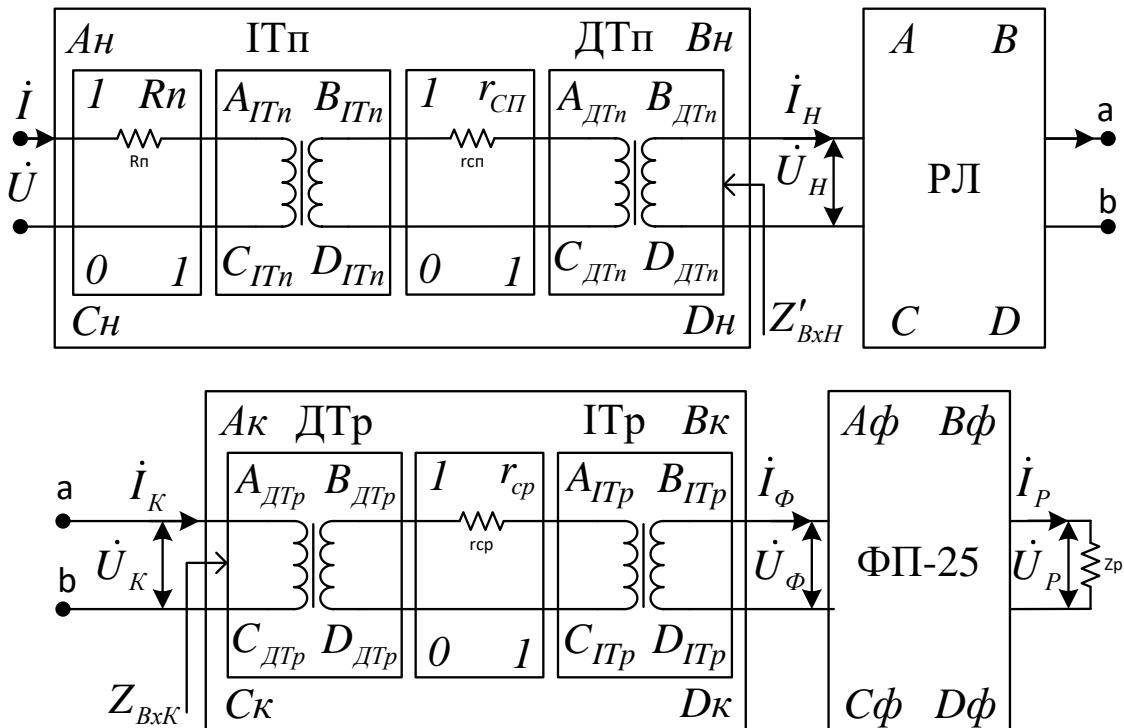


Рисунок 3.23 – Схема заміщення нерозгалуженого кодового РК 25 Гц з колійним приймачем ИМВШ-110

У наведеній на рис. 3.23 схемі заміщення використовуються такі ж умовні позначення загальних чотириполюсників як на рис. 3.20.

На рис. 3.24 наведено мінімальне значення напруги (U_{\min} , В) та струму (I_{\min} , А) живлячого трансформатора, вказана область існування РК в залежності від струму підмагнічування (I_p , А) та опору ізоляції баласту (R_{\min} , Ом·км).

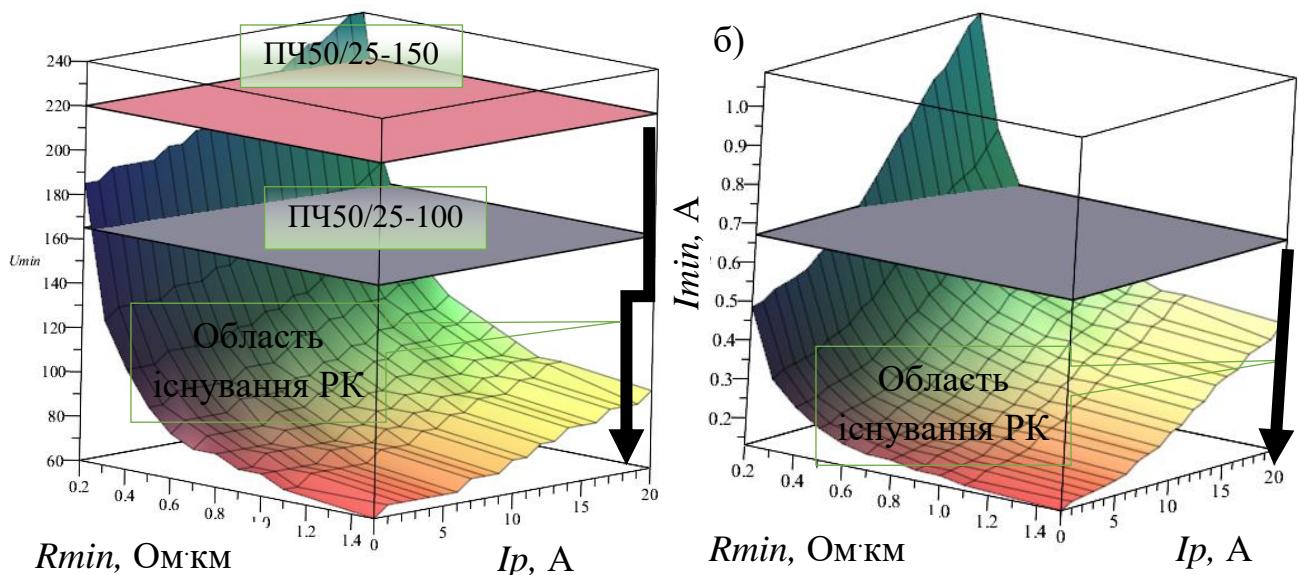


Рисунок 3.24 – Мінімальне значення напруги (а) та струму (б) перетворювача частоти (ПЧ 50/25)

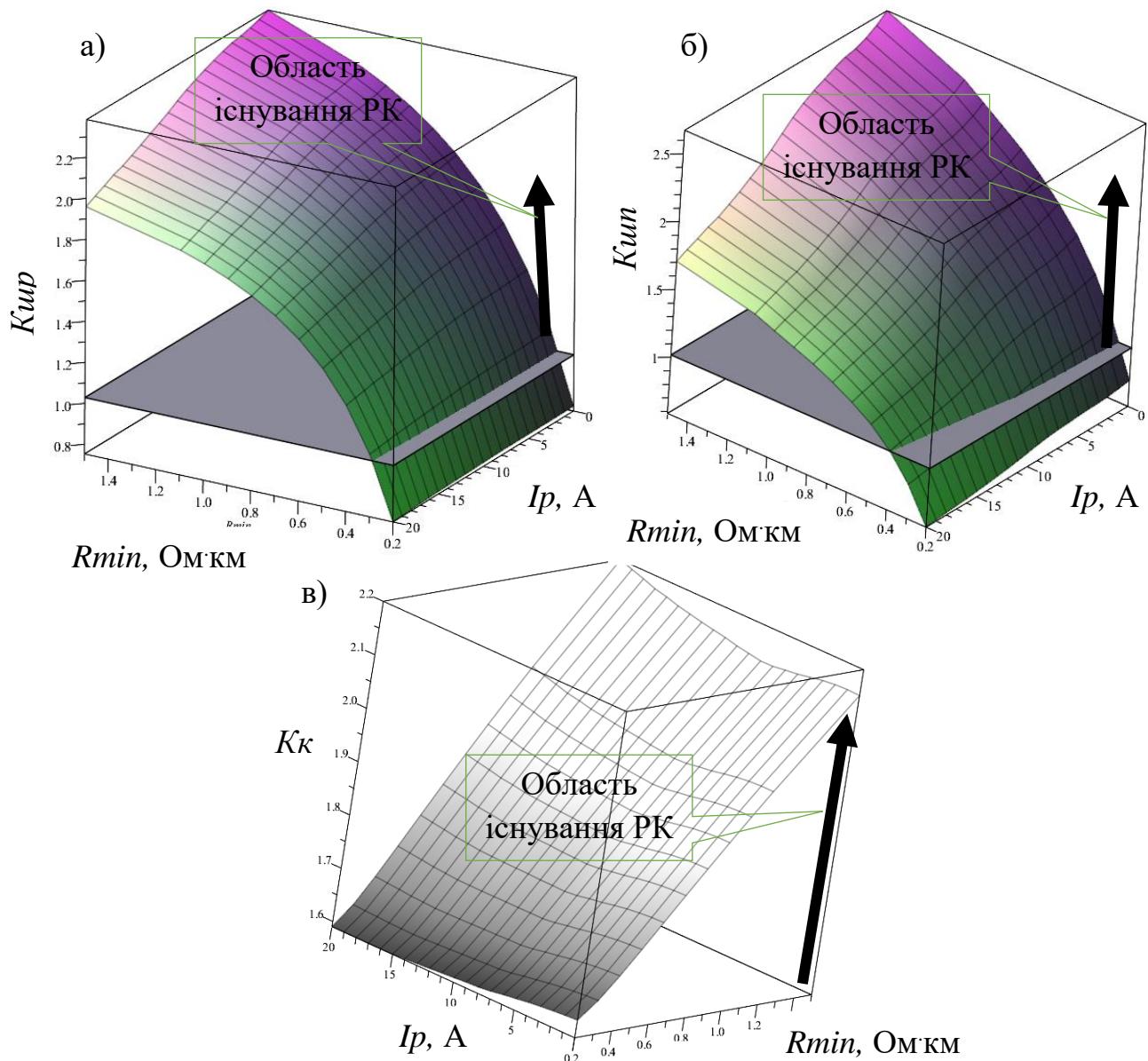


Рисунок 3.25 – Основні коефіцієнти режимів роботи РК

На рис. 3.25 показано значення основних характеристик, які визначаються основними режимами роботи: а) – коефіцієнт шунтової чутливості на релейному кінці; б) – коефіцієнт шунтової чутливості на живлячому кінці; в) – коефіцієнт чутливості до зламаної рейки та область існування кодового РК.

На відміну від фазочутливих РК кодове РК має більшу кількість ступенів свободи в області існування РК. Обмеження вносить струм ПЧ, що відповідно, пов'язано з потужністю ПЧ, а також опір ізоляції баласту при виконанні

шунтового режиму $0,4 \text{ Ом} \cdot \text{км}$. Потрібно зауважити, що значення опору баласту менше норми, що вимагає профілактичних робіт з підняття опору ізоляції – чистки, просіву і т.п.

3.9 Висновки за розділом 3

Було розроблена математична модель, що описує електромагнітні процеси в осерді ДТ-1-150 в лінійному та нелінійному режимах роботи, та може застосовуватися для розрахунку будь-якої феромагнітної системи.

Розроблене схемне рішення для отримання сімейства граничних петель при підмагнічуванні постійним струмом по робочий обмотці магнітної системи ДТ-1-150.

Внаслідок проведених розрахунків було отримано:

1. Раціональну функцію основної кривої намагнічування з мінімальним відсотком відхилення від експериментальних даних, за критерієм методу найменших медіан; функції, що описують петлю гістерезису; здійснено оцінку адекватності функції за критерієм Пірсона на 10% рівні значності; отримано граничну точку індуктивностей при підмагнічуванні;

2. Сімейство коефіцієнтів чотириполюсника схеми заміщення ДТ, з/без урахування постійного струму підмагнічування, які можуть використовуватися при розрахунку основних режимів роботи РК;

3. Розрахунок основних режимів роботи РК, нерозгалуженого фазочутливого та кодового, з урахуванням підмагнічування обох ДТ-1-150, внаслідок чого розширилась експлуатаційна область існування РК, що може дозволити внести зміни до регулювальних характеристик РК у подальшому.

4. З розрахунку основних режимів роботи РК які експлуатуються на ділянках електротяги змінного струму встановлено, що більш стійкою, до впливу перешкод постійного тягового струму, що супроводжується підмагнічуванням осердя дросель-трансформатор, є кодові РК.

5. Запропонований метод розрахунку РК підвищує точність розрахункових результатів у порівнянні з класичним методом, при цьому

різниця результатів в основному зумовлена врахуванням перехідних опорів з'єднань і опорів дросельних сталевих перемичок. Метод вимагає створення банку даних по динамічним петлям гістерезису і коефіцієнтів апроксимуючих функцій дросель-трансформаторів, що застосовуються в схемах РК, для різної інформаційної частоти сигналів. До переваг методу слід віднести досягнення більш високої достовірності розрахунків РК в великому діапазоні індукції сигналального струму з використанням ПГ феромагнетиків. Метод виключає експериментальні та аналітичні розрахунки коефіцієнтів чотириполюсників, адже вони табульовані і може знайти застосування в дослідженнях і розрахунках нових та існуючих РК систем СЦБ.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ПРИСТРОЇ СЦВ НА ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ДІЛЯНКАХ ЗМІННОГО СТРУМУ, ЩО ПРИМИКАЮТЬ ДО СТАНЦІЇ СТИКУВАННЯ

4.1 Напрямки вирішення проблеми

Вирішення проблеми забезпечення підвищення експлуатаційної надійності рейкових кіл в умовах впливу завад постійного зворотного тягового струму станції стикування, може бути здійснено декількома шляхами.

- **Перший** полягає у застосуванні дросель-трансформаторів, осередя яких містить повітряний зазор (ДТ-06-500С) [120]. Вони використовуються на станціях стикування і можуть витримувати високі рівні постійного струм, асиметрії, не насичуючись, а також працювати у лінійному режимі, забезпечуючи нормальну роботу РК. При цьому слід враховувати, що заміна дросель-трансформаторів навіть у коротких РК, на станціях призводить до значних витрат коштів. Це пояснюється тим, що тільки в одному нерозгалуженому РК потрібно замінити не менш двох дросель-трансформаторів, вартість яких на даний час є досить високою.
- **Другий** шлях вирішення проблеми забезпечення експлуатаційної надійності – це розробка логіко-функціонального пристрою на базі Мікро-ЕОМ, який би був спроможним оцінити причину відмови РК, яка не загрожує безпеці руху поїздів, а також збільшити час утримання якоря сигнального реле світлофора на час відключення його кола колійним приймачем внаслідок насичення дросель-трансформатора (порядку 5-8 с). За свою сутністю такий логічний пристрій є селектором часу, за допомогою якого забезпечується сповільнення на відпускання повторювача сигнального реле світлофора, або повторювача колійного приймача, ввімкненого в коло сигнального реле. Більш того, такий пристрій повинен вирішувати більш широкий клас задач з інформаційного забезпечення СЗАТ і підвищення безпеки руху в екстремальних поїзних ситуаціях. Разом з тим розробка такого пристрою не входила в завдання досліджень дисертаційної роботи.

- **Третій** шлях полягає у підключені зворотного тягового проводу ТП постійного струму на границі станції стикування та полігону електротяги змінного струму. Це потрібно здійснювати на підставі аналітичних розрахунків з метою зниження рівнів завад постійного тягового струму, які розповсюджуються вглиб ділянки електроди змінного струму.
- **Четвертий** шлях вирішення проблеми реалізується за допомогою технічного пристрою, що запобігає розтіканню зворотного постійного струму з рейкової мережі станції стикування в сторону полігону електротяги змінного струму. За допомогою такого пристрою також вирішується проблема захисту споруд, заземлених на рейки або прокладених уздовж колій, від електрокорозії. Варіант такого пристрою був випробуваний в експлуатаційних умовах при моделюванні найбільш складних режимів роботи тягової мережі і показав задовільні результати.

4.2 Захист рейкових кіл ділянок тяги змінного струму від заважаючого впливу тягових постійних струмів

Як показують наведені вище результати досліджень, в зонах станції стикування заважаючи впливи тягових постійних струмів на пристрой СЦБ ділянок електротяги змінного струму пов'язані з насиченням магнітної системи дросель-трансформаторів тяговим постійним струмом, що досягає значення до 50 А і більше на відстані 20-35 км від станції стикування.

Захист від такого впливу можна здійснити шляхом гальванічного поділу ділянок електротяги змінного струму, що знаходяться в зоні впливу тягових постійних струмів. З огляду на розмір зони розтікання завад постійного тягового струму і руху на ділянках електротяги змінного струму довгих рухомих одиниць, пропонується обладнати силовими захисними комутуючими блоками (СЗКБ), функціональна схема пристроя наведена на рис. 4.1, дросельні пункти (ДП) на кордоні станції стикування і ділянки тяги змінного струму, в перегінних РК на відстані не менше двох блок-ділянок (БД) від станції стикування (рис. 4.3).

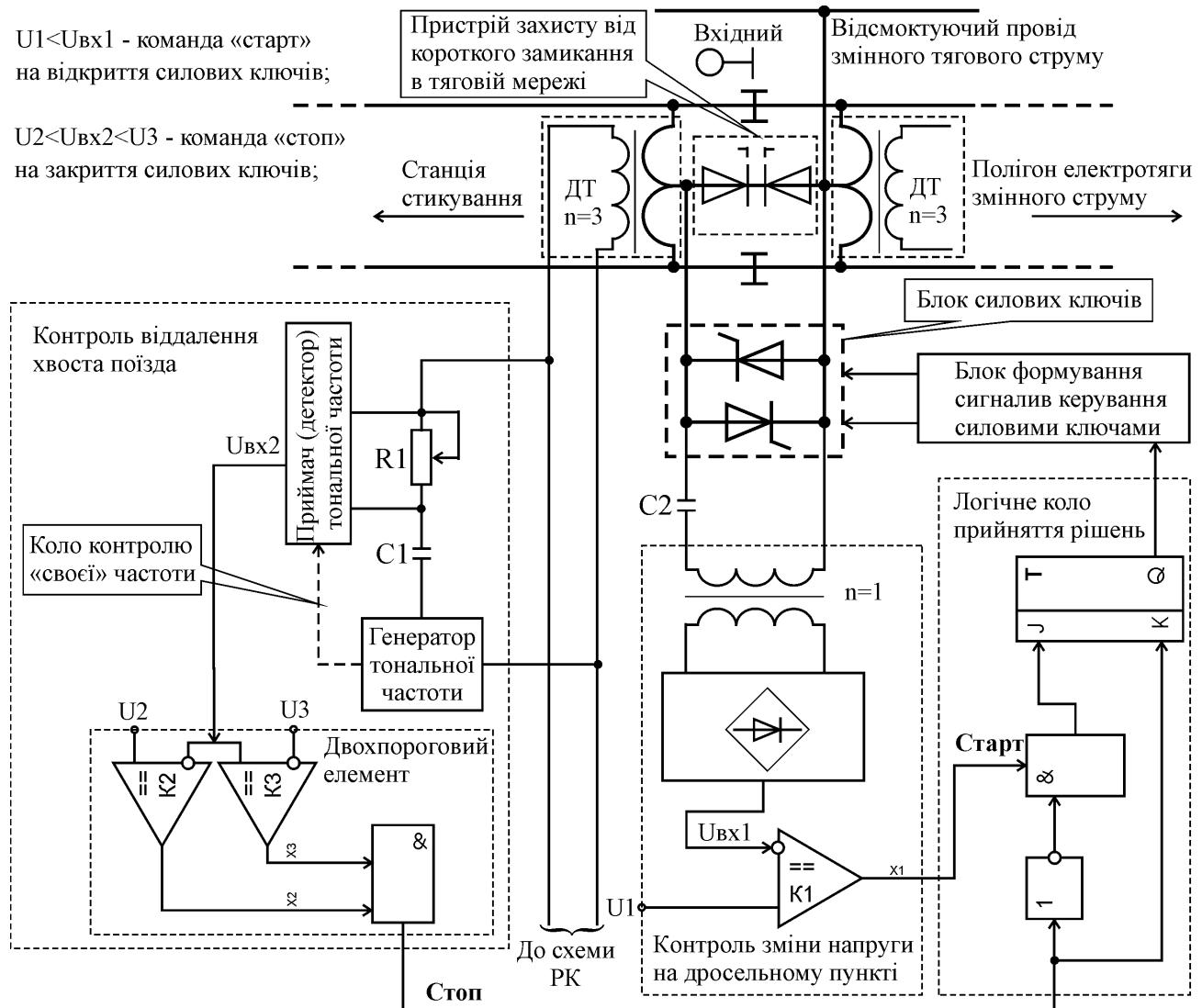


Рисунок 4.1 – Функціональна електрична схема пристроя захисту

СЗКБ (рис.4.1), виконаний на основі силових напівпровідникових керованих ключів. Вибір параметрів (струм і напруга) ключових елементів силового кола здійснюються з урахуванням можливих значень тягових струмів ліній змінного тягового струму і напруги та струмів на ізоляючих стиках при коротких замиканнях ліній постійного тягового струму. Розрахунки та дослідження (розділ 1, 2) [35, 38, 102, 105] показують, що орієнтовні значення класифікаційних струмів і напруги ключів СЗКБ складають 500 А і 600 В.

З метою обмеження величин напруги на ізоляючих стиках при коротких замиканнях на ділянках електротяги змінного струму між середніми точками дросель-трансформаторів зустрічно-послідовно вмикаються два лавинних діода.

СЗКБ функціонує в залежності від поїзної ситуації на ділянках тяги змінного струму і рівня заважаючого впливу постійних тягових струмів. За відсутності поїздів на блок-ділянках тяги змінного струму, прилеглих до станції стикування, СЗКБ розривають кола перемичок, що з'єднують середні точки ДТ (закритий стан СЗКБ) ДП станції стикування з боку ділянок тяги змінного струму і віддаленого від цього ДП на відстань не менше двох БД перегінного ДП на ділянці тяги змінного струму. У разі знаходження на цих БД поїзда СЗКБ ДП замикає ланцюг перемички двох ДТ (відкритий стан СЗКБ), забезпечуючи протікання в рейкових колах тягового змінного струму.

При відправленні поїзда від станції стикування в сторону ділянок тяги змінного струму СЗКБ станції стикування відкритий, а СЗКБ перегінного ДП закривається, розриваючи кола заважаючих струмів, чим виключається насичення магнітної системи ДТ і усувається можливість появи помилкових сигналів станційних світлофорів.

Для реалізації описаного алгоритму СЗКБ укомплектовуються схемами керування (рис. 4.1) та контролю.

4.3 Схема керування СЗКБ дросельного пункту

Запропонований пристрій захисту РК ділянок (рис. 4.1) [87, 88,] тяги змінного струму від впливу зворотного постійного струму складається з робочої обмотки дросель-трансформатора, у середню точку якої зустрічно ввімкнені лавинні діоди (пристрій захисту від КЗ в тяговій мережі) та відсмоктуючий провід тягового змінного струму. Паралельно лавинним діодам ввімкнений блок силових ключів, який через блокуючий конденсатор присуднаний до погоджуючого трансформатора (гальванічна розв'язка), вхідна обмотка якого підключена на вхід випрямляча. На інверсний вхід компаратора K1 підключається випрямляч, на прямий вхід которого подана напруга заданого рівня U1. Вихід (X1) першого компаратора присуднано на один вхід першого логічного елементу «I», другий вхід якого підключено до виходу інвертора. Вихід першого логічного елементу «I» подано на вхід «J» JK-тригера, своїм

виходом Q приєднаного до входу схеми формування сигналів керування силовими ключами, вихід якої з'єднано з входом блоку силових ключів. Вхід інвертора приєднано до входу «K» JK-тригера та до виходу другого логічного елемента «I» схеми контролю віддалення хвоста поїзда, один вхід якого X2 підключено до входу другого компаратора K2, на прямий вхід якого подається напруга U2 – верхнього рівня спрацювання компаратора. На інверсний вхід K2 подається напруга з виходу приймача (детектора) тональної частоти і надходить на прямий вхід третього компаратора K3. На інверсний вхід K3 підключена напруга U3 – нижнього рівня спрацювання компаратора. Вихід X3 третього компаратора K3 приєднано до іншого входу другого логічного елементу «I». Перший вихід генератора (детектора) тональної частоти підключено до первого входи приймача (детектора) тональної частоти, два інших входу якого з'єднано з регулюючим резистором. Один вивід через розв'язуючий конденсатор підключено до другого вихіду генератора тональної частоти, третій вихід якого під'єднано до одного виводу сигнальної обмотки ДТ. До другого виводу цієї обмотки підключено інший вивід резистора, яким регулюється напруга на K2 та K3. В даному випадку РК, до якого підключено апаратуру детектора тональної частоти, працює в нормальному режимі, оскільки в ньому організовано два канали струму різної частоти і РК має приймач, налаштований на особисту частоту сигнального струму 25 Гц. Зворотний зв'язок генератора і приймача тональної частоти необхідний для виключення впливу частоти сигнального струму на нормальну роботу схеми контролю відалення хвоста поїзда. Представимо описане вище узагальненим алгоритмом роботи СЗКБ (рис. 4.2).

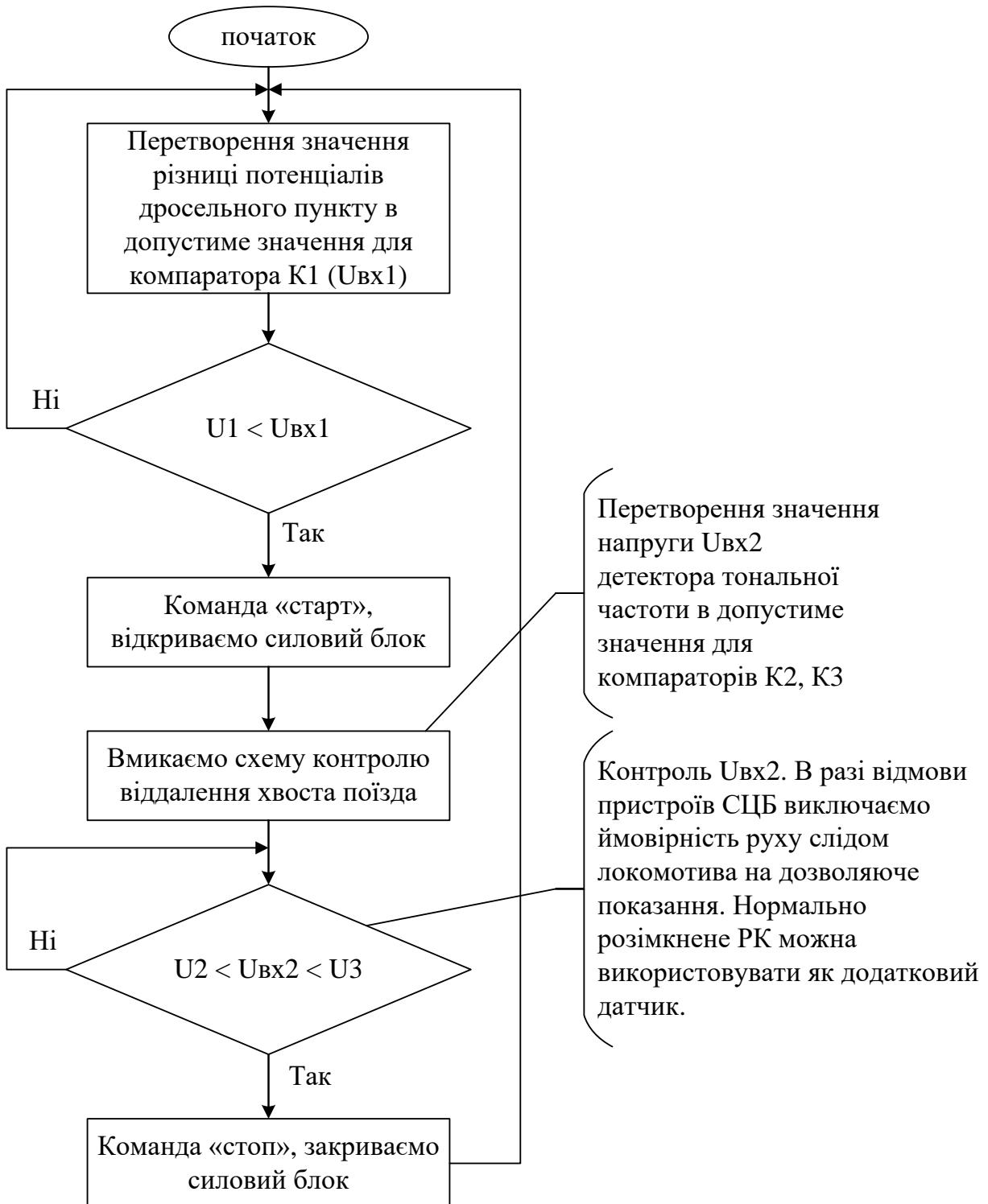


Рисунок 4.2 – Алгоритм роботи СЗКБ

Експериментальними дослiдженнями встановлено, що при вiдключеннi ТП постiйного струму станцiї стикування та переходi на живлення контактної мережi вiд лiнiйних тягових пiдстанцiй, рiзко (до трьох разiв) зростають потенцiали «рейка-земля» та струму витоку зворотного струму у напрямку колiй дiлянок тяги змiнного струму, що проникають до станцiї стикування. Цi

обставини, а також в деяких випадках асиметрія, призводять до підмагнічування осердя колійних ДТ, внаслідок чого виникають відмови апаратури РК та перекриття світлофорів. Крім того, як зазначалося постійна складова поширюється на значні відстані (більш 30 км), що призводить до електричної корозії опор контактної мережі, металевих елементів верхньої будови колії та рейок. З метою виключення цих явищ використовуються СЗКБ – 4 (рис.4.3), що містять зустрічно-паралельно з'єднані тиристори або IGBT – транзистори. Ці блоки (рис. 4.3) встановлюються, починаючи з кордону станції стикування у бік ділянок тяги змінного струму на відстані не менше трьох (четирьох) блок-ділянок. Таке встановлення потрібне для виключення проникнення зворотного постійного струму на перегін при слідуванні довгих рухомих одиниць.

При відсутності електропоїзда на ділянці наближення до станції стикування всі СЗКБ закриті, що запобігає протіканню зворотного постійного струму у бік перегону.

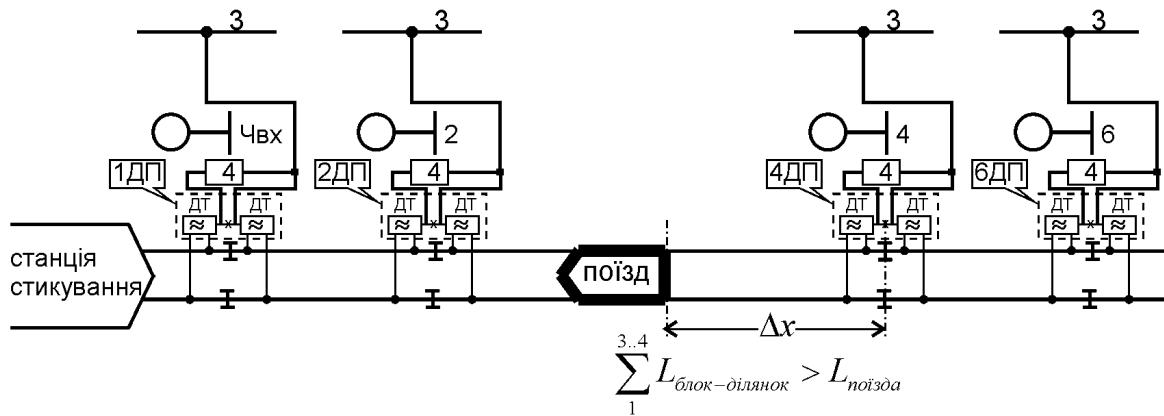


Рисунок 4.3 – Розташування СЗКБ на ділянці
електротяги змінного струму

При наближенні поїзда, наприклад, до світлофору 2 (рис. 4.3), на певну відстань (x) потенціал $U(x)$ між середніми точками ДТ дросельного пункту 2ДП та силовому блоку 4, зростає, внаслідок чого на виході випрямляча рівень напруги U_{bx1} досягає порогу відкриття $U_1 K_1$ (рис. 4.2), на виході якого створюється високий потенціал, що відкриває перший логічний елемент «I». В результаті на вхід J JK-тригера подається сигнал, змінюючий його стан, а з

виходу Q високий потенціал надходить на вход схеми керування силовими ключами СЗКБ. Блок силових ключів 4 переходить у відкритий стан, забезпечуючи, тим самим, пропуск до РК світлофора 2 зворотного змінного тягового струму. Потрібно зауважити, у цього струму завжди є шлях протікання по відсмоктуочному проводу 3 (рис. 4.3).

При вступі потягу на РК світлофора 2 потенціал між середніми точками ДТ дросельного пункту 2ДП знижується ($U_{BX1} < U_1$) (рис. 4.4), а на вході приймача (детектора) тональної частоти – різко зростає ($U_{BX2} > U_2$), внаслідок чого цим потенціалом відкривається другий компаратор K2, але логічний елемент «I» залишається у нульовому стані, команда «стоп» на JK-тригер не надійде і він зберігатиме одиничний стан, продовжуючи подавати сигнал на відкриття 4 СЗКБ.

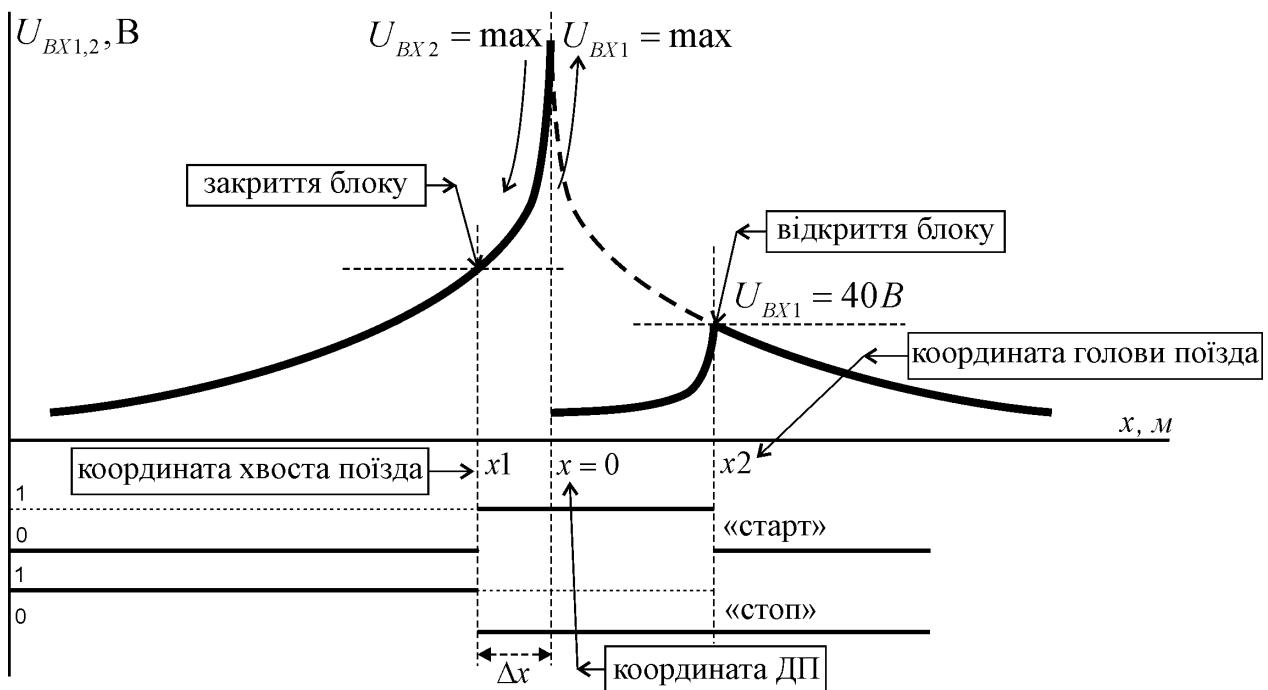


Рисунок 4.4 – Зміна рівня потенціалу на дросельному пункті

З віддаленням хвоста поїзда від дросельного пункту 4ДП (його блок і блок СЗКБ пункту 2ДП були відкриті) напруга на приймачі (детекторі) тональної частоти поступово знижується, спрямовуючись до значення $U_2 < U_{BX2} < U_3$. В цьому випадку обидва компаратора K2, K3, а також другий логічний елемент «I», перейдуть в одиничний стан. Це призведе до зміни стану

інвертора і потенціалу на вході «К» JK-тригера, наслідок чого до переходу цього тригера в початковий (нульовий) стан і, в кінцевому в результаті, до закриття блоку СЗКБ і припиненню протікання через середні точки зворотних постійного та змінного тягових струмів. Два компаратори виключають помилкове спрацьування логічного елемента «І» – подачі команди «стоп» при різного роду впливу сторонніх чинників на апаратуру РК, а також при попутно слідуючих локомотивах для збереження відкритого стану силових ключів.

При такому використані незалежних СЗКБ виключається вірогідність проникнення тягового струму в пристрой залізничної автоматики за відсутності з'єднувальних кіл з апаратурою СЦБ.

4.4 Розрахунок схеми контролю віддалення хвоста поїзда

В якості елементної бази схеми контролю віддалення хвоста поїзда, частково використана апаратура та принципи побудови ТРК 3, налаштованої на тональну частоту 780 Гц [67, 121], де у приймачі використовується аналоговий детектор рівня напруги та поєднання живильного з релейним кінцями (гіркові нормально розімкнуті РК).

Представимо схему контролю видалення хвоста як окремий елемент у вигляді чотириполюсників (рис. 4.5) [9, 14, 63], де коефіцієнти чотириполюсників рейкової лінії залежать від зміни значення x – довжини утвореної рейкової лінії.

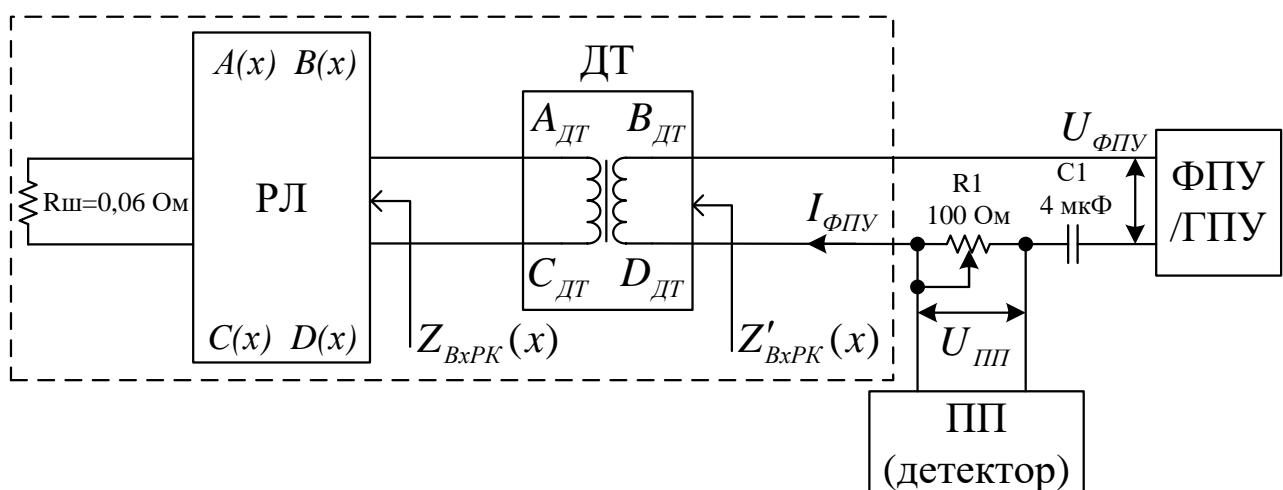


Рисунок 4.5 – Схема заміщення контролю віддалення хвоста поїзда

Нехай напруга на колійному приймачі приймає максимальне значення $U_{ПП} = 4,5$ В, що свідчить про коротке замикання дросельних перемичок чи колісна пара ($R_{ш} = 0,06$ Ом) на живильному кінці. При $x = 0$ м, згідно закону Ома отримаємо $I_{ФПУ} = 0,045$ А. В результаті нескладних обчислень отримаємо напругу живлення $U_{ФПУ} = 20,6$ В.

Розрахуємо значення зміни напруги $U_{ПП}$ при опорі 0,8 Ом·км, в залежності від зміни координати хвоста поїзда x (рис. 4.6).

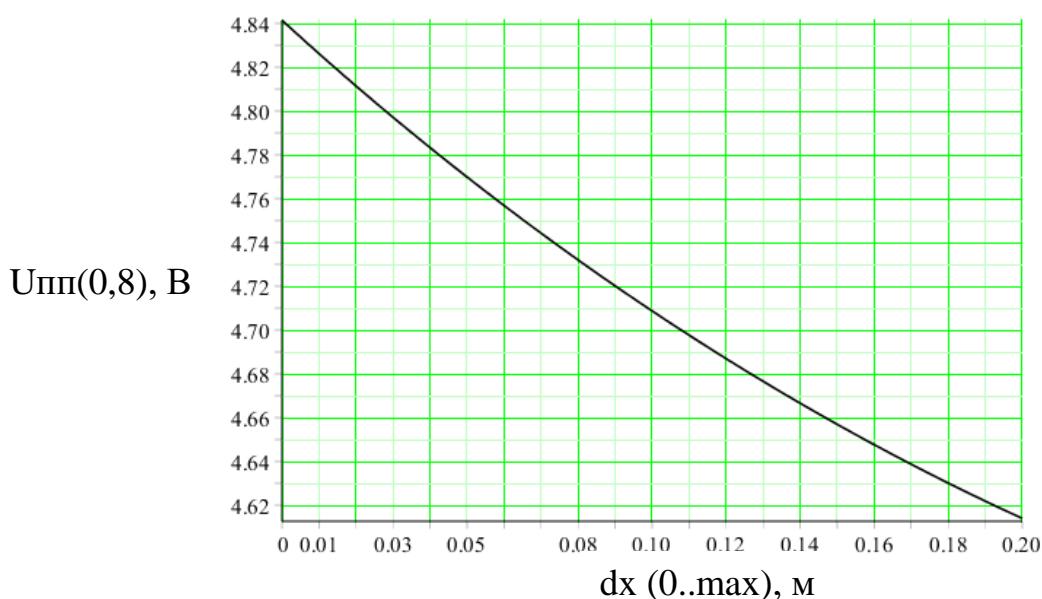


Рисунок 4.6 – Зміна напруги $U_{ПП}$ на вході детектора при віддалені поїзда

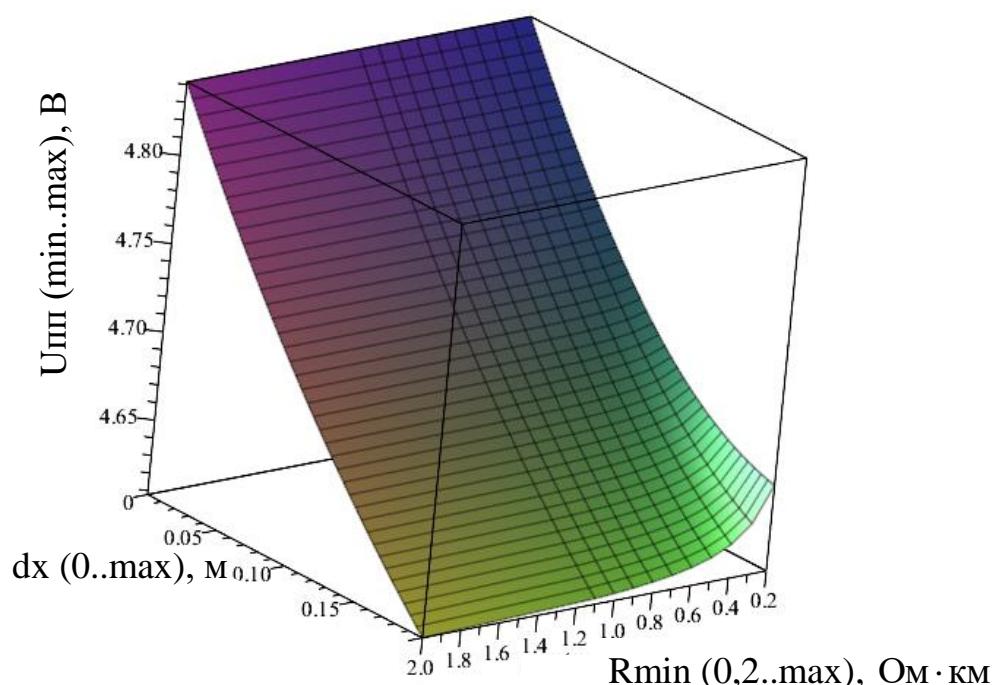


Рисунок 4.7 – Зміни напруги U_{III} на вході детектора при віддалені хвоста поїзда та зміні опору баласту

Величина x змінювалася від 0 до 200 м, з урахуванням зміни баласту від 0,2 до 1,5 Ом·км. На рис. 4.7 наведена залежність зміни напруги на детекторі тональної частоти від довжини рейкової лінії та опору баласту. Для коректної роботи схеми контролю віддалення поїзду необхідно закласти рівні області спрацювання компараторів K2 і K3 $U_2 = 4,5$ В та $U_3 = 4,65$ В.

4.1 Експериментальні випробування прототипу захисного комутуючого блоку

В ході досліджень був випробуваний варіант СЗКБ (рис. 4.8), побудованого на силових тиристорах VD1 і VD2. СЗКБ був встановлений на ДП (рис. 4.8, а) біля вхідного парного світлофора на станцію «П'ятихатки – стикова» (зворотний тяговий провід, підключений до середньої точки ДП знаходиться з боку перегону змінного тягового струму).

а)

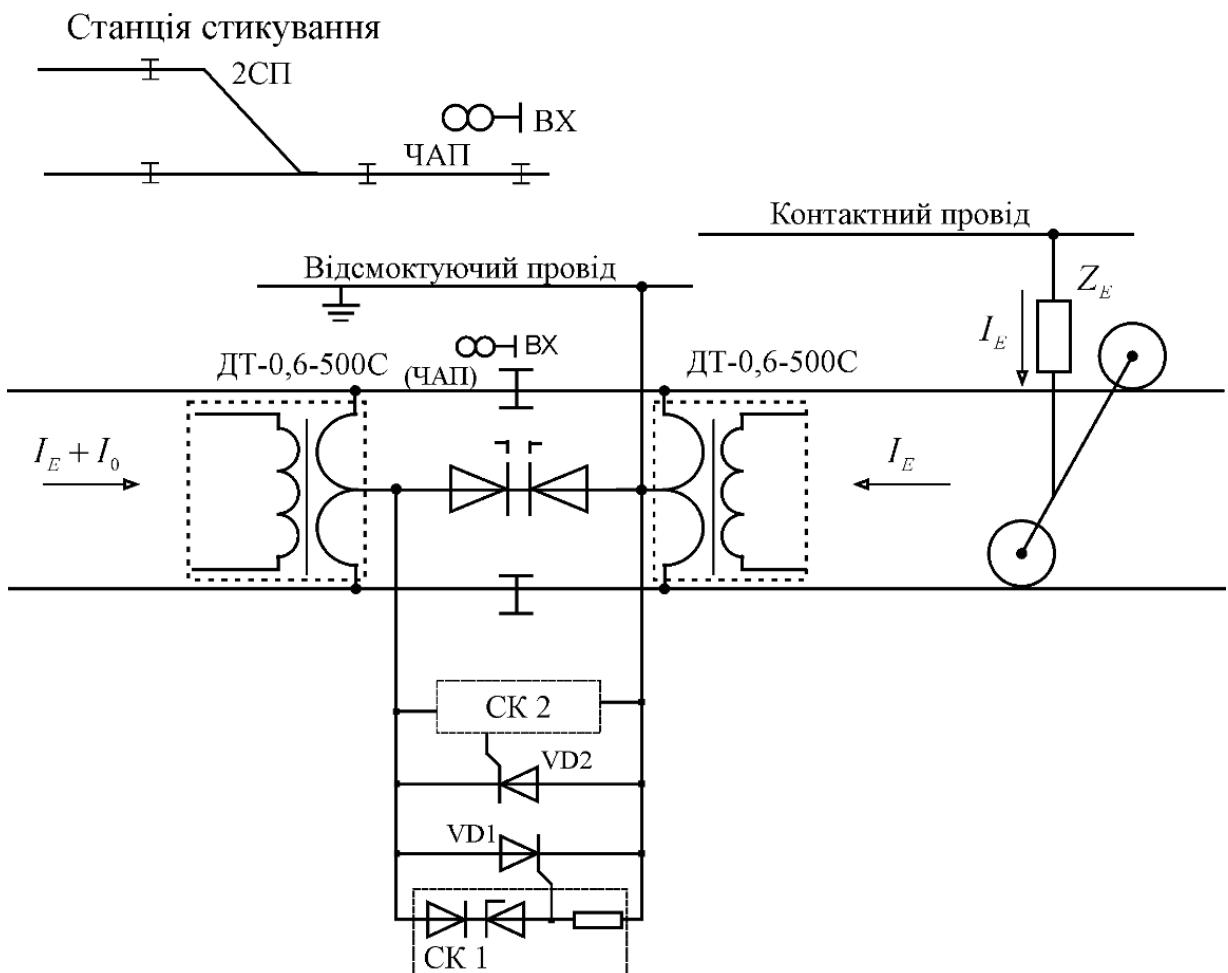


Рисунок 4.8 – Експериментальна схема прототипу СЗКБ (а).

Продовження на с. 122

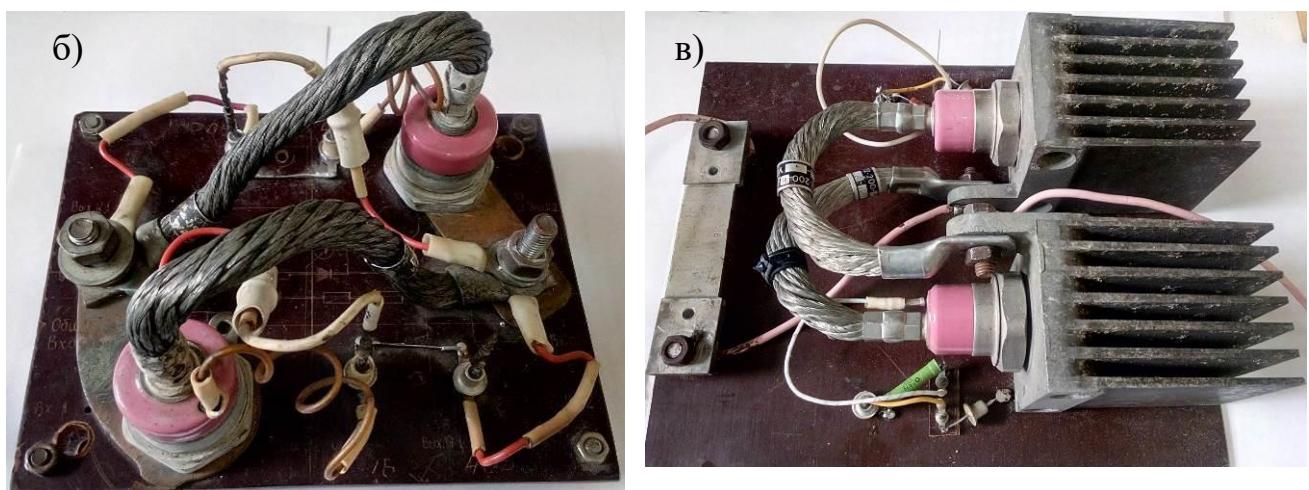


Рисунок 4.8 – Продовження. Варіанти прототипів СЗКБ (б), (в)

У СЗКБ є схема керування (СК), зібрана на резисторі, стабілітроні і діод.

Схема керування відрегульована на поріг спрацьовування 40 В. Таким чином СЗКБ гальванічно розділив полігон електротяги змінного струму від станції стикування «П'ятихатки – стикова».

Випробуваннями СЗКБ встановлено:

- За відсутності поїзда СЗКБ закривається, перешкоджаючи виходу постійного тягового струму в бік полігону електротяги змінного струму. Як показано на рис. 4.9 – рис. 4.11, струм, що виноситься в сторону електротяги змінного струму, прагне до мінімуму, а потенціал на СЗКБ до рівня 40 В.

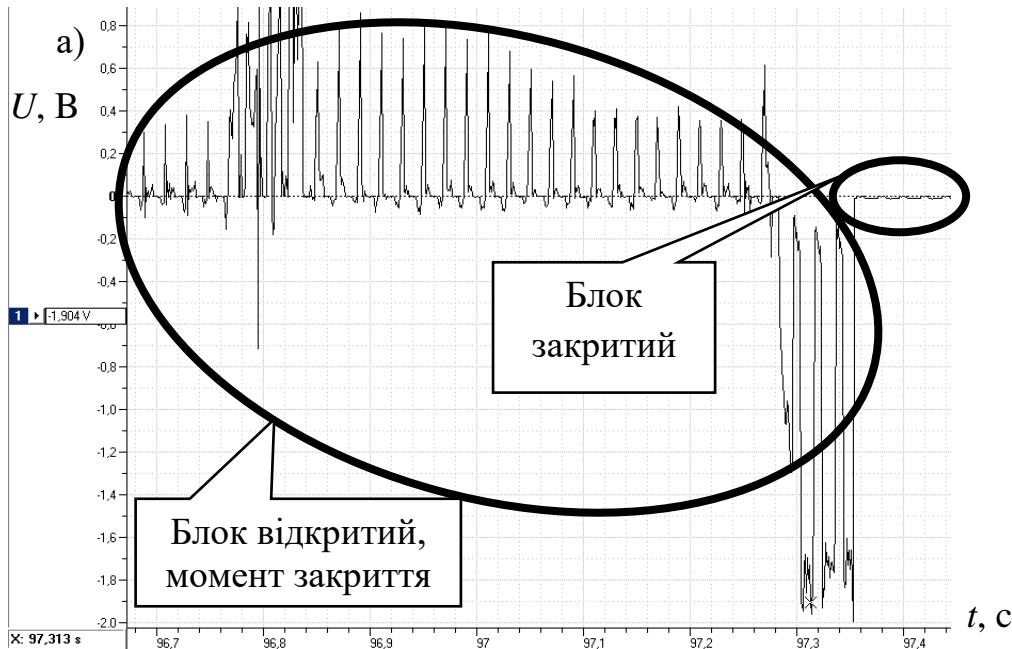


Рисунок 4.9 –Форма тягового струму (а). Продовження на с. 123

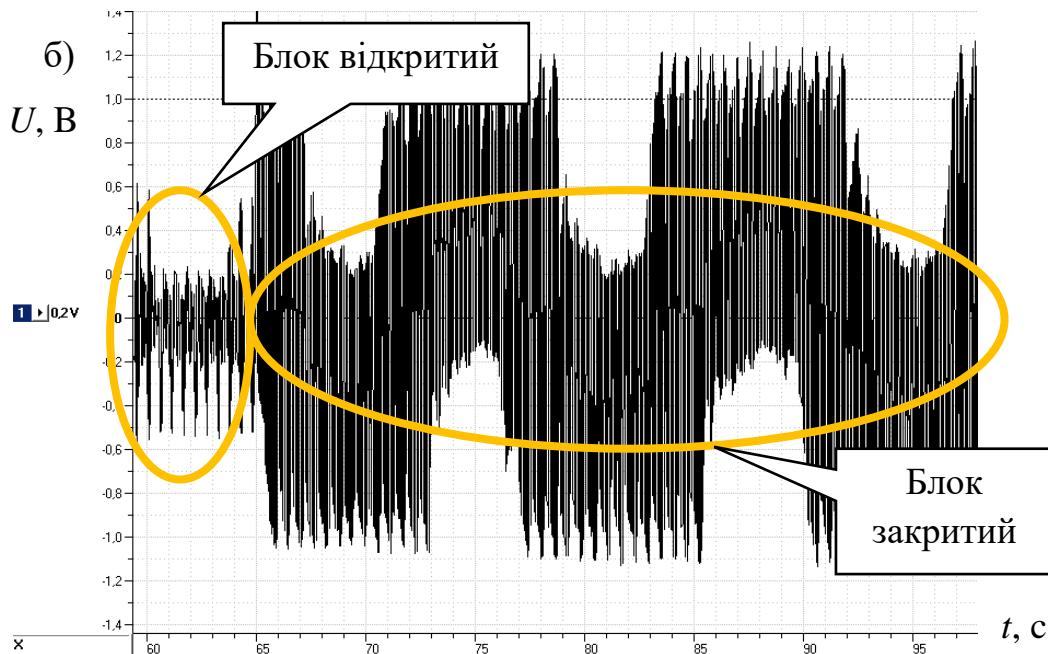


Рисунок 4.9 – Продовження. Форма потенціалу (б) на СЗКБ

- У момент наближення поїзда до ДП потенціал на СЗКБ зростає до порогу спрацьовування (як показали випробування за 200 м від ДП з боку

електротяги змінного струму) та, при досягненні порогу відкриття СЗКБ відкривається (рис. 4.9, рис. 4.10). У цей момент потенціал на СЗКБ наближається до мінімуму, а струм приймає своє робоче значення (рис. 4.11).

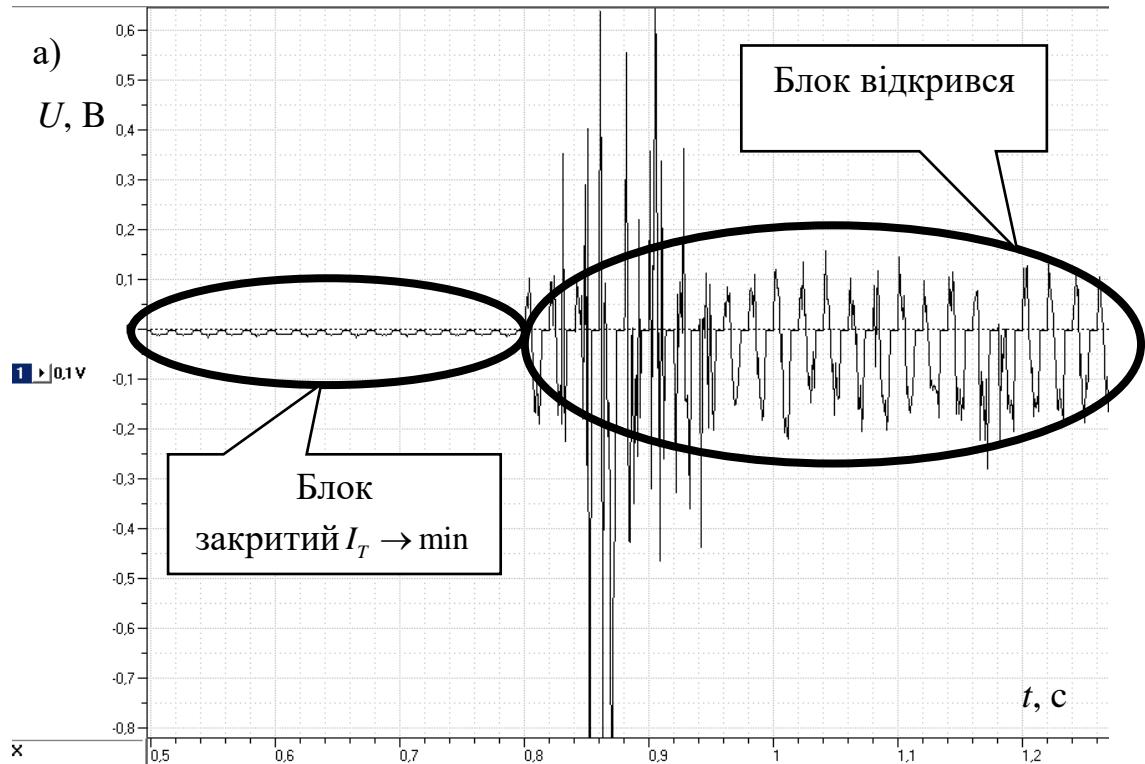


Рисунок 4.10 – Форма змішаного тягового струму (а). Продовження на с. 124

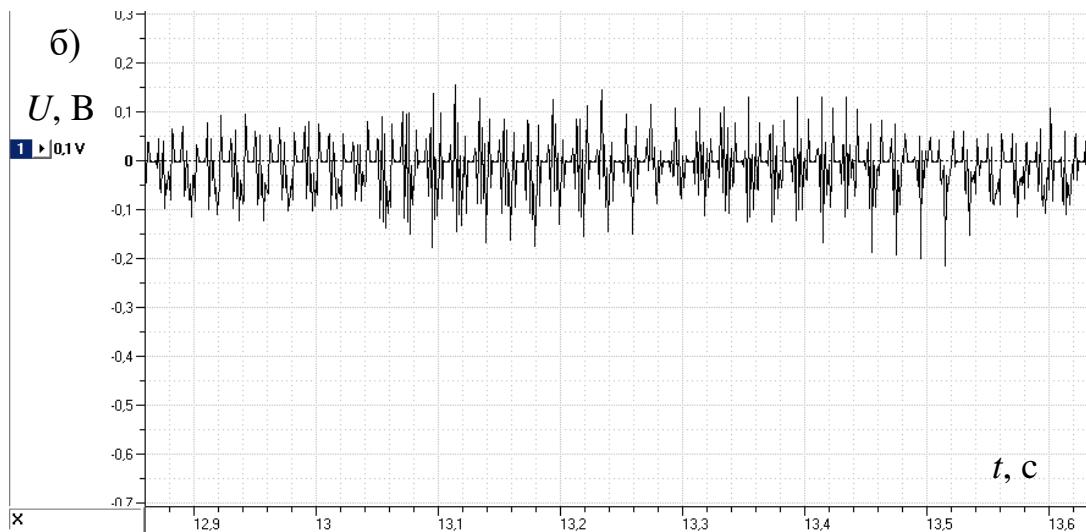


Рисунок 4.10 – Продовження. Форма потенціалу (б) на відкритому СЗКБ

U , В

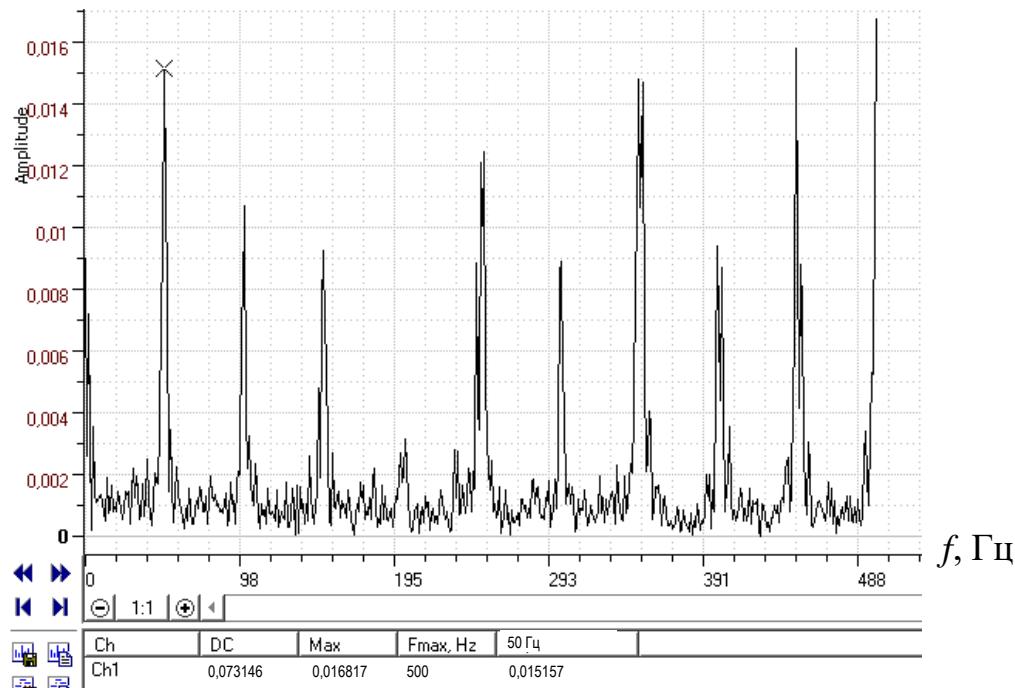


Рисунок 4.11 – Форма спектру тягового струму через відкритий СЗКБ

3. З віддаленням електровоза поїзда від ДП на відстань приблизно (в залежності від опору ізоляції і розрахункової координати) 30 м СЗКБ закривається (рис. 4.11) і заважає протіканню постійного тягового струму витоку.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що в деяких випадках блок залишався не повністю закритим, внаслідок некоректної роботи кола керування керуючим електродом тиристора – невідповідність характеристик елементів та різних значень напружень в плечах. Це призводило до проникнення вмішаного струму з перевагою парних гармонік (рис. 4.12, рис. 4.13). При чому порушується термальний режим роботи силових ключів. Дефект схеми був, усунутий шляхом використання схеми керування, що задає нормальну напругу для відкриття і закриття силових ключів.

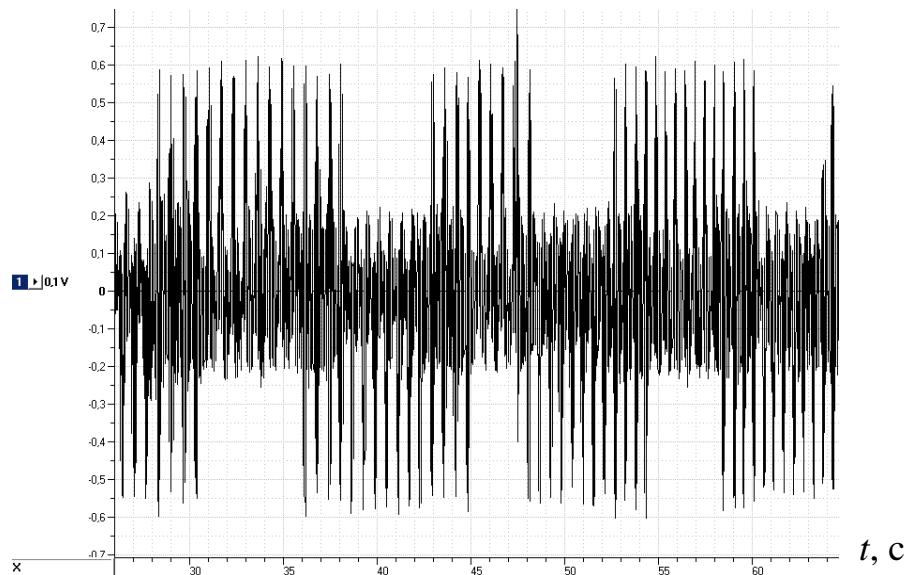


Рисунок 4.12 – Форма потенціалу на не повністю відкритому СЗКБ

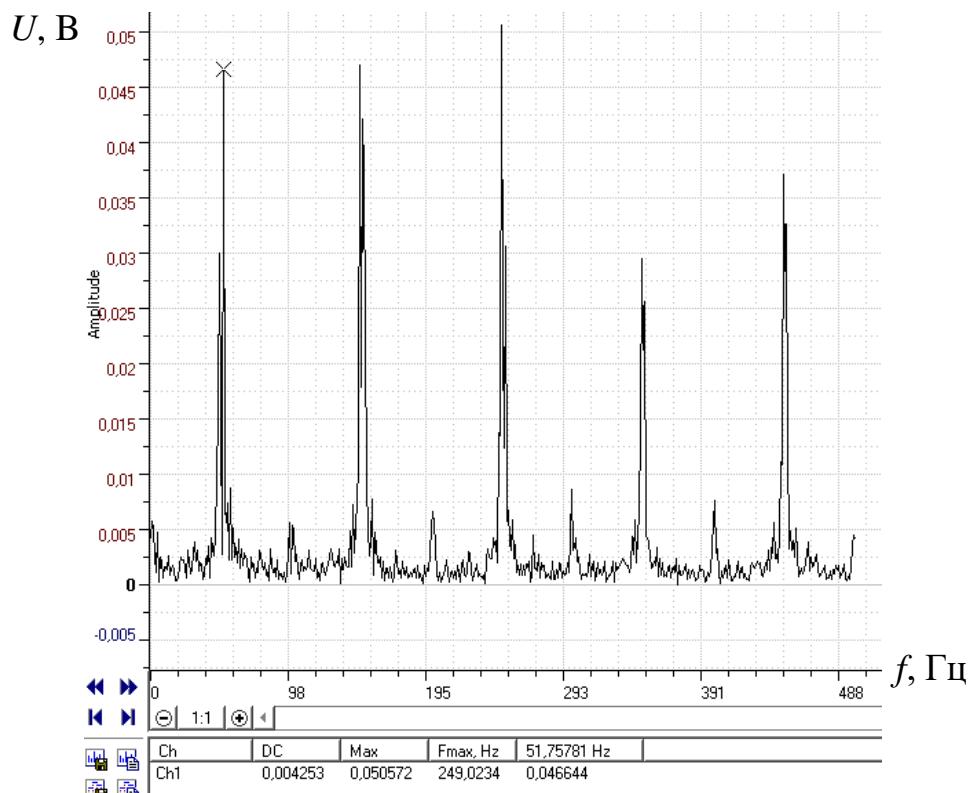


Рисунок 4.13 – Форма спектру струму, що протікає через неповністю відкритому СЗКБ

4.5 Зміна координати підключення зворотного проводу тягові підстанції постійного струму

Для зменшення рівнів завад постійного тягового струму, які поширяються вглиб, прилеглої до станції стикування, ділянки електротягу

змінного струму та полегшити режими роботи силових ключів СЗКБ, запропоновано відшукати раціональні точки (координати) підключення ТП постійного струму.

Розроблена математична модель (2.1, 2.2) розподілу постійного тягового струму та потенціалу «рейка-земля» (розділ 2) дозволила проаналізувати поширення завади постійного тягового струму вглиб перегону змінного струму, який примикає до станції стикування, при зміні координати підключення зворотного проводу тягової підстанції постійного струму. Додавши до моделі алгоритм пошуку мінімальних значень в розрахунковій зоні, було отримано оптимальну схему розміщення точок підключення ТП. Мінімальний рівень виносу постійного тягово струму у рейкову мережу перегону змінного тягового струму при підключені ТП приведено на рис. 4.14

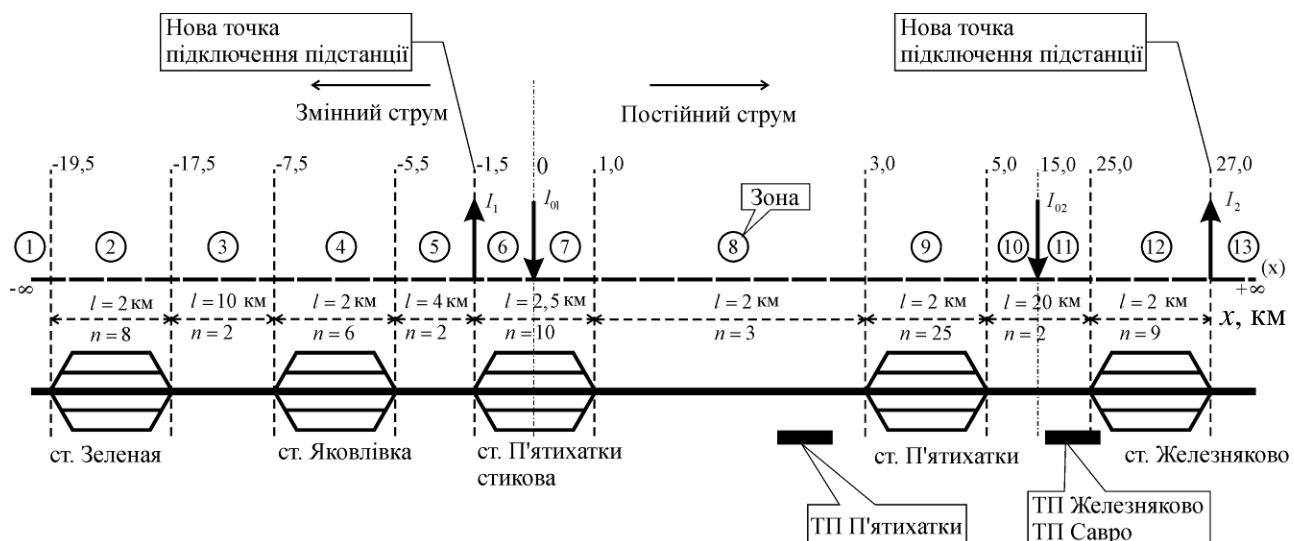


Рисунок 4.14 – Розрахункова схема нормального режиму роботи ТП при зміні координати підключення зворотного проводу

В результаті були отримані епюри нових значень потенціалу «рейка-земля» та постійного тягового струму (рис. 4.15). Для проведення дослідження інтерес представляє ділянка від 0 до $-\infty$, так як вона є полігоном електротяги змінного струму, що примикає до станції стикування, і необхідна для оцінки рівнів постійних струмів і потенціалів, які виносяться зі станції стикування. Було збільшено область від 0 до $-\infty$ і представлено її у тривимірному вигляді (рис. 4.16).

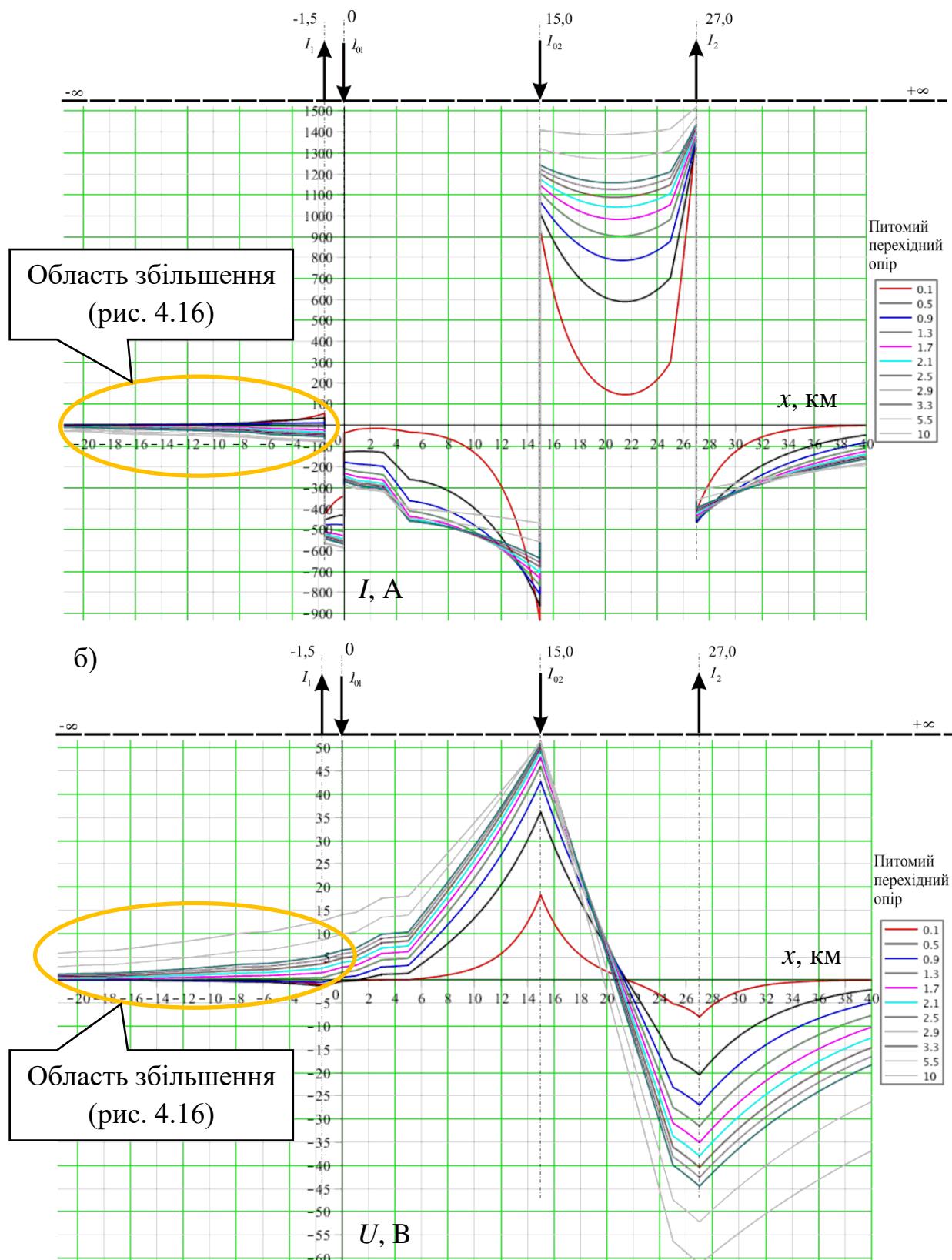


Рисунок 4.15 – Розподіл тягового струму (а) та потенціалу (б) в нормальному режимі роботи ТП

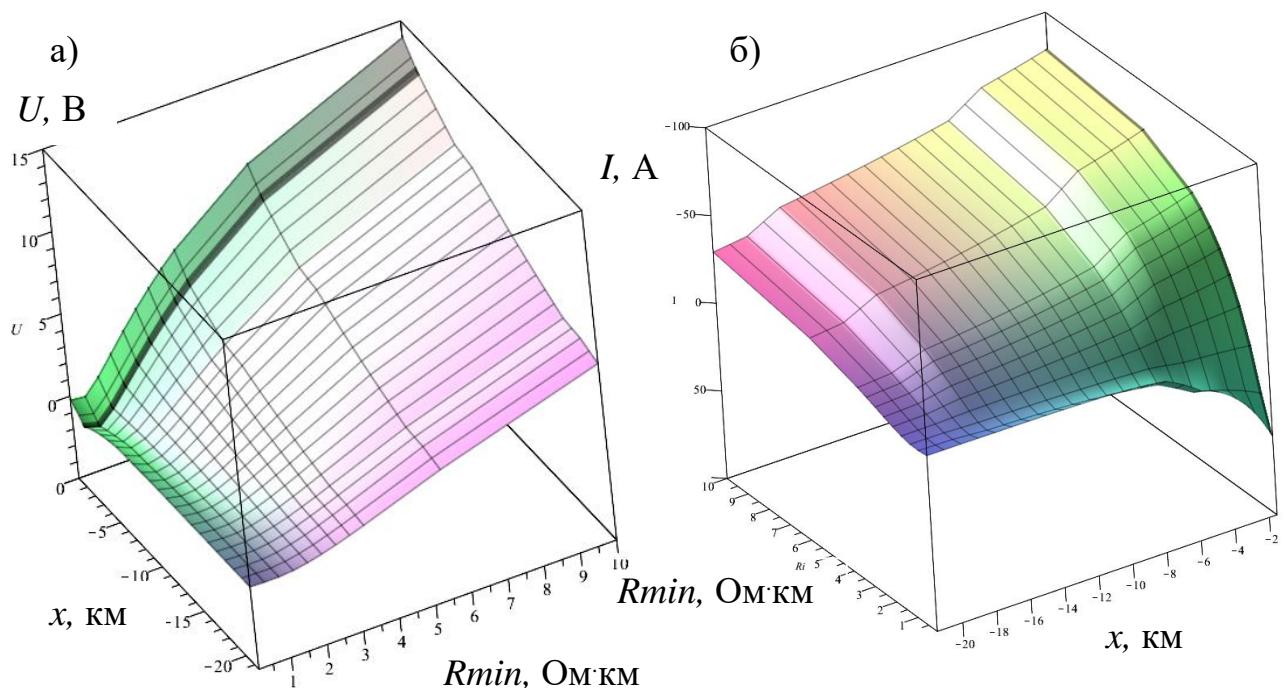


Рисунок 4.16 – Розподіл потенціалу (а) та струму (б)
в нормальному режимі (від 0 до $-\infty$)

Як можна побачити на рис. 4.16 постійний тяговий струм, що розповсюджується в бік перегону електротяги змінного струму знизився в декілька разів у порівнянні з існуючим підключенням ТП (рис. 2.2, рис. 2.5, рис. 2.6, рис. 2.9).

Додавши до моделі алгоритми врахування норм проектування систем залізничного електропостачання, її можна використовувати при проектуванні тягової мережі станції стикування та інших ділянок. Також отриману модель можливо адаптувати під будь-яку ділянку чи рід струму.

4.6 Висновки за розділом 4

1. При проведенні експериментальних випробувань пристрою захисту встановлено, що при відповідній схемі керування силовими ключами повністю блокується розповсюдження постійного тягового струму в бік полігону електротяги змінного струму.

2. При русі рухомої одиниці на ділянки електротяги змінного струму для виключення розтікання завади постійного тягового струму внаслідок відкриття захисного блоку запропоновано встановити додаткові блоки, які по

хвосту рухомої одиниці будуть блокувати подальше розповсюдження завади. Запропоновано встановлювати 2 – 4 блоки в залежності від довжини блок-ділянок.

3. При використанні та розташуванні декількох розроблених пристрій захисту по ділянці електротяги змінного струму (наприклад, як на рис. 4.3), що примикає до станції стикування, знадобиться використовувати дросель-трансформатори типу ДТ-0,6-500С в РК, лише на тих дросельних пунктах де будуть встановлені СЗКБ, – максимум потрібно 6 додаткових ДТ-0,6-500С, це в декілька разів менше ніж обладнання ділянки довжиною 10 км, на інших дросельних пунктах, вглиб ділянки змінного струму, застосовуються дросель-трансформатори типу ДТ-1-150 (300).

4. Удосконалено алгоритм математичної моделі розповсюдження постійного тягового струму та потенціалу «рейка-земля» для розрахунку мінімального значення витоку постійного тягового струму на ділянку електротяги змінного струму внаслідок зміни координати підключення зворотного проводу ТП, що дозволить використовувати її при проектуванні нових чи реконструкції існуючих ділянок станції стикування.

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ РЕЙКОВИХ КІЛ ДІЛЯНКИ ЕЛЕКТРОТЯГИ ЗМІННОГО СТРУМУ, ЯКА ПРИМИКАЄ ДО СТАНЦІЇ СТИКУВАННЯ ДВОХ РОДІВ ТЯГОВОГО СТРУМУ

Основною задачею залізничного транспорту є якісне і повне забезпечення потреб народного господарства і населення в перевезеннях пасажирів та вантажу. Задачею служби сигналізації та зв'язку є підвищення економічної ефективності роботи залізниці та, головне, забезпечення безпеки руху поїздів [21, 121].

Впровадження СЗКБ для захисту рейкових кіл від впливу завад тягової мережі станції стикування дозволить знизити кількість відмов РК та підвищити їх експлуатаційну надійність, що в кінцевому результаті дозволить підвищити безпеку руху [38, 87, 88, 104].

Дослідження статистики відмов рейкових кіл по Одесській залізниці показали, що в середньому за рік спостерігається 58 відмов РК, на ділянці поблизу станції стикування, внаслідок насичення магнітопроводу дросель-трансформатора.

Відмови пристройів СЦБ бувають небезпечні та захищенні. Виникнення небезпечних відмов є неприпустимим внаслідок зниження загальної безпеки руху поїздів. Тому для розрахунків вважатимемо, що РК на залізниці дають тільки захищенні відмови і не створюють небезпечних для руху ситуацій. В такому разі кожна відмова РК супроводжується зупинкою потягу та простоєм рухомого складу, що призводить до економічних втрат залізниці по причині несправності пристройів СЦБ. Додаткові втрати пов'язані з витратами часу та матеріальних ресурсів на ліквідацію відмов експлуатуючим персоналом. Впровадження СЗКБ дозволить суттєво знизити кількість відмов, пов'язаних з впливом завад зворотного тягового струму станції стикування, і, як наслідок, отримати економічний ефект від зменшення втрат при простоях рухомого складу та вивільнити час експлуатуючого персоналу [53, 56, 69].

Впровадження нових технічних рішень та пристройів на залізниці

обов'язково базується на основі розрахунку річного економічного ефекту та терміну окупності проекту. Показником загальної економічної ефективності капітальних вкладень є коефіцієнт економічної ефективності E [86], який для промислових організацій і транспорту визначається як відношення приросту річного прибутку до капітальних затрат, що викликають цей приріст [69, 86]:

$$E = \frac{P}{K}.$$

Наведені витрати – це сума капітальних вкладень та річних експлуатаційних витрат, наведених до однакового періоду часу за допомогою нормативного коефіцієнта ефективності (E_H) або нормативного терміну окупності (T_H), які пов'язані між собою зворотною залежністю $\left(E_H = \frac{1}{T_H}\right)$.

Отримане значення коефіцієнту економічної ефективності E порівнюють з галузевим нормативом E_H . Якщо виявляється, що $E > E_H$, то розраховані капітальні вкладення визнаються ефективними. Норматив ефективності для господарства автоматики, телемеханіки та зв'язку $E_H = 0,15$. [69, 86]. По отриманому коефіцієнту економічної ефективності може бути визначений термін окупності капітальних вкладень як величина зворотна E :

$$T = \frac{1}{E}.$$

5.1 Розрахунок капітальних вкладень в обладнання дільниці силовим захисним комутуючим блоком

Планується обладнання дільницю електротяги змінного струму прилеглою до станції стикування довжиною п'ять кілометрів пристроями захисту РК від завад тягового струму, встановивши чотири СЗКБ для блокування розтікання зворотного тягового струму зі станції стикування. Обладнання включає в себе монтаж на дросельному пункті СЗКБ по дільниці для блокування струму в тяговій мережі. СЗКБ встановлюються на кожні три блок-ділянки.

На обладнання п'яти кілометрів ділянки чотирма СЗКБ необхідно

додатково враховувати амортизаційні відрахування, що визначаються на основі вартості обладнання і складаються з відновлення, заміни деталей та капітального ремонту. Щорічні амортизаційні відрахування складають 5% від вартості системи, а витрати на матеріали та запасні частини – 2% (табл. 5.1) [53, 69, 86].

Таблиця 5.1 – Розрахунок капітальних витрат на 5 км колії

N п/п	Пристрій	Кількість, од	Вартість, грн
1	Лавинні діоди	2,00	950,00
2	Силові тиристори	2,00	800,00
3	Контроль віддалення хвоста поїзда	1,00	6500,00
4	Драйвер формування сигналів керування силовими тиристорами	1,00	1800,00
5	Блок живлення з гальванічною розв'язкою	1,00	500,00
6	Додаткова апаратура та монтажні матеріали	1,00	5000,00
7	Монтаж	1,00	4000,00
8	Амортизаційні відрахування	5%	1067,50
9	Витрати на матеріали та запасні частини	2%	448,35
10	Разом (4 блоки)	4,00	84464,00

Тоді на 5 км дільниці:

$$K = 5 \cdot 131042 = 422320,0 \text{ грн.}$$

Для визначення економічної ефективності впровадження СЗКБ розрахуємо витрати залізниці на простій поїздів.

5.2 Розрахунок економічної ефективності впровадження пристрою захисту рейкових кіл від завад тягового струму

Для визначення економічної ефективності впровадження СЗКБ розрахуємо витрати залізниці на простій поїздів для дільниці.

Вихідні дані для розрахунку:

- Кількість відмов за рік на Одеській залізниці внаслідок впливу завад постійного тягового струму станції стикування (*Not*): 58 (шт);
- Середній час затримки одного потягу (T_z): 11,6 (хв);
- Середні витрати енергії при простої потягу (P_p): 125,0 (кВт · год);
- Довжина дільниці (Lu): 35,0 (км);
- Ходова швидкість потягу (Vx): 60,0 (км/г);
- Дільнична швидкість потягу (Vu): 32,0 (км/г);
- Середня кількість вагонів у потягу (mv): 60,0 (шт);
- Коефіцієнт, що враховує додаткові локомотиви (Kt): 1,1;
- Середній час пошуку несправності в РК АБ або ЕЦ (*Tpushuk*): 23,0 (хв);
- Середній час усунення несправності в РК АБ або ЕЦ (*Tus*): 20,0 (хв);
- Середня відстань від посту ЕЦ до несправного РК (SI): 3,0 (км);
- Середня швидкість пересування ШН ($Vper$): 5,0 (км/г);
- Час на підготовку ШН до виходу (Tp): 15,0 (хв);
- Часова тарифна ставка ШН (Ce): 35,0 (грн/г);
- Вартість розгону та сповільнення одного потягу (Cp): 887,5 (грн);
- Вартість простою одного вагоно-часу (Cv): 16,14 (грн);
- Вартість простою одного локомотиво-часу (Cl): 185,26 (грн)
- Вартість простою локомотивної бригади-часу (Cb): 698,2 (грн);
- Вартість кВт · год (Ckv): 1,75 (грн).

Кількість відмов РК за рік та середній час затримки потяга (T_z) базуються на статистиці по залізниці, а кількість відмов по причині електромагнітних завад (*Not*) – на досліджені питання електромагнітної сумісності.

Дільнична швидкість потягу (Vu) враховує характерну для обладнаної ділянки інтенсивність руху вантажних та пасажирських потягів.

Коефіцієнт Kt враховує використання додаткових локомотивів для тяги або підштовхування деяких потягів на складних ділянках.

Середня відстань від посту ЕЦ до несправного РК вибрана виходячи з умови, що максимальна відстань до об'єкта, що обслуговується бригадою ШНС

без спец автомобіля може складати 13,75 км [53, 69, 85, 86].

Тарифна ставка, вартості розгону, простою та електроенергії приведені в гривнях станом на 1 вересня 2016 р.

Вважаючи, що кожна відмова РК супроводжується зупинкою потягу, визначимо експлуатаційні витрати, що пов'язані із розгоном і сповільненням поїздів [53, 69, 86]:

$$Zp = Cp \cdot Not = 51475,0.$$

Визначимо кількість поїздо-годин простою за рік на шляху проходження дільниці по причині відмов РК:

$$NH = 2 \cdot Not \cdot Lu \cdot \left(\frac{1}{V_x} + \frac{1}{V_u} \right) = 194,5 \text{ поїздо-год.}$$

Кількість вагоно-годин простою за рік визначається:

$$Nh = NH \cdot mv = 11672,5 \text{ вагоно-год.}$$

Кількість додаткових локомотиво-годин простою за рік:

$$Mh = NH \cdot Kt = 214,0 \text{ лок-год.}$$

Експлуатаційні витрати, пов'язані з простоєм поїздів визначаються як добуток поїздо-годин простою на укрупнену витратну ставку:

$$Ze = NH \cdot E_{NT}$$

де E_{NT} - укрупнена витратна ставка.

Таблиця 5.2 -Розрахунок укрупненої витратної ставки на 1 поїздо-годину

N п/п	Вимірник	Формула розрахунку	Значення показника	Витратна ставка, грн	Витрати, грн
1	Вагоно-години	m	mv	Cv	968,4
2	Локомотиво- години	1,1	1,0	Cl	203,786
3	Бригадо-години локомотивних бригад	1,1	1,0	Cb	768,02
4	Кіловат-годин електроенергії	1,0	Pp	Ckv	218,75
5	Разом				2158,956

Отже: $Ze = NH \cdot E_{NT} = 194,5 \cdot 2158,956 = 419916,942$ грн.

Розрахуємо експлуатаційні витрати, пов'язані з пошуком та усуненням відмов РК. Так як передбачається встановлення системи захисту на перегоні, то рахуємо відмови, що трапляються з перегінними РК. Час, необхідний електромеханіку, щоб дістатися до місця відмови:

$$T_{per} = \frac{S1}{V_{per}} = 0,6 \text{ год} = 36,0 \text{ хв.}$$

Загальний робочий час, який витрачає електромеханік на усунення однієї відмови складається з часу на [53, 69]:

- підготовку до виходу, T_p (зв'язок з ДСП або ДНЦ, збір інструментів, запасних частин);
- пересування до місця відмови, T_{per} ;
- пошук відмови, T_{poshuk} ;
- усунення відмови, T_{us} ;
- пересування з місця відмови на пост ЕЦ, T_{per}' .

$$Totk = T_p + T_{poshuk} + T_{us} + T_{per} + T_{per}' = 130 \text{ хв} = 2,16 \text{ год}$$

Тоді витрати на усунення відмов за рік:

$$Z_{us} = Not \cdot Totk \cdot Ce = 4384,8 \text{ грн.}$$

Згідно з законодавством України проводяться нарахування до основного фонду заробітної плати в розмірі 36 % від заробітної плати основного фонду (а саме 32 % - пенсійний збір, 2,5 % - соціальне страхування, 1,5 % - відрахування у фонд безробіття) [86]. Тоді з додатковими нарахуваннями отримуємо експлуатаційні витрати на усунення відмов:

$$Z_v = Z_{us} + Z_{us} \cdot 0,36 = 5963,328 \text{ грн.}$$

Розрахуємо загальні економічні втрати залізниці від простою поїздів по причині відмов рейкових кіл:

$$Z = Z_p + Z_e + Z_v = 477355,27 \text{ грн.}$$

Приймаючи, що $P = Z$, коефіцієнт економічної ефективності впровадження СЗКБ (E) буде дорівнювати:

$$E = \frac{P}{K} = \frac{477355,27}{422320,0} \approx 1,13.$$

Розраховані капітальні вкладення визнаються ефективними. Строк окупності впровадження СЗКБ дорівнює: $T = \frac{1}{E} = \frac{1}{1,13} = 0,88$ років.

Отже, впровадження СЗКБ для захисту РК від завад зворотного тягового струму з боку станції стикування дозволить суттєво знизити кількість відмов, підвищити експлуатаційну надійність роботи рейкових кіл, забезпечити високий рівень безпеки руху, отримати економічний ефект від зменшення втрат при простоях рухомого складу та вивільнити час експлуатуючого персоналу. Впровадження запропонованого методу захисту РК дозволить отримати економію коштів у розмірі понад $\approx 470\,000$ грн/рік на обладнаній ділянці.

5.3 Висновки за розділом 5

Впровадження СЗКБ в РК дозволить отримати економічний ефект від зменшення втрат при простоях рухомого складу та вивільнити час експлуатуючого персоналу. Визначений коефіцієнт економічної ефективності впровадження способу захисту складає $E = 1,13$, а термін окупності проекту складає $T = 0,88$ років, тобто приблизно 10 місяців. Як показали розрахунки, впровадження запропонованого методу захисту РК дозволить отримати економію коштів у розмірі понад 470 000 грн/рік на обладнаній ділянці (захищена ділянка 5...35 км).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання з підвищення експлуатаційної надійності роботи рейкових кіл полігону електротяги змінного струму в умовах впливу постійного тягового струму.

1. Досліджено роботу рейкової мережі полігону електротяги змінного струму в умовах протікання змішаних родів тягових струмів. Виконаний статистичний аналіз відмов рейкових кіл (65 %) свідчить про те, що на експлуатаційну надійність роботи РК впливає підмагнічування магнітопроводу ДТ постійним тяговим струмом, який розтікається зі станції стикування, особливо при вимушенному режимі роботи ТП чи зимовий період. Встановлено, що завада постійного тягового струму зі станції стикування розтікається в полігон електротяги змінного струму на відстань більше 20 км. Відомим з доступних засобів підвищення експлуатаційної надійності РК полігону електротяги змінного струму, що примикає до станції стикування, є використання дросель-трансформаторів типу ДТ-0,6-500С в цих РК.

2. Розроблено узагальнену математичну модель для опису розподілу тягового струму в рейковій мережі в зоні станції стикування ланцюгової схеми, що враховує зміну опору ізоляції баласту, структуру колійного розвитку ділянки, а також режими роботи ТП, яка дозволила обґрунтувати спосіб захисту, підібрати параметри й характеристики пристрою захисту. Використаний підхід моделювання можна застосувати для будь-якої іншої ділянки тягової мережі й для аналізу різних точок підключення тягових підстанцій до тягової мережі для отримання мінімальних рівнів завад постійного тягового струму станції стикування.

3. Виконано аналіз підмагнічувального впливу перешкод зворотного тягового струму на колійні дросель-трансформатори. Розроблено імітаційну математичну модель для дослідження електромагнітних процесів у феромагнетику, зокрема в колійних ДТ, що дозволяє відтворити із заданої точки функції $B(H(t))$ подальше спрямування зміни параметрів магнітної системи і, відповідно, оцінити роботу рейкового кола. Використання розробленої

імітаційної моделі, що відтворює в широкій області нелінійні зміни основної кривої намагнічування й процеси перемагнічування магнітної системи, дозволило розробити новий метод розрахунку параметрів рейкових кіл та режимів їх роботи при/без підмагнічування сталі магнітопроводу ДТ, і підвищити тим самим достовірність розробки регулювальних таблиць для нових проектів систем СЦБ. Різниця в результатах без урахування підмагнічування при розрахунку класичним і запропонованим методами склала не більше 10 %.

4. Запропоновано спосіб підвищення експлуатаційної надійності роботи РК шляхом встановлення в середні точки дросельних пунктів на проблематичній ділянці, яка примикає до станції стикування, силових захисних комутуючих блоків, що виключає як розтікання завад постійного тягового струму, так і підмагнічування магнітопроводу ДТ. Залежно від геометрії колійного розвитку схильної до впливу ділянки встановлюється 2–4 силових захисних комутуючих блоків для повного виключення поширення завад постійного тягового струму станції стикування в сторону полігону електротяги змінного струму.

Використовуючи математичну модель розподілу тягового струму в рейковій мережі в зоні станції стикування, аналітично встановлено, що при підключені ТП постійного струму до тягової мережі на дросельному пункті в зоні входного світлофора станції стикування, на границі з перегоном змінного струму, перешкода постійного тягового струму зменшується більш ніж в два рази.

5. Зроблено техніко-економічну оцінку результатів впровадження методу захисту РК шляхом виключення завад постійного тягового струму станції стикування на пристрой СЦБ перегону електротяги змінного струму через використання силового захисного комутуючого блока, причому економічний ефект становить понад 470 000 грн/рік на одну обладнану ділянку за рахунок виключення відмов РК при впливі завад постійного тягового струму й затримки поїздів. Термін окупності методу складає 10 місяців.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аватков Е. С. Асинхронный тяговый привод для электроподвижного состава / Е. С. Аватков; науч. ред. З. М. Дубровский. – Москва : ВИНИТИ, 1974. – С. 173. – (Итоги науки и техники. Т. 2, Электрооборудование транспорта).
2. Акулов Н. С. К теории кривых намагничивания ферромагнетиков в области инверсии / Н. С. Акулов, Б. А. Лучевский // Докл. АН БССР. – 1971. – Т. XV, № 6. – С. 484–487.
3. Анализ различных методов аппроксимации кривой намагничивания / М. Ф. Зарипов, И. Г. Фикс–Марголига, Х. З. Вахитова, Н. Н. Зацепин // Докл. АН УЗ СССР. – 1974. – № 3. – С. 8–10.
4. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – Москва : Наука, 1965. – 780 с.
5. Андриенко П. Д. Рекомендации к построению системы регулирования 4q–S преобразователя / П. Д. Андриенко, П. А. Горпинич, В. Н. Сухарев // Електричний журн. – 1996. – № 1. – С. 4–8.
6. Андриенко П. Д. Расчет гармонических составляющих во входной цепи преобразователя частоты со звеном постоянного тока с использованием 4q-S преобразователя / П. Д. Андриенко, О. В. Немыкина // Электротехника и электроэнергетика. – 2003. – № 2. – С. 47–51.
7. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей / В. С. Андреев. – Москва : Радио и связь, 1982. – 280 с.
8. Аркатор В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатор, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва : Транспорт, 1990. – 295 с.
9. Аркатор В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В. С. Аркатор, Н. В. Котляренко, А. И. Баженов. – Москва : Транспорт, 1982. – 364 с.

10. Бабаєв М. М. Аналіз впливу зовнішніх факторів на роботу рейкового кола / М. М. Бабаєв, А. А. Прилипко // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – 2007. – Вип. 80. – С. 102–113.
11. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – Москва : УМК МПС, 2002. – 638 с.
12. Баев Е. Ф. Индуктивные элементы с ферромагнитными сердечниками / Е. Ф. Баев. – Москва : Сов. радио, 1976. – 320 с.
13. Безрученко В. Н. Концепция тягового электропривода ДСЗ / В. Н. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак // Вестн. Нац. ун-та «ХПИ». – 2001. – № 10. – С. 28–35.
14. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – Москва : Высшая шк., 1996. – 580 с.
15. Бессонов Л. А. Электрические цепи со сталью / Л. А. Бессонов. – Москва–Ленинград : Госэнергоиздат, 1948. – 344 с.
16. Бессонов Л. А. Нелинейные электрические цепи / Л. А. Бессонов. – Москва : Высшая шк., 1977. – 343 с.
17. Белязо И. А. Маршрутно–релейная централизация / И. А. Белязо, В. Р. Дмитриев – Москва : Транспорт, 1974. – 320 с.
18. Боднарь В. В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В. В. Бондарь. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 177 с.
19. Бойник А. Б. Системы интервального регулирования движения поездов на перегонах / А. Б. Бойник. – Харьков : УкрГАЖТ, 2005. – 256 с.
20. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендеев. – Москва : Наука, 1986. – 544 с.
21. Брылеев А. П. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. П. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – Москва : Транспорт, 1978. – 344 с.

22. Виноградов В. В. Линии железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / В. В. Виноградов, С. Е. Кустышев, В. А. Прокофьев. – Москва : Маршрут, 2002. – 415 с.
23. Гаврилюк В. І. Розробка математичної моделі для дослідження електромагнітних завад від тягових перетворювачів з асинхронним двигуном / В. І. Гаврилюк, В. І. Щека // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – № 31. – С. 221–225.
24. Городецкий П. Г. Обзор аналитических выражений кривых намагничивания и гистерезисных петель / П. Г. Городецкий. – Киев : Воениздат, 1956. – 59 с.
25. ГОСТ Р 50397–2011 (МЭК 60050–161:1990). Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – 1.09.2012. – Москва : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2012. – 24 с.
26. Гребенюк П. Т. Тяговые расчёты / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцова. – Москва : Транспорт, 1987. – 282 с.
27. Диагностика электрических машин с использованием беспроводных каналов передачи информации / А. П. Разгонов, А. Ю. Лебедев, А. Ю. Журавлев, С. А. Щиголев // Транспорт Урала. – 2016. – № 1 (48). – С. 66–71.
28. Діагностування електричних машин частотним методом / А. П. Разгонов, М. І. Капіца, О. Ю. Лебедев, А. Ю. Журавльов, К. І. Ящук // Материалы IV Международной научно–практ. конф. «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте» / ДИИТ. – Днепропетровск, 2011. – С. 67.
29. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов : монография / Ю. А. Бахвалов, Г. А. Бузало, А. А. Зарифьян, П. Ю. Петров и др; под ред. А. А. Зарифьяна. – Москва : Маршрут, 2006. – 374 с.

30. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали / В. В. Дружинин. – Москва : Энергия, 1974. – 240 с.
31. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – Москва : Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.
32. Жук А. К. Влияние на питающую сеть преобразователей частоты со звеном постоянного тока / А. К. Жук // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силова електроніка і енергоефективність». – Київ, 2006. – С.42–46.
33. Жуковицкий И. В. О влиянии электрооборудования пассажирских вагонов на рельсовые цепи устройств безопасности / И. В. Жуковицкий, С. А. Разгонов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному трансп. – 2005. – № 5. – С. 112–113.
34. Жуковицкий И. В. К оценке предельных уровней помех в рельсовых цепях / И. В. Жуковицкий, С. А. Разгонов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному трансп. – 2005. – № 5.– С. 112–113.
35. Журавльов А. Ю. Оцінка асиметрії рейкової лінії інформаційних частот тонального спектру / А. Ю. Журавльов // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізн. трансп. – 2016. – Вип. 159. – С. 24–33.
36. Журавльов А. Ю. Про метод розрахунку рейкових кіл з нелінійними феромагнетиками в умовах впливу завад тягового струму / А. Ю. Журавльов // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 1(61). – С. 19–29.
37. Журавлев А. Ю. О повышении надежности работы рельсовых цепей с использованием цифровой обработки сигнала / А. Ю. Журавлев, М. В. Бондаренко // «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті» (S&EMC 2012) : тези V Міжнародної науково-практич. конф. / ДПТ. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 39–40.
38. Защита рельсовых цепей в зонестыкования систем электротяги / А. П. Разгонов, В. А. Дьяков, А. Ю. Журавлев, С. А. Разгонов // Автоматика, связь, информатика. – Москва, 2009. – № 9. – С. 19–22.

39. Зацепин Н. Н. Аналитическая функция, описывающая ход симметричной петли магнитного гистерезиса / Н. Н. Зацепин // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. науку. – 1973. – № 4. – С. 29–31.
40. Зевеке Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
41. Зирка С. Е. Моделирование магнитного гистерезиса на основе обобщенных правил Маделунга. Часть 2. Описание алгоритмов / С. Е. Зирка, Ю. И. Мороз // Технічна електродинаміка. – 1999. – № 2. – С. 7–13.
42. Евсеев И. Г. Защита устройств связи и СЦБ / И. Г. Евсеев. – Москва : Транспорт, 1982. – 176 с.
43. Ершевич В. В. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В. В. Ершевич, А. Н. Зейлигер, Г. А. Илларионов; под. ред. Рокотяна С. С. и Шапиро И. М. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
44. Исследование электромагнитной совместимости обратной тяговой сети с устройствами сигнализации, централизации и блокировки / А. М. Безнарытний, В. И. Гаврилюк, И. О. Романцев, В. И. Щека // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2014. – № 3(51). – С. 7–14.
45. Каганов З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / З. Г. Каганов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 247 с.
46. Кадочников А. И. Аппроксимация основной кривой намагничивания параболической сплайн-функцией / А. И. Кадочников, Е. Б. Хан // Изв. вузов, Электромеханика. – 1991. – № 7. – С. 11–15.
47. Кадочников А. И. Исследование связи между основной кривой намагничивания и семейством статических петель гистерезиса для тонкой электротехнической стали / А. И. Кадочников, Э. Э. Федорищева, Г. С. Чернова // Дефектоскопия. – 1991. – № 9. – С. 27–32.

48. Кадомская К. П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них / К. П. Кадомская, Ю. А. Лавров, А. А. Рейхердт. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 368 с.
49. Казаков А. А. Автоблокировка, локомотивная сигнализация и автостопы / А. А. Казаков, Е. А. Казаков. – Москва : Транспорт, 1980. – 360 с.
50. Казаков А. А. Релейная централизация стрелок и сигналов / А. А. Казаков. – Москва : Транспорт, 1984. – 312 с.
51. Канов Л. Н. Схемное моделирование электроэнергетических систем переменного тока с гистерезисом / Л. Н. Канов // Вісник СевДТУ. – 2009. – Вип. 97. – С. 48–51.
52. Кармашев В. С. Электромагнитная совместимость технических средств / В. С. Кармашев. – Москва, 2001. – 74 с.
53. Карпов И. В. Экономика организации и планирование хозяйства сигнализации и связи / И. В. Карпов, С. Г. Клинович, Л. И. Хляпов. – Москва : Маршрут, 2002. – 436 с.
54. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Л. Киш; пер. с венгер. М. Бики; под ред. Г. Е. Тарле. – Москва : Энергия, 1980. – 208 с.
55. Климов Д. А. Математическое моделирование динамических режимов работы силовых трансформаторов для автоматизированного проектирования и диагностики : дис. ...канд. техн. наук / Д. А. Климов. – Иваново : ИГЭУ, 2007. – 143 с.
56. Козлов В. Е. Технико-экономическая оценка надежности устройств СЦБ на двухпутных линиях / В. Е. Козлов, Е. Г. Ефимова // Вестн. ВНИИЖТ. – 1982. – Вып. 7. – С. 21–24.
57. Кокурин И. М. Эксплуатационные основы устройств автоматики и телемеханики / И. М. Кокурин, Л. Ф. Кодратенко. – Москва : Транспорт, 1989. – 184 с.
58. Комп'ютерне діагностування стрілочних та тягових електродвигунів за допомогою частотних методів / А. П. Разгонов, М. І. Капіца, О. Ю. Лебедєв, А. Ю. Журавльов // Зб. наук. пр. ДонІЗД. – 2012. – Вип. 32. – С. 61–66.

59. Король Е. Г. Метод определения параметров петли гистерезиса по экспериментальным данным / Е. Г. Король, В. С. Лупиков // Сб. научн. тр. Вестн. НТУ «ХПИ» : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2008. – № 25. – С. 21–28.
60. Корн Г. Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1970. – 720 с.
61. Костроминов А. М. Защита устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от помех / А. М. Костроминов. – Москва : Транспорт, 1997. – 192 с.
62. Костенко М. В. Коммутационные перенапряжения в энергосистемах : учебное пособие / М. В. Костенко, И. М. Богатенков, Ю. А. Михайлов. – Ленинград : Изд-во ЛПИ, 1991. – 101 с.
63. Котляренко Н. Ф. Электрические рельсовые цепи / Н. Ф. Котляренко. – Москва : Трансжелдориздат, 1961. – 327 с.
64. Кравцов Ю. А. О влиянии на рельсовые цепи электрической дуги на токосъемнике электровоза при гололедообразовании / Ю. А. Кравцов, А. П. Разгонов, Ю. И. Зенкевич // Автоматика, связь, информатика. – 1999. – № 8. – С. 2–4.
65. Кравцов Ю. А. Системы интервального регулирования движения поездов с централизованным размещением аппаратуры / Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва : МИИТ, 1983. – 86 с.
66. Кравцов Ю. А. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. для вузов / Ю. А. Кравцов, В. Л. Нестеров, Г. Ф. Лекута. – Москва : Транспорт, 1996. – 400 с.
67. Кулик П. Д. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надёжности / П. Д. Кулик, Н. С. Ивакин, А. А. Удовиков. – Киев : Изд. дом «Мануфактура», 2004. – 288 с.
68. Литовченко В. В. 4q-S – четырехквадрантный преобразователь электровозов переменного тока (принцип работы, анализ и экспериментальные

исследования) / В. В. Литовченко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – № 3. – С. 64–73.

69. Луговой П. А. Основы технико-экономических расчетов на железнодорожном транспорте / П. А. Луговой, Л. Г. Цыпин, Р. А. Аукционек. – Москва : Транспорт, 1973. – 232 с.

70. Наумов А. В. Критерии выбора параметров обратной тяговой (рельсовой) сети при пропуске поездов повышенной массы и длины / А. В. Наумов, А. А. Наумов // Автоматика, связь, информатика. – 2002. – Вып. 2. – 638 с.

71. Немыкина О. В. Влияние пульсаций напряжения на фильтре на входные энергетические характеристики 4q-S преобразователя / О. В. Немыкина, К. И. Фалалеев // Електротехніка та електроенергетика. – 2004. – № 1. – С. 46–53.

72. Макас Ю. Н. Справочник по электроснабжению железных дорог : в 2 т. / Ю. Н. Макас, В. М. Эрлих, П. М. Шилкин; под ред. К. Г. Марквардта. – 2 т. – Москва : Транспорт, 1980–1981.

73. Макаров А. В. Разработка и исследование системы управления межсистемной несинхронной связи на основе ферромагнитных элементов : дис. ... кан. тех. наук: 05.14.02 / А. В. Макаров. – Ленинград : ЛПИ, 1985. – 217 с.

74. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / К. Г. Марквардт. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с.

75. Матханов П. Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи / П. Н. Матханов. – Москва : Высшая шк., 1977. – 272 с.

76. Матюк В. Ф. Математическое моделирование процесса перемагничивания ферромагнитных материалов / В. Ф. Матюк, А. А. Осипов // Достижения физики неразрушающего контроля. – Минск : Ин-т прикладной физики НАН Беларуси, 2003. – С. 200–211.

77. Мельников Н. А. Электрические сети и системы : учеб. пособие для вузов / Н. А. Мельников. – Москва : Энергия, 1975. – 464 с.

78. Мельгуй М. А. К теории гистерезисных явлений в сегнетоэлектриках / М. А. Мельгуй // Докл. АН БССР. – 1965. – Т. IX, № 9. – С. 581–584.
79. Мельгуй М. А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков / М. А. Мельгуй // Дефектоскопия. – 1987. – № 11. – С. 3–10.
80. Мельгуй М. А. Экспериментальная проверка аналитических выражений для нелинейных свойств ферромагнитных материалов / М. А. Мельгуй, Э. А. Шидловская // Дефектоскопия. – 1987. – № 11. – С. 10–18.
81. Меньшиков Н. Я. Надежность железнодорожных систем автоматики и телемеханики / Н. Я. Меньшиков, А. И. Королев, Р. Ш. Ягудин. – Москва : Транспорт, 1976. – 215 с.
82. Михайлов С. П. Аппроксимация экспериментальных кривых намагничивания с помощью рациональных функций / С. П. Михайлов, А. А. Литвинцев // Дефектоскопия. – 1995. – № 6. – С. 52–55.
83. Моисеев С. Н. Универсальный метод оптимизации без использования производных с квадратичной сходимостью / С. Н. Моисеев. – Воронеж, 2011. – С. 25.
84. Оводович Л. В. Дроссельные перемычки и рельсовые соединители из малодефицитных материалов / Л. В. Оводович, А. П. Разгонов, Ю. А. Кравцов // Автоматика, телемеханика и связь. – 1996. – № 10. – С. 22–26.
85. Отраслевые нормы времени на техническое обслуживание устройств СЦБ. Утверждено Указанием МПС № Р-200у от 3.03.2003 г. – Изд. перераб. и доп. – Москва : Трансиздат, 2003. – 224 с.
86. Оценка экономической эффективности инвестиций в мероприятиях научно-технического прогресса : учебно-методическое пособие // [Е. И. Балака, И. Г. Бойко и др.; под ред. В. Л. Диканя]. – Харьков : Основа, 1995. – 254 с.
87. Пат. 84968 Україна, МПК B61L 1/00. Пристрій захисту рейкових кіл ділянки тяги змінного струму від впливу зворотного постійного струму / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавльов, А. Ю. Лебедєв; заявник та патентовласник

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2013 04391; заявл. 08.04.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл. № 21.

88. Пат. 33376 Україна, МПК G01R 31/02. Пристрій захисту рейкових кіл ділянок тяги змінного струму від впливу зворотного постійного тягового струму / А. П. Разгонов, В. О. Дьяков, О. І. Гілевіч, А. Ю. Журавльов; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2008 00018; заявл. 02.01.2008; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 12.

89. Пат. 69209 Україна, МПК B61L 23/00 Параметричний генератор частоти з захистом навантаження від завад / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов, С. А. Разгонов, О. Ю. Лебедєв; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2011 11206; заявл. 20.09.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.

90. Пат. 77216 Україна, МПК B61L 23/00 Параметричний генератор з неколінеарними магнітними полями / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов, О. Ю. Лебедєв; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2012 06526; заявл. 29.05.2012; опубл. 11.02.2013, Бюл. № 3.

91. Пат. 80793 Україна, МПК B61L 23/00 Параметричний генератор з ефективним захистом навантаження від завад / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов, О. Ю. Лебедєв; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2012 14811; заявл. 24.12.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.

92. Пат. 87844 Україна, МПК B61L 23/00 Параметричний генератор з неколінеарними магнітними полями для живлення пристрійв автоматики і телемеханіки / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов, О. Ю. Лебедєв;

заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2013 09113; заявл. 19.07.2013; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4.

93. Пат. 70601 Україна, МПК B61L 1/00. Параметричний генератор з неколінеарними магнітними полями / А. П. Разгонов, М. О. Ковригін, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов, О. Ю. Лебедєв, С. А. Разгонов; заявник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна. – № U 2011 11205; заявл. 20.09.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

94. Пат. 92628 Україна, МПК B61L 23/00 Двоконтурний параметричний генератор з захистом навантаження від завад / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавльов, К. І. Ящук, С. А. Разгонов; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2014 03205; заявл. 27.03.2014; опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16.

95. Пат. 95486 Україна, МПК B61L 23/00 Пристрій живлення та захисту апаратури систем залізничної автоматики від впливу атмосферних та комутаційних перенапруг / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавльов, К. І. Ящук, О. Ю. Лебедєв, С. А. Разгонов; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № U 2014 07601; заявл. 07.07.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24.

96. Перникис Б. Д. Отказы устройств СЦБ / Б. Д. Перникис, В. М. Ягудин. – Москва : Транспорт, 1984. – 78 с.

97. Пенкин Н. Ф. Рельсовые цепи переменного тока с дроссель–трансформаторами / Н. Ф. Пенкин. – Москва : Трансжелдориздат, 1953. – 139 с.

98. Покровский С. Н. Тяговые преобразователи высокой мощности на IGBT–транзисторах: тяговые преобразователи / С. Н. Покровский // Железные дороги мира. – 2010. – № 12. – С. 38–46.

99. Пономарев Ю. Ф. Гармонический анализ намагнченности ферромагнетиков, перемагничиваемых переменным полем, с учетом

магнитного гистерезиса. I. Способ описания петель магнитного гистерезиса / Ю. Ф. Пономарев // Дефектоскопия. – 1985. – № 6. – С. 61–67.

100. Правила безпечної експлуатації пристрій автоматики, телемеханіки та зв'язку на залізницях України. ЦШ 0030. – Київ, 2003. – 122 с.

101. Путевая блокировка и авторегулировка / Н. Ф. Котляренко, А. В. Шишляков, Ю. В. Соболев и др.; под ред. Н. Ф. Котляренко. – Москва : Транспорт, 1983. – 408 с.

102. Разгонов А. П. Дослідження роботи рейкових кіл та системи автоблокування на перевальних ділянках з крутим профілем / А. П. Разгонов, К. І. Ящук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – № 37. – С. 186–190.

103. Разгонов А. П. О воздействии токов длительного короткого замыкания контактной сети на устройства электрической централизации / А. П. Разгонов // Автоматика, связь, информатика. – 2002. – № 2. – С. 36–39.

104. Разгонов А. П. Математическая модель перемагничивания ферромагнетиков в рельсовых цепях / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, С. А. Разгонов // Транспорт Урала. – 2008. – №1(16). – С. 36–38.

105. Разгонов А. П. Электромагнитная совместимость устройств тягового электроснабжения и систем централизации и блокировки в зоне станциистыкования электрифицированных участков постоянного и переменного токов / А. П. Разгонов, В. А. Дьяков, А. Ю. Журавлев // Труды Всероссийской научно-практ. конф. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 34–40.

106. Разгонов А. П. О повышении надежности работы рельсовых цепей с использованием цифровой обработки сигнала / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, Е. И. Ящук // Материалы IV Международной научно-практ. конф. «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте». – Днепропетровск : ДИИТ, 2011. – С. 65–66.

107. Разгонов А. П. О математическом описании петли гистерезиса ферромагнитных сердечников / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, Е. И. Ящук // Материалы IV Международной научно-практ. конф. «Электромагнитная

совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте». – Днепропетровск : ДИИТ, 2011. – С. 66.

108. Разгонов А. П. Вплив тягового струму асиметрії на роботу рейкових кіл / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов // Матеріали III Міжнародної науково-практ. конф. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті EMCS–R 2011» / ДПТ. – Дніпропетровськ, 2011. – С. 68.

109. Разгонов А. П. О некоторых проблемах повышения безопасности железнодорожной автоматики / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, Е. И. Ящук // Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті (S&EMC 2012) : тези V Міжнародної науково-практ. конф. – Дніпропетровськ : ДПТ, 2012. – С. 56–58.

110. Разгонов А. П. О применении современных технологий для повышения надежности СЖАТ / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, Е. И. Ящук // Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті (S&EMC 2012) : тези V Міжнародної науково-практ. конф. – Дніпропетровськ : ДПТ, 2012. – С. 58–59.

111. Разгонов А. П. Параметричний трансформатор частоти на неколінеарних магнітних полях як захисний засіб від завад / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, Е. И. Ящук // Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті (S&EMC 2012) : тези V Міжнародної науково-практ. конф. – Дніпропетровськ : ДПТ, 2012. – С. 59–60.

112. Система бездротової передачі даних ZigBee в процесі технічної діагностики віддалених об'єктів залізничної автоматики / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавльов, О. Ю. Лебедев, С. А. Разгонов // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті : зб. наук. пр. ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 6. – С. 24–31.

113. Сороко В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики : справочник. В 2 т. / В. И. Сороко, Б. А. Разумовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1981. – Т. 2. – 98 с.

114. Сороко В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Сороко, Е. Н. Розенберг. – Москва : НПФ «ПЛАНЕТА», 2000. – 1008 с.
115. Справочник по электроснабжению железных дорог : в 2 т. / под ред. К. Г. Марквардта. – Москва : Транспорт, 1980. – Т. 1. – 256 с.
116. Станциястыкования // Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / под. ред. Н. С. Конарев. – Москва : Большая Российская энциклопедия, 1994. – 410 с.
117. Талыков А. А. Фазочувствительные рельсовые цепи 25 Гц / А. А. Талыков, А. П. Разгонов. – Москва : Транспорт, 1972. – 96 с.
118. Тиховод С. М. Система компьютерного моделирования динамических процессов в нелинейных магнитоэлектрических цепях / С. М. Тиховод // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 3. – С. 16–23.
119. Туровский Я. Техническая электродинамика : пер. с польск. – Москва : Энергия, 1974. – 488 с.
120. ГТСС № 1226. Указания по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. – Москва : Министерство путей сообщения СССР, 1990.
121. Федоров Н. Е. Современные системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями : [учебное пособие] / Н. Е. Федоров. – Самара : СамГАПС, 2004. – 132 с.
122. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – Москва : Мир, 1975. – 534 с.
123. Шур Я. С. Ферромагнетизм / Я. С. Шур, С. В. Вонсовский. – Москва–Ленинград : Гостехиздат, 1948. – 816 с.
124. Янус Р. И. Магнитная дефектоскопия / Р. И. Янус. – Москва–Ленинград : Гостехиздат, 1946. – 171с.
125. Abetti P. A. Transformer Models for the determination of transient voltages / P. A Abetti // Trans. AIEE. – 1953. – № 72. – P. 468–480.

126. Brent Richard P., Algorithms for Minimization without Derivatives, Prentice–Hall, Englewood Cliffs. – NJ, 1973. – 195 p.
127. Holmstrom F. R. Rail transit EMI–EMC Electromagnetic Compatibility / F. R. Holmstrom, D. Turner, E. Fernald // Magazine IEEE. – 2012. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 79–82.
128. Mitigation of Electromagnetic Interference in Rolling stock / Pranay Soni, Prerna Soni, L. P. Singh, S. S. Deswal // Intern. J. of Electrical, Electronics and Computer Engineering. – 2013. – Vol. 2, № 1. – P. 22–27.
129. Powell M. J. D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives / M. J. D. Powell // Computer J. – 1964. – 7. – P. 155–162.
130. Rhee E. Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intrasubsystem / E. Rhee, K. Changjae // Intern. J. Of Software Engineering & Its Applications. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 115–126.
131. Sastry S. Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control / S. Sastry // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2000. – № 12. – P. 2438–2439.
132. Zhao L. A. A comprehensive fault diagnosis method for jointless track circuit based on genetic algorithm / L. Zhao, Y. Ran, J. Mu // China Railway Scie. – 2010. – T. 31, № 3. – P. 107–114.

ДОДАТКИ

Додаток А
Акти впровадження

17.10.2015

м. Одеса

АКТ

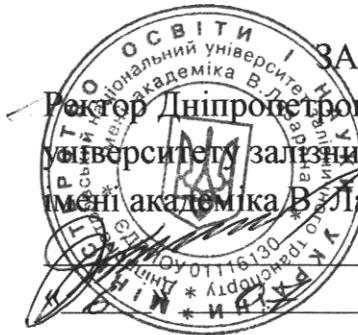
про передачу результатів дисертаційної роботи асистента кафедри
 «Автоматика, телемеханіка та зв'язок» Журавльова Антона Юрійовича на тему
 «Підвищення експлуатаційної надійності рейкових кіл полігону електротяги
 змінного струму, який примикає до станції стикування» до служби сигналізації
 та зв'язку Одеської залізниці

Результати наукових досліджень дисертаційної роботи, а також
 розроблений пристрій – силовий захисний комутуючий блок, який
 використовується для захисту рейкових кіл полігону електротяги змінного
 струму, який примикає до станції стикування, шляхом блокування завад
 постійного тягового струму в рейковій мережі від станції стикування, були
 передані для впровадження до служби сигналізації та зв'язку Одеської
 залізниці.

*Перший заступник начальника служби
 сигналізації та зв'язку
 Одеської залізниці*



A. В. Викрест



ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна, професор
О. М. Пшінько
2015 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи асистента кафедри
«Автоматика, телемеханіка та зв’язок» Журавльова Антона Юрійовича на тему
«Підвищення експлуатаційної надійності роботи рейкових кіл полігону
електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування» у
навчальному процесі Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Наукові положення дисертаційної роботи і розроблений метод захисту
апаратури сигналізації, централізації та блокування від дії завад змішаного
тягового струму використовується у навчальному процесі Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна при підготовці спеціалістів та магістрів зі спеціальності 7(8).8365067
«Автоматика та автоматизація на транспорті». Отримані результати
використовуються під час проведення занять з дисциплін «Системи автоматики
на перегоні», «Електроживлення систем автоматики», «Електричні кола та лінії»,
«Станційні системи автоматики», а також при виконанні дипломних
магістерських робіт та дипломних проектів спеціалістів.

Використання результатів досліджень та розробленого методу захисту
апаратури сигналізації, централізації та блокування від дії завад змішаного
тягового струму дозволяє студентам отримати навички щодо підвищення
експлуатаційної надійності роботи рейкових кіл в умах дії завад змішаного
тягового струму.

Декан факультету
«Технічна кібернетика»,
д.т.н., професор

В. В. Скалоузуб

Завідувач кафедри
«Автоматика, телемеханіка та зв’язок»
д.ф.-м.н., професор

В. І. Гаврилюк

Додаток Б
Акти проведення випробувань



**ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»**

РЕГІОНАЛЬНА ФІЛІЯ «ПРИДНІПРОВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»

структурний підрозділ «П'ятихатська дистанція сигналізації та зв'язку»
 52100, Дніпропетровської обл., м.П'ятихатки, вул.Переїзна , буд 142 тел.: (05651) 5-22-40, факс 21-40
 Ідентифікаційний код 40081237 п.н.282

« 17 » грудня 2015 рік.

АКТ

про передачу результатів дисертаційної роботи асистента кафедри
«Автоматика, телемеханіка та зв'язок» Журавльова Антона Юрійовича на
тему «Підвищення експлуатаційної надійності рейкових кіл полігону
електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування» до
П'ятихатської дистанції сигналізації та зв'язку регіональної філії
Придніпровська залізниця

Результати наукових досліджень дисертаційної роботи, а також
 розроблений пристрій – силовий захисний комутуючий блок, який
 використовується для захисту рейкових кіл полігону електротяги змінного
 струму, який примикає до станції стикування, шляхом блокування завад
 постійного тягового струму в рейковій мережі від станції стикування, були
 передані для дослідної експлуатації до П'ятихатської дистанції сигналізації
 та зв'язку регіональної філії Придніпровська залізниця.

Начальник П'ятихатської
дистанції сигналізації та зв'язку

С.С. Маліна





**МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ"
РЕГІОНАЛЬНА ФІЛІЯ "ОДЕСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ"
ВИРОБНИЧИЙ ПІДРозділ
"ЗНАМ'ЯНСЬКА ДИСТАНЦІЯ СИГНАЛІЗАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ"**

вул. Станційна, 25 а м. Знам'янка 27400

тел.(05233) 6-22-40, факс (05233)6-38-40

04 січня 2016 р.

ШЧ-3/04 - 379

АКТ

про передачу результатів дисертаційної роботи асистента кафедри «Автоматика, телемеханіка та зв’язок» Журавльова Антона Юрійовича на тему «Підвищення експлуатаційної надійності рейкових кіл дільниці електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування» до ВП «Знам'янська дистанція сигналізації та зв’язку» регіональної філії Одеська залізниця

Результати наукових досліджень дисертаційної роботи, а також розроблений пристрій – силовий захисний комутуючий блок, який використовується для захисту рейкових кіл дільниці електротяги змінного струму, що примикає до станції стикування шляхом блокування завад постійного тягового струму в рейковій мережі від станції стикування, були передані для дослідної експлуатації до ВП «Знам'янська дистанція сигналізації та зв’язку» регіональної філії Одеська залізниця.

Начальник ВП «Знам'янська дистанція
сигналізації та зв’язку»



Васянович М.В.

Додаток В

Лист підтримки

**ТОВАРИСТВО З ОБМежЕНОЮ
ВІДПОВІДальністю
«НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ
ОБ'ЄДНАННЯ
«ТРАНСАВТОМАТИКА»
ЕГРПОУ 20257178
пр. Пушкіна, 49, оф. 503
м. Дніпропетровськ,
Україна, 49006
факс: +38 056 370 37 72
тел. +38 056 371 57 03
E-mail: admin@transavt.com.ua**



**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ
«ТРАНСАВТОМАТИКА»
ЕГРПОУ 20257178
пр. Пушкина, 49, оф. 503
г. Днепропетровск,
Украина, 49006
факс: +38 056 370 37 72
тел. +38 056 371 57 03
E-mail: admin@transavt.com.ua**

Вих. № 288 від 09.09.15 р.

Лист підтримки

проекту прикладного дослідження на тему:
**«Підвищення експлуатаційної надійності рейкових кіл полігону електротяги змінного
струму, який примикає до станції стикування»**

ТОВ «НВО «ТРАНСАВТОМАТИКА» розглянуло тему: «Підвищення експлуатаційної надійності рейкових кіл полігону електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування», в рамках якої передбачується розробка пристрою – силово-го захисного комутуючого блоку, який використовується для захисту рейкових кіл полігону електротяги змінного струму, який примикає до станції стикування, шляхом блокування завад постійного тягового струму в рейковій мережі від станції стикування.

Впровадження такого пристрою в роботу діючих технічних засобів автоматики і телемеханіки дозволяє підвищити завадостійкість апаратури і значно знизити економічні затрати, пов’язані з компенсацією втрат від відмов і повністю виключити їх вплив на безпеку руху поїздів.

ТОВ «НВО «ТРАНСАВТОМАТИКА»

П. Вакулов

