

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

На правах рукопису

ЯЩУК КАТЕРИНА ІВАНІВНА



УДК 656.256.3:621.316.9

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОБЛОКУВАННЯ В
УМОВАХ ВПЛИВУ ВИСОКИХ РІВНІВ ТЯГОВИХ СТРУМІВ ТА ПОТУЖНИХ
ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук

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

Дніпропетровськ

2015

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ ЗАХИСТУ АПАРАТУРИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ ТА ТЕЛЕМЕХАНІКИ ВІД ДІЇ ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД.....	10
1.1 Статистичний огляд відмов систем автоматики, телемеханіки та зв'язку на перевальних ділянках доріг.....	11
1.2 Параметри грозового імпульсу як джерела виникнення ПЗ.....	14
1.3 Механізм впливу грозових розрядів на апаратуру електроживлення та захисту систем автоматики	16
1.3.1 Особливості апаратури живлення та захисту пристроїв СЦБ.....	17
1.4 Вплив ПЗ на роботу пристроїв АБ.....	24
1.5 Постановка задач дисертаційного дослідження.....	27
РОЗДІЛ 2 ПРОБЛЕМА ЗАХИЩЕНОСТІ АПАРАТУРИ АВТОБЛОКУВАННЯ ВІД ЗАВАД ТЯГОВОГО СТРУМУ НА ДІЛЯНКАХ ДОРІГ.....	29
2.1 Дослідження роботи РК та системи АБ на перевальній ділянці з крутим профілем.....	29
2.1.1 Оцінка впливу асиметрії тягового струму на робочу область кодового рейкового кола 50 Гц.....	32
2.1.2 Дослідження теплових режимів роботи дросель-трансформаторів.....	40
2.1.3 Розрахунок теплових режимів роботи дросельних перемичок.....	47
2.1.4 Методика розрахунку режимів роботи рейкових кіл на гірських ділянках зі встановленими двома дросель-трансформаторами на живлячому та релейному кінцях.....	51
2.2 Дослідження розповсюдження тягових струмів та потенціалів	

вздовж рейок на гірських ділянках з електротягою постійного струму.....	54
2.2.1 Дослідження роботи трансформатору ПОБС 2А.....	71
2.3 Висновки за розділом 2.....	72
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРУ ЧАСТОТИ ЯК ВТОРИННОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ТА ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ АПАРАТУРИ СЦБ ВІД ДІЇ ПІЗ.....	74
3.1 Процес виникнення параметричного збудження коливаль у генераторі.....	75
3.2 Вибір схеми параметричного генератору та параметрів його елементів.....	80
3.3 Математичне моделювання параметричного генератору частоти ПГ 50:50.....	87
3.3.1 Дослідження диференційного рівняння, що описує роботу вхідного кола параметричного генератору.....	87
3.3.2 Розробка диференційного рівняння контуру вихідного кола ПГ.....	94
3.4 Дослідження стійкості рішень нелінійного диференційного рівняння.....	98
3.5 Висновки за розділом 3.....	101
Розділ 4 Дослідження роботи макетного зразку параметричного генератору частоти.....	102
4.1 Виготовлення дослідного зразку та схема для дослідження характеристик параметричного генератору частоти.....	102
4.2 Дослідження параметрів елементів схеми захисту вхідного кола генератору.....	104
4.3 Дослідження вхідних та вихідних характеристик параметричного генератору частоти.....	106
4.4 Дослідження впливу ПІЗ на роботу параметричного генератору частоти.....	109

4.5 Дослідження характеру вихідного струму, вхідної, вихідної напруг з отриманих осцилограм.....	111
4.6 Дослідження теплового режиму роботи параметричного генератору частоти.....	114
4.7 Висновки за розділом 4.....	115
5 ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ ВНАСЛІДОК ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ ПРИ ДІЇ АТМОСФЕРНИХ ТА КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ	116
5.1 Розрахунок надійності роботи системи автоблокування.....	116
5.2 Розрахунок економічного ефекту та строку окупності від впровадження параметричного генератору частоти ПГ 50:50.....	120
5.2.1 Розрахунок капітальних вкладень в обладнання дільниці з тональними рейковими колами параметричним генератором частоти ПГ 50:50.....	122
5.2.2 Розрахунок економічної ефективності впровадження параметричного генератора частоти ПГ 50:50.....	122
5.3 Висновки за розділом 5.....	126
ВИСНОВКИ.....	127
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	129
ДОДАТОК А АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС.....	142
ДОДАТОК Б АКТ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В УМОВАХ РТД ШЧ-6.....	143
ДОДАТОК В ПРОТОКОЛ ПОПЕРЕДНІХ ЗАВОДСЬКИХ ВИПРОБУВАНЬ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКУ ПГ.....	144

ВСТУП

Актуальність теми. Згідно Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту» від 11.07.2013 р. №494 підвищення безпеки усіх функціональних складових залізничного транспорту є пріоритетним та головним напрямком в організації перевезень пасажирів та вантажу. Одну з важливих ролей у забезпеченні технологічного процесу відіграють системи залізничної автоматики та телемеханіки (ЗАТ), зокрема, їх надійність, що має складний комплексний характер і для забезпечення якої передбачається застосування ряду рішень та заходів.

Питання підвищення експлуатаційної надійності існуючих систем сигналізації, централізації, блокування (СЦБ) та рейкових кіл (РК) на багатьох ділянках залізниць залишаються невирішеними. Особливу увагу слід приділити високим рівням тягових струмів, які виникають, наприклад, на гірських ділянках залізниць внаслідок наявності високих підйомів і здійснюватимуть вплив на роботу апаратури РК, та потужним імпульсним завадам (ПІЗ), створеним комутаційними перенапругами (ПН) та атмосферними явищами.

Таким чином підвищення надійності роботи системи автоблокування в умовах впливу високих рівнів тягових струмів та потужних імпульсних завад є важливою науково-практичною задачею, вирішення якої дозволить організувати технологічний процес перевезень з максимальною ефективністю і безпекою руху поїздів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Робота виконувалася відповідно до пріоритетних напрямів розвитку залізничного транспорту, що визначені у Постанові Кабінету Міністрів України від 16.12.2009 р. про реформування залізничного транспорту, Стратегії розвитку залізничного транспорту України до 2020 року, Програмі підвищення безпеки руху на залізницях України, затвердженої наказом Укрзалізниці № 547-Ц від 15.10.2001 року, а також пов'язана з НДР «Підвищення безпеки мікропроцесорних систем автоматики й забезпечення їх електромагнітної сумісності з новими типами рухомого складу для магістралей із прискореним та швидкісним рухом поїздів» (номер державної реєстрації НДР 0108U003066) та «Дослідження і розробка інтегрованої комп'ютерної

системи оптимізації перевезень, енергозбереження, безпеки руху та інтелектуалізації процедур управління залізничним транспортом України» (номер державної реєстрації НДР 0114U005164), у яких дисертант є співавтором звіту з НДР.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження дисертаційної роботи є підвищення надійності системи АБ в умовах впливу високих рівнів тягових струмів та потужних імпульсних завад.

Для досягнення зазначеної мети в дисертації необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз статистики відмов пристроїв СЦБ та розглянути особливості роботи РК в умовах впливу високих рівнів тягових струмів, а також здійснити аналіз методів засобів захисту (ЗЗ) апаратури ЗАТ;

- провести аналіз впливу високих рівнів тягових струмів асиметрії на апаратуру систем АБ та вдосконалити методи дослідження розповсюдження потенціалів та струмів у рейковій мережі перегону та вибору найбільш доцільного розміщення урівнюючих дроселів, що забезпечують потрібний рівень теплових режимів роботи елементів РК;

- розробити математичну модель для дослідження параметричного генератору (ПГ) частоти на неколінеарних магнітних полях, що працює у режимі повторення частоти і використовується як ЗЗ від впливу атмосферних явищ та комутаційних перенапруг тягової мережі;

- провести експериментальні дослідження макетного зразку ПГ, що використовується як вторинне джерело живлення пристроїв ЗАТ;

- провести оцінку підвищення надійності роботи системи АБ та провести економічний розрахунок ефективності впровадження ПГ.

Об'єкт дослідження – процес роботи рейкових кіл в умовах впливу ПЗ та високих рівнів тягових струмів.

Предмет дослідження – методи та засоби підвищення надійності роботи рейкових кіл, завадостійкості та безпеки систем автоматики і телемеханіки.

Методи дослідження. Використані методи розв'язання лінійних та нелінійних диференціальних рівнянь ПГ; аналізу та синтезу електротехнічних розрахунків схем

РК; математичного моделювання, теорії ймовірностей; фізичного моделювання; методів однорідних та неоднорідних ланцюгових схем; числових розрахунків; лабораторних і експлуатаційних випробувань запропонованих та синтезованих засобів та способів.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання підвищення надійності системи автоблокування в умовах впливу високих рівнів тягових струмів та потужних імпульсних завад.

Вперше:

- розроблено математичну модель параметричного генератору з неколінеарними магнітними полями, що використовується у якості джерела живлення та захисного засобу апаратури рейкових кіл від впливу атмосферних явищ та комутаційних перенапруг, що дозволило дослідити його параметри та характеристики і розробити дослідний зразок параметричного генератору.

Удосконалено:

- пристрій параметричного генератору, що відрізняється наявністю енергоємних елементів, які значно покращують властивості та енергетичні характеристики;

- метод розрахунку розповсюдження потенціалів та струмів у рейковій мережі перегону для електричної тяги постійного струму, що відрізняється представленням загальної цепної схеми кожної рейки в якості чотириполосників з урахуванням заземлення опор контактної мережі на крайні рейки, що дозволило оцінити рівні струмів асиметрії, які відгалуджуються в апаратуру рейкових кіл;

- метод пошуку найбільш доцільних місць розміщення урівнюючих дросель-трансформаторів, що дозволяє захистити колійні елементи рейкових кіл систем залізничної автоматики та телемеханіки від впливу високих рівнів тягових струмів.

Знайшли подальший розвиток:

- способи захисту апаратури залізничної автоматики та телемеханіки від впливу високих рівнів тягових струмів та потужних імпульсних завад, що дозволило підвищити надійність системи автоблокування.

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

- при проектуванні та переобладнанні перегонів новими системами ЗАТ;
- для оцінки впливу високих струмів асиметрії на роботу пристроїв апаратури систем ЗАТ;
- для організації стабілізованого електроживлення колійних та станційних пристроїв систем ЗАТ;
- для захисту апаратури від дії потужних імпульсних завад, створених комутаційними перенапруженнями або грозовими розрядами і блискавками.

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри АТЗ ДНУЗТ.

За результатами дисертації на заводі «Трансв'язь» (м. Харків) виготовлено зразки параметричного генератора частоти ПГ 50:50, які пройшли випробування в заводських умовах, у науково-дослідній лабораторії кафедри АТЗ ДНУЗТ та були передані до шостої дистанції сигналізації та зв'язку Придніпровської залізниці.

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

У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному.

У статті [82] проведено тягові розрахунки та розрахунки теплових режимів роботи дросель-трансформаторів ДТ-0,2(0,6)-1000, дросельних та міждросьельних перемичок. У роботі [83] приведені експериментальні дослідження параметрів та характеристик параметричного генератора (ПГ) та здійснено дослідження нелінійного диференційного рівняння з використанням апроксимації кривої намагнічення за допомогою гіперболічного синусу. У роботі [111] отримано епюри розповсюдження струмів та потенціалів уздовж рейок для електричної тяги постійного струму. У роботі [86] отримано діаграму нестійкості рішення нелінійного диференційного рівняння другого порядку. У роботі [93] здійснено

математичне моделювання вихідного кола ПГ з використанням апроксимації кубічним поліномом. У роботі [64] запропоновано послідовне увімкнення додаткових резисторів у колах накачки та контуру. У роботі [65] запропоновано зміну схеми увімкнення витків обмотки накачки з метою покращення характеристик ПГ.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на таких конференціях: міжнародна науково-практична конференція «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті EMCS-R 2010, 2011», «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті S&EMC 2012», 74 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Конференція молодих учених «Інформаційно-управляючі технології і системи на залізничному транспорті 2012», Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми розвитку інтелектуальних систем транспорту 2014», У повному обсязі робота доповідалася і була схвалена на міжкафедральному науковому семінарі 26 червня 2015 року.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 29 наукових праць: 8 наукових статей, з них 5 у фахових виданнях, затверджених атестаційною комісією Міністерства Освіти і Науки України, 5 патентів на корисну модель, 1 патент на винахід, 15 тез конференцій.

РОЗДІЛ 1 АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ ЗАХИСТУ АПАРАТУРИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ ТА ТЕЛЕМЕХАНІКИ ВІД ВИСОКИХ РІВНІВ ТЯГОВИХ СТРУМІВ ТА ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД

Сучасні умови роботи залізниць, підвищення швидкостей та інтенсивності руху поїздів вимагають автоматизації управління процесом перевезень, для чого необхідне підвищення стійкості електропостачання пристроїв ЗАТ, яка визначається надійністю роботи електропостачання пунктів і ліній живлення автоблокування (АБ), а також окремих їх елементів [49, 50]. Системи залізничного транспорту, що наразі застосовуються і набули широкого застосування, передбачають використання електронної апаратури, що зумовлює забезпечення відповідного захисту від впливу високих рівнів тягових струмів та від ПЗ, які можуть бути викликані як дією грозових розрядів, блискавок, так і комутаційними перенапруженнями та короткими замиканнями тягової мережі.

Разом з тим, сучасні ЗЗ достатнього захисту не забезпечують, а економічні втрати від пошкоджень, викликаних дією ПЗ та тяговими струмами високих рівнів, є досить великими. Внаслідок протікання струмів та напруг високих рівнів в колах технічних засобів виникають не тільки пробій ізоляції, теплове та/або динамічне руйнування, такі процеси провокують ураження електричною енергією обслуговуючого персоналу, що є неприпустимим.

Як відомо, кожен технічний засіб характеризується стійкістю по відношенню до електромагнітних впливів, тобто здатністю витримувати перевантаження по напрузі та струму. Це передбачає застосування методів і технічних засобів захисту пристроїв від впливу електромагнітних випромінювань, що перевищують рівні робочих сигналів у багато разів. Такі енергії впливають на технічні засоби, наприклад, при прямих ударах блискавки в об'єкт. При віддалених грозових розрядах енергія, що руйнує виводи та ізоляцію пристроїв, може передаватися по високовольтній лінії електропередачі, повітряній або кабельній лінії зв'язку, а також по рейках.

1.1 Статистичий огляд відмов систем автоматики, телемеханіки та зв'язку

Найбільших збитків господарству СЦБ та зв'язку завдають відмови, що трапляються у літній період від імпульсних перенапруг, що створюються грозовими розрядами. По причинах термічної дії тягового струму на елементи апаратури РК відбуваються великі затримки поїздів на перевальних ділянках з крутим профілем доріг. За умов проявлення вище згаданих відмов електротехнічне устаткування АБ працює у гранично допустимих режимах електричних та термічних впливів, що супроводжуються відмовами.

На лінії електропостачання АБ приходиться 10-12 прямих ударів блискавки на кожні 100 км при 30 грозових годинах. За дослідженнями [45] відключення ненавантажених або мало навантажених трансформаторів супроводжується імпульсною напругою, величина якої перевищує у 3-5 разів номінальну напругу лінії. На дію грозових розрядів приходиться біля 40 % пошкоджень, пов'язаних із ВЛ СЦБ [71].

Статистика відмов по Службі сигналізації та зв'язку (рис. 1.1) свідчить про те, що на вплив грозових та комутаційних перенапруг припадає 13,36 %, що є досить вагомим показником. На дорогах трапляються випадки [126], коли фіксується 95 уражень пристроїв СЦБ, у 12 з яких з ладу вийшла наступна група пристроїв: 50 блоків БС-ДА, 8 трансмітерних реле Т, 25 аварійних реле АСШ-220, велика кількість розрядників та ін. Проблема грозозахисту є актуальною по всьому світу, наприклад, у США (штат Флорида) у розрахунку на квадратну милю у грозовий період трапляється більше 12 ударів блискавки.

У зв'язку з цим очевидно є актуальна гострота проблеми грозозахисту, особливо враховуючи прискорене освоєння мікроелектронних систем ЗАТ. Такі системи хоча і надають процесу керування функціональних переваг, але відрізняються більшою чутливістю до перехідних процесів атмосферної електрики (ПЗ), що викликають скидання інформації або пошкодження. Звідси ряд країн – США, Канада, КНР, Україна, Росія та ін. – проводять численні дослідження з метою вдосконалення конструкції ЗЗ (кремній-оксидних розрядників, пристроїв заземлень

(«решітки» Фарадея) та ін.). Якщо при дво-три ступеневому захисті об'єкту загасити до 30 % енергії завади, то захист є цілком задовільним.

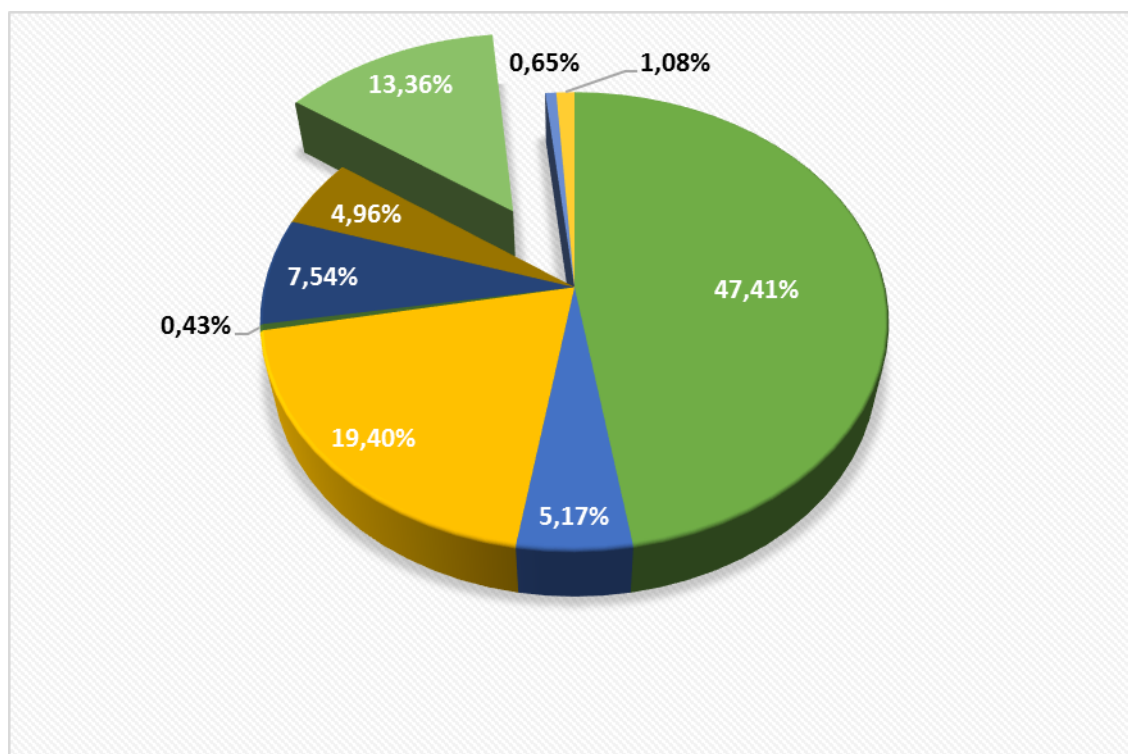


Рисунок - 1.1 Діаграма розподілу відмов по службі Ш

47,41 – порушення технології виконання робіт; 5,17 – неякісний ремонт та перевірка приладів у РТД; 19,4 – фізичне старіння приладів; 0,43 – схемний недолік; 7,54 – причина не виявлена; 4,96 - конструктивно-заводський недолік; 13,36 – вплив грозових та комутаційних перенапруг; 0,65 - розкрадання
1,08 – стихійні лиха

До статистики по відмовам та часу відновлення додатково скористаємося статистичними даними. Отримані інтенсивності відмов використані нами для оцінки ефективності функціонування системи АБ і оптимізації параметрів процесу профілактики та ін. Щільність розподілення часу відновлення відмов T_B сигнальної установки може бути представлена законом Ерланга другого порядку:

$$f(T_B) = \frac{4}{m^2} \cdot T_B \cdot (\exp \frac{2 \cdot T_B}{m}), \quad (1.1)$$

де m – математичне очікування часу відновлення для ділянок системи

автоматики та телемеханіки (А і Т), що досліджуються (1-2 год.). Потрібно зауважити, що час безвідмовної роботи пристроїв АБ та ЕЦ підпорядковується Пуассонівському потоку (стаціонарному, без наслідків) зі щільністю розподілення

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda t), \quad (1.2)$$

де λ - інтенсивність відмов, $\frac{1}{\text{год}}$;

середній час безвідмовної роботи пристроїв $T_0 = \frac{1}{\lambda} = \int_0^t (1-F(t))dt$,

$F(t)$ - функція розподілення цієї випадкової величини.

Потрібно виділити відмови пристроїв, що здебільшого відмовляють при грозових ударах [61], це аварійні реле АСШ-220, блоки БС-ДА, трансмітери КПТШ, діодні схеми та ін.

На основі досвіду експлуатації систем ЗАТ врахуємо, що наслідки поодинокі захисної відмови, що проявляється у вторинних затримках руху поїздів після відновлення системи, не перевищує 2-3 годин, тобто порушення графіку руху поїздів, викликаних поодинокими відмовами сигнальної установки при грозах, усуваються не пізніше 3 годин. Приймаючи це до уваги, а також порядок параметру закону розподілення часу безвідмовної роботи системи і часу відновлення (експоненційної), вірогідність відмови двох або більше сигнальних установок протягом доби на ділянці дуже мала.

Ця вірогідність для звичайних умов експлуатації може бути знайдена з наступного співвідношення:

$$Q_2(t) = 1 - [1 - q(t)]^m - mg(t)[1 - q(t)]^{m-1}, \quad (1.3)$$

де $q(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \approx \lambda t$ - вірогідність відмови апаратури сигнальної установки за час t ;

λ - інтенсивність відмови сигнальної установки.

Підставляючи у приведену формулу верхнє значення інтенсивності відмов апаратури сигнальної установки $\lambda = 10^{-5} \frac{1}{\text{год}}$, якщо $m = 59$ (кількість сигнальних

установок на 100 км дороги), довжина блок-ділянки прийнята 1,75 км. Тоді $q(t) = 0,00075$, $mq = 59 \cdot 0,00075 = 0,042 \ll 1$. Звідси витікає, що вірогідністю виникнення двох або більше відмов за звичайних умов експлуатації можна знехтувати.

Між тим, розглядаючи відмови реле НР внаслідок дії грозового розряду, то на їх долю приходиться 18 % від загальної кількості відмов, а на відмови реле типів НШ та НМШ приходиться не більш 5 % загальної кількості відмов.

Сумарні інтенсивності відмов пристроїв, що виходять з ладу при грозах, складають $\lambda_{відм} \approx 16,1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{гроз.год}$, тоді як за звичайних умов експлуатації дають

величину $\lambda_{відм} \approx 5,9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{гроз.год}$.

1.2 Параметри грозового імпульсу як джерела виникнення ПЗ

Небезпека ушкодження апаратури і її кіл залежить від багатьох факторів, зокрема від параметрів грозового імпульсу [124, 119]. У цьому випадку необхідно визначити, які параметри грозового імпульсу (в першу чергу амплітуда і крутизна фронту) слід приймати до уваги. Однак у документах можливість варіювати параметри грозового імпульсу або зовсім не згадується, або розглядається недостатньо. Так, у [124] наводиться тільки 3 можливих набори параметрів грозового імпульсу (струми 200, 150 і 100 кА), що відповідає даним міжнародних стандартів [119], наведеним дані по ймовірностям виникнення блискавки, однак для вибору надані ті ж три набори струмів. Звідси випливає, що, наприклад, для об'єктів електроенергетики, використовується лише один профіль зі струмом 100 кА. Для промислових об'єктів ймовірність ураження блискавкою є досить високою (кілька ударів блискавки на рік). За весь термін служби такого об'єкту можливим є принаймні один розряд блискавки зі струмом 135 кА [119,113].

Основними параметрами, які характеризують струм блискавки, є максимальне значення імпульсу струму, крутизна фронту струму блискавки, тривалість фронту

імпульсу і тривалість повного імпульсу, яка дорівнює часу зменшення струму до половини максимального значення [107]. Тривалість імпульсу струму блискавки в основному визначається як час поширення зворотного розряду від землі до хмари і становить від 20 до 80-100 мкс. Тривалість фронту імпульсу струму розряду блискавки становить 1,5-10 мкс. Середня тривалість імпульсу струму блискавки обирається до 50 мкс (рис. 1.2), що визначає вибір стандартного повного грозового імпульсу напруги, який застосовують при випробуваннях електричної міцності ізоляції обладнання [117]. Саме такий імпульс напруги повинна витримувати ізоляція об'єкту енергетики при ударі блискавки.

За умовами захисту вторинних кіл і апаратури від вторинних проявів розрядів блискавки, важливими параметрами є тільки струм блискавки і тривалість фронту [30]. Слід зазначити, що середня крутизна фронту безпосередньо пов'язана з тривалістю фронту і можливим є розгляд або крутизни фронту або його тривалості.

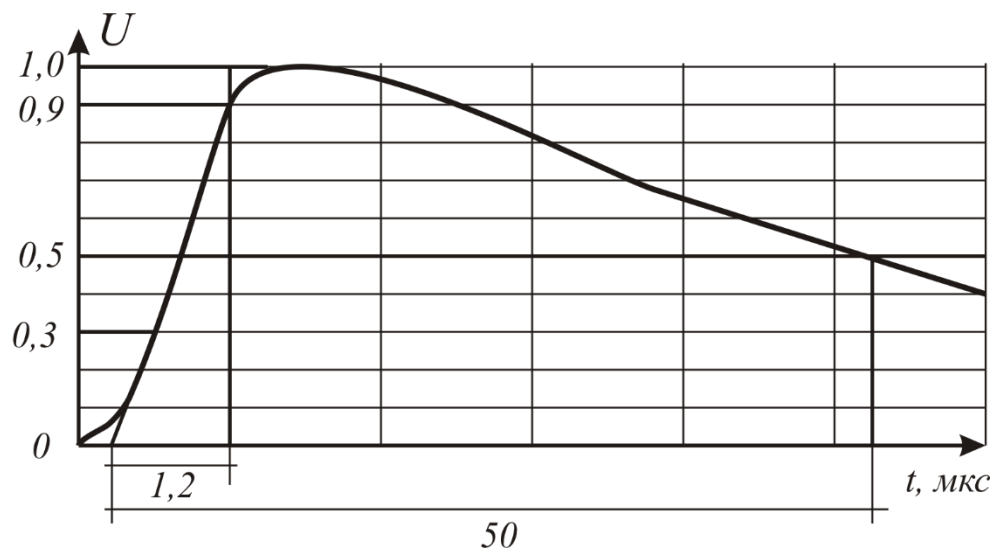


Рисунок 1.2 - Форма стандартного грозового імпульсу напруги

У гірських місцевостях амплітудні значення струмів блискавки знижуються приблизно в 2 рази порівняно з амплітудними значеннями на рівнинних місцевостях [124]. Це пояснюється зменшенням відстані від землі до хмар. При менших відстанях блискавки виникають при менших скупченнях зарядів на хмарах, саме що

і призводить до зниження амплітудних значень струмів блискавки [116]. У гірській місцевості висхідні блискавки характеризуються більш тривалими безперервними струмами і більшими зарядами, що вони переносять, аніж на рівнині [126].

Як бачимо, грозовий імпульс є дуже потужним і достатнім для виводу з ладу апаратури залізничної автоматики та систем електропостачання. Цей вплив може здійснюватися не тільки на саму апаратуру, пошкоджуючи та руйнуючи її, а й на обслуговуючий персонал, що є недопустимим. Наразі постає питання чи витримуватимуть існуючі ЗЗ такі високі рівні струмів, особливо у гірській місцевості, яка, як відомо, характеризується підвищеною грозовою активністю.

1.3 Механізм впливу грозових розрядів на апаратуру електроживлення та захисту систем автоматики

Найбільш небезпечним є прямий удар, за якого канал блискавки проходить безпосередньо через об'єкт, що знаходиться на поверхні землі, а струм блискавки досягає 200 кА, напруга 150 МВ, температура каналу - 6000-30000 С°.

Непрямий удар блискавки характеризується виникненням індукованих напруг у металевих частинах пристроїв [23]. Наприклад, при розряді блискавки на відстані 1000 м від високовольтної сигнальної лінії автоблокування (ВЛ АБ), напруга, індукована у високовольтних проводах, може досягати величини 21 кВ.

Аналіз даних по впливу ударів блискавки показує, що індуковані ПН і струми становлять найбільшу небезпеку для пристроїв СЦБ, оскільки вони виникають значно частіше, ніж прямі удари блискавки і несуть в собі досить велику енергію [61]. Тому необхідні надійні пристрої захисту від атмосферної електрики.

Лінія автоблокування є дуже вразливою до впливу атмосферної електрики. У проводах цієї лінії виникають короткочасні електромагнітні хвилі, амплітуда яких в десятки і сотні разів перевищує робочу напругу лінії, що становить небезпеку для лінійного обладнання сигнальних установок і силових трансформаторів.

Як зрозуміло, увесь електротехнічний комплекс: ВЛ АБ, трансформатори ОМ, апаратура захисту, що використовуються в системі основного живлення (10 кВ),

працює у складній електромагнітній ситуації електростатичного та електромагнітного впливу контактної мережі, ліній електропередачі високої і надвисокої напруги й атмосферної електрики.

Короткочасні імпульси напруг, зумовлені комутаційними процесами і грозовими розрядами можуть у багато разів перевищувати нормальні напруги [55] і поширюються по ВЛ електропередачі зі швидкістю, близькою швидкості світла, і досягають підстанцій, релейних шаф (РШ), постів електричної централізації (ЕЦ) зі встановленим на них обладнанням [33, 34].

1.3.1 Особливості апаратури живлення та захисту пристроїв СЦБ

Досвід експлуатації показує, що на відмови автоматичного вимикача багаторазової дії (АВМ) при короткому замиканні припадає 8,62 % від дії загальної кількості відмов; від тягового струму - 16,38 %; дії грози - 12,93 % [61].

Найбільш схильними до впливу грозових та комутаційних ПН є напівпровідникові пристрої (блоки БС-ДА, аварійні реле та ін). На відмови дешифраторних блоків БС-ДА припадає 26 % відмов від загальної кількості відмов у грозовий період з травня по серпень. Внаслідок надходження напруги через трансформатор типу ОМ до низьковольтних кіл основного та резервного живлення пристроїв АБ, а також трансформації енергії ПН з РК через колійний трансформатор типу ПОБС-3, спричиняються відмови діодів Д242А, пробій яких може стати причиною перегорання обмотки трансформатору СОБС-2А, внаслідок чого буде відсутнє показання світлофору, що здійснює істотний вплив на безпеку руху [91, 92].

Як показує практика, амплітуда наведених ПН у колах постійного струму може досягати 400 ± 800 В, величина якої є достатньою для руйнування напівпровідників у блоках БС-ДА. Для захисту діодів та лінійних кіл живлення від ПН передбачені вирівнювачі. Статистика експлуатації показує, що 52 % відмов діодів відбувалося за відсутності захисту вирівнювачами, але 48 % відмов сталися за

наявності вирівнювачів. Цей факт вказує на недоліки типових пристроїв захисту [61].

Слід додати, що на відмови аварійних та трансмітерних реле припадає більше 28 % від загальної кількості відмов від ПН у грозовий період.

Вентильні розрядники типу РВНШ-250(500) є найпоширенішими засобами захисту від ПН пристроїв сигнальної установки. Розрядник РВНШ-250(500) забезпечує захист електричних кіл з робочою напругою до 360 В, чого явно недостатньо для їх справної роботи [99, 100].

Якщо розглянути більш пізні розробки 33 пристроїв СЦБ, то потрібно зауважити про розрядники РКН-600 як заміну розрядників типу РВНШ-250 в колах захисту введів живлення і колах вводу-виводу. Розрядник РКН призначений для захисту ізоляції апаратури від змінного струму з напругою ПН до 250 В, а постійного - з напругою до 120 В, що виникають в результаті грозових розрядів і комутаційних процесів у лініях електроживлення.

Також з кінця 90-х випускаються тиристорні пристрої типів ЗТ-1(2), які призначені для захисту апаратури у рейкових колах змінного струму з частотою до 75 Гц і робочою напругою до 220 В (УЗТ-1) або до 60 В (УЗТ-2) від комутаційних ПН, що виникають при аварійних режимах роботи тягової мережі. З 1996 року випускається розрядник керамічний РКВН також замість розрядника РВНШ-250.

Керамічні вирівнювачі типу ВК-10 випускаються з 1973 року замість вирівнювачів ЗНО та ВНД. Вирівнювачі нелінійні дводискові типу ВНД і однодискові типу ЗНО призначені для захисту колійних приладів автоблокування на неелектрифікованих ділянках залізниць. Вирівнювач ВНД встановлюють на живильному кінці рейкового кола (РК) АБ, а ЗНО на приймальному [99, 100].

При електротязі змінного струму прилади автоблокування і автоматичної локомотивної сигналізації також захищають від ПН, що виникають в силових колах напругою 110/220 В за рахунок розрядників і вирівнювачів. Колійні прилади РК захищають від комутаційних ПН, викликаних короткими замиканнями контактної мережі змінного струму. На живильному кінці РК паралельно обмоткам ізолюючих

трансформаторів включають вирівнювачі типу ВС-220, а на приймальному - вирівнювачі типу ВС-90.

Лінійні кола на ділянках з автономною тягою захищаються з обох кінців кабельного вводу за допомогою вентилярних розрядників або газонаповнених розрядників Р-35 або Р-350.

Для захисту від ПН напівпровідникової апаратури СЦБ призначені вирівнювачі різних типів. Вирівнювачі ВОЦШ-220 і ВОЦШ-110 призначені для захисту від ПН напівпровідникової апаратури СЦБ та зв'язку в електричних колах з номінальною напругою 220 і 110 В змінного струму частотою 50 Гц.

Усі вище перераховані ЗЗ від дії ПН, як показав досвід експлуатації систем А і Т, за тепловими характеристиками не відповідають вимогам по термічній стійкості, встановленій проектним нормативом [20], тому проблема захисту апаратури РК від дії ПН є актуальною.

Одним із сучасних і ефективних засобів захисту є параметричний генератор (ПГ) частоти на неколінеарних магнітних полях. ПГ забезпечує роботу пристроїв СЦБ, що працюють за надзвичайно складних експлуатаційних умов: потужних імпульсних електромагнітних завад, створених у колах первинних джерел живлення, грозових розрядів; великих перепадів температур навколишнього середовища; вібрацій і т.д. В якості проектно-конструктивного параметру [45, 46] прийняте значення інтегралу Джоуля $\int_0^{\infty} i^2 dt = 55 \text{ кДж}$. Дослідження показали, що у вище перерахованих пристроїв ЗАТ цей інтеграл дорівнює 2,5-8 кДж.

Найбільш важливими вимогами, що висуваються до вторинних джерел живлення (ВДЖ) є забезпечення високої стабільності живлячої напруги (1-3%) в умовах значних коливань напруги первинних джерел; відсутність пульсацій вихідної напруги, тобто фільтрація гармонік, захист навантаження від температурних змін зовнішнього середовища і, звичайно, від ПН і короткого замикання.

Найбільш відповідальним і складним вузлом ВДЖ є стабілізатори напруги. Існуючі стабілізатори за способом стабілізації напруги поділяють в основному на

параметричні та компенсаційні. До параметричних відносяться ферорезонансні стабілізатори напруги і струму, пристрої з термоопорами, стабілітронами та ін. Компенсаційні стабілізатори напруги представляють собою систему автоматичного регулювання, що компенсують по колу негативного зворотного зв'язку всі дестабілізуючі впливи, які змінюють вихідну напругу [33, 34]. Як джерело опорної напруги використовується стабілітрон, а як регулюючий елемент - як правило, транзистор.

Крім трансформатора (дроселя) і стабілізатора, ВДЖ містить фільтр, випрямляч, пристрій захисту від перенапруг і перевантажень і т.д., тому ВДЖ являє собою багатокомпонентну електромагнітну систему, складну в налаштуванні і експлуатації, і яка поступається параметричним індуктивним стабілізаторам по надійності роботи, особливо при їх використанні в пристроях залізничної автоматики. Аналіз відмов напівпровідникових ВДЖ показує, що вони не в повній мірі відповідають перерахованим вище вимогам.

З параметричних пристроїв ВДЖ, виконаних на феромагнітних елементах [9], найбільш відомі індуктивні параметрони з виходом на другу субгармоніку. Завдяки високій надійності, простоті конструкції, високій мірі стабілізації, здатності протистояти впливу ПЗ - такі параметрони ПЧ50:25 частотою 25Гц знайшли з 1963 року широке застосування в системах ЗАТ [102].

Тривалий досвід експлуатації параметричних перетворювачів частоти 50/25 Гц на дорогах Радянського Союзу і країн СНД підтвердив їх переваги, високу надійність, захищеність колійних приймачів від потужних перешкод тягового струму та ефективність використання для живлення РК систем ЗАТ. При цьому вдало використано цінна властивість перетворювачів - практично повна відсутність і неможливість виникнення в спектрі вихідної напруги гармонік, однакових з гармоніками тягового струму. Остання властивість надає ВДЖ параметричній дії досить цінну якість і для живлення схем рейкових кіл, колійних приймачів тональної частоти.

Як відомо, ТРК, що широко впроваджуються на дорогах України та країн СНД, мають низький коефіцієнт повернення колійних приймачів (КПП), що істотно

знижує ефективність ТРК - зменшення граничної довжини, ступеня контролю основних режимів, що відповідають за безпеку руху поїздів. Більш того, напівпровідникова апаратура ТРК слабо захищена від перешкод тягового струму та грозових розрядів, що пояснюється тим, що існуючі ЗЗ не відповідають нормам по граничній потужності гасіння енергії перешкод, особливо від грозових розрядів і короткого замикання контактної мережі.

У зв'язку з цим є актуальною розробка параметричного індуктивного ВДЖ для живлення ТРК, який, поряд з іншими вимогами до ВДЖ, вирішив би дві основних проблеми - підвищення коефіцієнта повернення приймача і захист апаратури від ПЗ по мережі живлення.

Розглянемо умови роботи та захист понижуючих трансформаторів ОМ, що підключаються до ВЛ СЦБ. Як відомо, пристрої ЗАТ на перегонах і на малих станціях, отримують живлення від ВЛ АБ напругою 10 кВ і резервних ліній поздовжнього електропостачання напругою 10 кВ, 27.5 кВ або 35 кВ через однофазні понижуючі трансформатори типу ОМ, що є пристроями з розподіленими параметрами і які складним чином взаємодіють з грозовими та комутаційними ПН. В основному така взаємодія закінчується відмовою трансформатору [105]. Для обмеження впливу прямих ударів блискавки у трансформаторів ОМ верхній провід ВЛ АБ використовується як захисний. Крім того, на тій же силовій опорі встановлюються два високовольтних розрядника типу РВП для захисту трансформатора від поздовжніх перенапружень в ВЛ АБ (між проводом і землею). Досвід експлуатації трансформаторів ОМ [58] показує, що найбільше число їх ушкоджень відбувається у літній грозовий період (в середньому по дистанціям електропостачання число ушкоджень збільшується у 3 рази).

При використанні іскрових проміжків (дугозахисних «рогів»), у процесі дуговідводу відбувається їх інтенсивне обгорання. Але крім цього мається одна технічна обставина, яка ставить під сумнів працездатність даного грозозахисного обладнання навіть в початковому задуманому вигляді. Дугові замикання можуть супроводжуватися струмами різної величини, а можливість виходу дуги на «роги», в силу електродинамічних закономірностей і конструктивних параметрів системи,

з'являється лише при струмах, переважаючих 1-2 кА. Відповідно, при менших струмах дуга не виходить на «роги», і це викликає небезпеку перепалу дроту. Така аварійна можливість з'являється, наприклад, навіть при КЗ, викликаному одночасним перекриттям ізоляторів декількох фаз на одній опорі при прямому ударі блискавки в лінію, на видаленні декількох кілометрів від живильної підстанції. При індукованих перенапругах виникнення КЗ взагалі мало ймовірно, так як в цьому випадку значно частіше відбуваються перекриття різнойменних фаз не на одній, а на різних опорах. Це означає, що при індукованих перенапругах струми дугових замикань, практично, завжди будуть обмежуватися опорами заземлення опор і не перевищуватимуть 500 А, а при таких струмах дуга завідомо не здатна вийти на «роги», і система не забезпечує захист проводів від перепалу.

Іскрові проміжки (ІП) мають цілу низку недоліків, а саме:

- спрацювання ІП призводить до короткого замикання;
- при перехідному процесі можуть виникнути перенапруги на поздовжній ізоляції трансформаторів, реакторів і електричних машин;
- великий статистичний розкид пробивних напруг ускладнює координацію ізоляції та ін.

Для захисту вимірювальних трансформаторів напруги випускають запобіжники типу ПКН. Запобіжники ПКН 001-10 УЗ з кварцовим наповнювачем є струмообмежуючими приборами. Запобіжники типів ПКН 011-10 і ПКН 011-12 можуть використовуватися для захисту силових трансформаторів потужністю 1,25 кВА з номінальною напругою 6 кВ. Запобіжники типів ПКН 011-35 і ПКН 011-36 можуть використовуватися для захисту силових трансформаторів потужністю 4 кВА з номінальною напругою 27,5 кВ і трансформаторів потужністю 10 кВА з номінальною напругою 35 кВ.

Запобіжники, що встановлюються на стороні високої напруги силового трансформатора, повинні вибиратися, виходячи з умови селективності із запобіжниками, встановленими на стороні низької напруги з урахуванням очікуваних струмових перевантажень і очікуваних струмів відключення. При наявності струмів перевантаження трансформатора, здатних розплавити плавкий

елемент запобіжника, величина яких менше мінімального струму відключення запобіжників, повинна бути передбачена додаткова апаратура, яка здатна відключити ці струми. Запобіжники ПКН за умовами експлуатації є вібростійкими і допускають механічні дії одиничних ударів з прискоренням $3g$ і тривалістю не більше 20 мс, та вібрацію в діапазоні частот від 0,5 до 100 Гц з амплітудою прискорення $1g$.

Відключення струму короткого замикання в запобіжниках з кварцовим піском забезпечується за рахунок інтенсивної деіонізації дуги, що виникає на шляху пролягання плавкою вставки, у вузьких щілинах між піщинками наповнювача. Спрацьовування патрона визначається в запобіжниках ПКН 001-10 УЗ по відсутності показання приладів, включених в коло трансформатора напруги. На відміну від запобіжників ПКТ ПКН мають константову плавку вставку, намотану на керамічне осердя.

Така вставка володіє більш високим питомою опором, завдяки цьому та малому перетину вставки забезпечується струмообмежувальним ефект.

Запобіжники ПКН можуть бути встановлені в мережі з вельми великою потужністю короткого замикання ($1000 \text{ МВ} \times \text{А}$), а потужність, що відключається посиленими запобіжниками ПКНУ взагалі не обмежується. Запобіжники ПКН порівняно з ПКТ мають менші розміри і не забезпечені показчиком спрацьовування (про перегорання плавкої вставки можна судити за показниками приладів, підключених зі сторони вторинної обмотки боку трансформаторів напруги).

У зв'язку з нормативами, орієнтованими на застосування на ВЛ 6, 10 кВ захищених проводів, технічні вимоги до блискавкозахисту повинні враховувати обов'язкове застосування грозозахисних засобів на ВЛЗ, що проходять по відкритій і високій місцевості, а також в інших зонах з числом грозових годин у році понад 40. На ВЛЗ 6-10 кВ, що проходять по населеній місцевості з грозовою діяльністю 20 грозових годин і більше, необхідно передбачати установку для захисту від грозових ПН.

Незважаючи на багаторічний досвід експлуатації, перераховані вище засоби грозозахисту, є недостатньо надійними та ефективними. Крім того, вони вимагають

періодичної перевірки [97] і самі можуть стати причиною загоряння обладнання напівпровідникових елементів, пробоїв ізоляції обмоток трансформаторів [24], прожогів штепсельних плат реле та ін. Іноді спрацьовування вирівнювачів і розрядників приводить до виходу з ладу кабелю живлення, оплавленню монтажу і навіть загоряння релейних шаф, що погіршує ситуацію і збільшує тривалість відмови.

Існуючий досвід застосування ЗЗ від ПІЗ, зокрема від грозових ПН ВЛ, показує, що такий захист з точки зору своїх технічних можливостей не може повною мірою задовольнити вимоги [43, 44, 47] відповідно до умов роботи на ПЛ при впливі грозових розрядів.

1.4 Механізм впливу ПІЗ на роботу пристроїв АБ

Імпульсні перебиття, руйнування ізоляторів, а також дугові замикання в основному виникають внаслідок дії ПІЗ, зокрема, грозових ПН на ПЛ. За статистикою відмов на аварійні відключення ВЛ 6, 10 кВ внаслідок грозових ПН припадає до 40% від загального числа їх відключень. А як зазначалося вище, виникнення ПІЗ у ВЛ СЦБ має тісний взаємозв'язок з апаратурою АБ. Це говорить про те, що проблема грозозахисту є дуже актуальною і досі відкритою, особливо у грозоактивних регіонах.

При розряді блискавки в об'єкт струм здійснює тепловий, механічний та електромагнітний впливи. При чому протікання струму блискавки супроводжується нагріванням струмовідводів до температури плавлення і навіть випаровування. Відповідно, в апаратурі автоматики, телемеханіки та зв'язку перетин провідників повинен бути обраний з розрахунком виключення небезпеки недопустимих перегрівів [29, 31], що зовсім не виконується.

Якщо розглядати можливі шляхи потрапляння ПІЗ в апаратуру СЦБ, то причинами можуть бути короткі замикання, комутаційні перенапруження у тяговій мережі, удар блискавки в контактну мережу [74]. Розглянемо один з таких прикладів, коли відбувається ушкодження ЗЗ струмами блискавок. Внаслідок цього

понижуючі трансформатори працюють у режимі короткого замикання у результаті їх шунтування струмами блискавок. Далі може бути декілька варіантів розвитку ситуації. Перший з них, найкращий, полягає у багаторазовому вимкненні і повторному ввімненні навантаження автоматом з тепловим розчеплювачем типу АВМ-1 (2) (в рейкових колах АБ), але при цьому створюється загроза електробезпеки людей. Це пов'язано з можливим створенням контуру для протікання струму короткого замикання від трансформатора типу ОМ через пробивний запобіжник ПП, одна з жил живлення якого підключена через розрядник РВНШ-250 до РШ. ПЗ проходить по опорі заземлювача, силовим опорам у РШ [45, 46]. Якщо опори заземлень високі, то ПЗ надходить безпосередньо до РШ і створюватиме смертельно небезпечні умови для обслуговуючого персоналу.

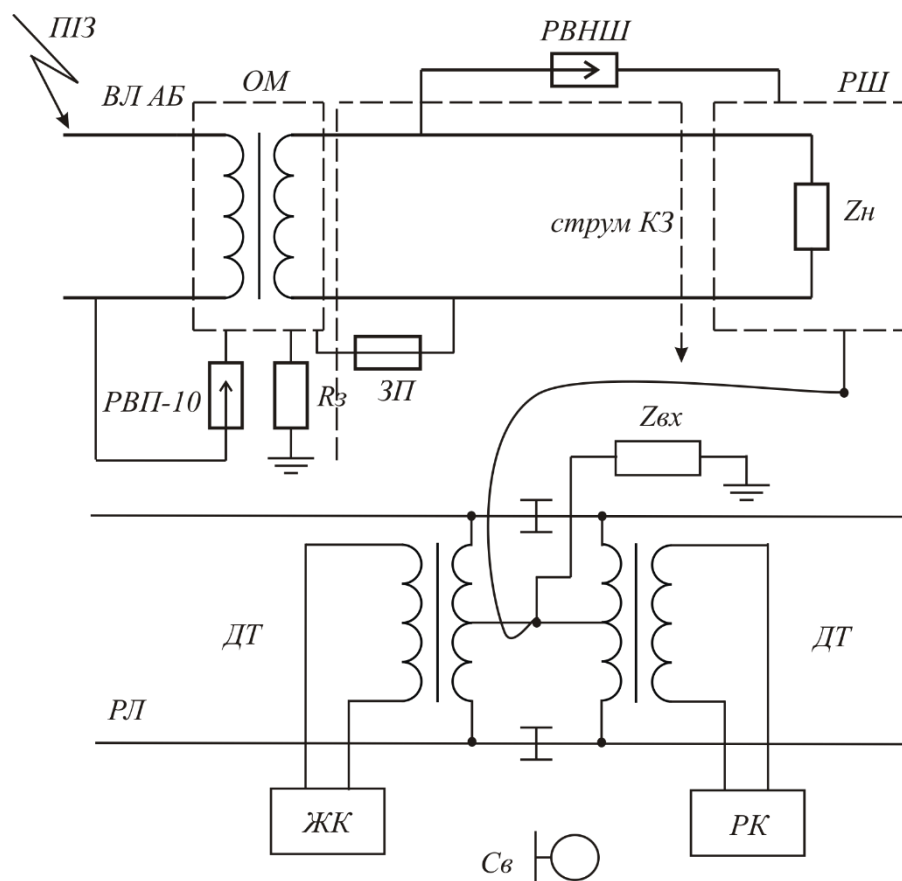


Рисунок 1.3 - Схема виникнення контуру заміщення струму КЗ трансформатора ОМ

Проведений аналіз показав, що причини низької перешкодозахищеності і стійкості пристроїв СЦБ до ПЗ мають комплексний характер, що складається з низки різноманітних факторів [97]. Високовольтний заземлювач R_3 (рис. 1.3) і низьковольтний Z_{Bx} (біля РШ) можуть істотно відрізнятися за параметрами провідності: у високовольтного заземлювача $G_3 = 0,25$ См, у рейок 10^{-1} См. Звідси і впливають причини ураження пристроїв СЦБ при прямих ударах блискавки в проводи ВЛ поблизу трансформатора ОМ. При попаданні блискавки спрацьовують розрядник РВП-10, запобіжник ЗП ($U_{np}=1,4...1,7$ кВ) і розрядник РВНШ-250 ($U_{np}=0,7...1,7$ кВ). Через них частина струму блискавки від заземлювача R_3 проникає в рейки (ненавмисний тракт струму блискавки). Цей висновок підтверджується досвідом експлуатації ЗЗ, який вказує на теплову причину виходу з ладу ЗЗ по живильній лінії і недосконалість захисних засобів [100].

Випадки теплового пошкодження ізоляції і жил кабелю струмами блискавки вкрай рідкісні. Тому, як зазначалося раніше, пропонується розглядати такі випадки як базові імовірнісного нормативу [45, 46] і на його основі визначити проектно-конструкторський норматив як межі теплової характеристики жили кабелю у

вигляді Джоулевого інтеграла $\int_0^{\infty} i^2 dt$ розмірністю A^2c .

Як показує практика, жила кабелю марки СПБУ діаметром 1 мм витримує струм 16,5 кА тривалістю імпульсу 210 мкс, при цьому Джоулів інтеграл досягає 57200 A^2c ; вибух жили стається при 65050 A^2c . Пропонується значення Джоулевого інтеграла прийняти як проектний норматив.

Розрядник має Джоулів інтеграл - 2500 A^2c ; варистор, що використовується у приладах ВОЦШ-220, має теплову характеристику близько 2600 A^2c . Таким чином, можна з упевненістю стверджувати, що ЗЗ, які наразі застосовуються на залізниці, є непридатними для експлуатації, оскільки не виконують своїх захисних функцій у пристроях СЦБ.

Огляд вітчизняних і зарубіжних джерел інформації показав, що найкращою тепловою характеристикою володіють металооксидні варистори і металокерамічні розрядники (наприклад Р63, Р76), вони мають Джоулів інтеграл порядку $60 \cdot 10^3 \text{ A}^2\text{s}$.

Вище зазначено, що тональні рейкові кола (ТРК), що широко впроваджуються на дорогах України та країн СНД, мають низький коефіцієнт повернення колійних приймачів (КПП), що істотно знижує ефективність ТРК - зменшення граничної довжини, ступеня контролю основних режимів, що відповідають за безпеку руху поїздів. Більш того, напівпровідникова апаратура ТРК слабо захищена від тягового струму високих рівнів та грозових розрядів, що пояснюється тим, що існуючі пристрої захисту (ПЗС) не відповідають нормам по граничній потужності гасіння енергії перешкод, особливо від грозових розрядів і короткого замикання (КЗ) контактної мережі.

Істотна відмінність перетворювачів ПЧ50:50 від перетворювачів ПЧ50:25, полягає у відсутності постійної складової струму мережі, що негативно впливає на роботу силових трансформаторів поста централізації за рахунок підмагнічування і нагріву їх магнітопроводів.

Але найголовнішою особливістю та недоліком даного пристрою є наявність у конструкції обмотки зворотного зв'язку, через який потужна імпульсна завада може відразу проникнути у вихідну контурну обмотку. Тому виникає необхідність у розробці такого пристрою захисту апаратури від дії грозових розрядів та комутаційних перенапружень, який би не мав вище приведені серйозні недоліки.

1.5 Постановка задач дисертаційного дослідження

Згідно проведеного статистичного огляду відмов елементів апаратури РК від дії ПЗ, конструкції, особливостей та характеристик апаратури систем АБ та електроживлення пристроїв автоматики, що приведені вище, а також беручи до уваги схему проникнення ПЗ у вигляді грозового імпульсу, можна стверджувати, що питання захисту апаратури СЦБ від дії ПЗ у вигляді ПН або грозового імпульсу є невирішеним та дуже актуальним. Це особливо яскраво проявляється у

грозоактивних гірських регіонах, адже передбачається систематичний незапланований ремонт, заміна існуючого устаткування, що супроводжується великими економічними та трудовими затратами. Постає потреба у розробці заходів боротьби з боку рейок від ПЗ у вигляді комутаційних перенапружень та коротких замикань та з боку ВЛ СЦБ від грозових розрядів. Особливу увагу у дослідженнях цієї проблематики потрібно приділити гірській місцевості, на якій комутаційні ПН виникатимуть внаслідок наявності дуже великих підйомів, адже для рухомого складу потрібне дуже велике тягове зусилля, а отже і тяговий струм, а також, як зазначалося вище, гори є однією з найбільш активних грозових зон, тому апаратура РК потребує захисту. Тому необхідно:

1. Провести аналіз впливу високих рівнів тягових струмів асиметрії на апаратуру систем АБ та вдосконалити методи дослідження розповсюдження потенціалів та струмів у рейковій мережі перегону для оцінки рівнів струмів асиметрії, що відгалужуватимуться в апаратуру тональних рейкових кіл та здійснюватимуть вплив на роботу системи автоблокування, та вибору найбільш доцільного розміщення урівнюючих дроселів, що забезпечують потрібний рівень теплових режимів роботи елементів РК;

2. Розробити математичну модель для дослідження параметричного генератору (ПГ) частоти на неколінеарних магнітних полях, що працює у режимі повторення частоти і використовується як ЗЗ від впливу атмосферних явищ та комутаційних перенапруг тягової мережі, для цього вдосконалити його схему, враховуючи усі недоліки попередніх аналогів та розрахувати параметри, що надалі повинні уточнюватися експериментом та використовуватися при проведенні експлуатаційних досліджень;

3. Провести експериментальні дослідження макетного зразку ПГ, що використовується як вторинне джерело живлення пристроїв ЗАТ та як пристрій захисту апаратури РК від впливу ПЗ у вигляді грозових розрядів та блискавок.

4. Провести оцінку підвищення надійності роботи системи АБ та економічний розрахунок ефективності впровадження ПГ на залізницях України.

2 ПРОБЛЕМА ЗАХИЩЕНОСТІ АПАРАТУРИ АВТОБЛОКУВАННЯ ВІД ЗАВАД ТЯГОВОГО СТРУМУ НА ДІЛЯНКАХ ДОРІГ

На сьогоднішній день залізничний транспорт України зазнає модернізації та вдосконалення. Внаслідок розвитку економіки підвищується вантажообіг, зростають швидкості, збільшується пропускна здатність, тому висувуються більш жорсткі вимоги щодо безпеки руху. Модернізація є пріоритетним напрямком в забезпеченні високоефективного функціонування залізниці в цілому.

Та на цьому шляху в окремих випадках постають труднощі, що пов'язані з проблемами забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) пристроїв СЦБ та зв'язку, наприклад, з пристроями тягового електропостачання [37, 54] на ділянках доріг з крутим профілем.

ЕМС у першу чергу не забезпечується повною мірою через наявність деяких дестабілізуючих чинників, серед яких фігурує ПЗ. Якщо розглядати ПЗ як грозовий розряд, то найімовірніше він може потрапити до систем СЦБ, як зазначалося раніше, через апаратуру електроживлення АБ. Якщо розглядати ПЗ як комутаційні ПН та короткі замикання у силовому колі електровозів та тяговій мережі, то вони проникатимуть до апаратури АБ через рейки. У цьому випадку найбільш схильними до впливу обох видів ПЗ є гірські ділянки з крутим профілем, адже гори характеризуються не тільки підвищеною грозовою активністю, а й, на окремих ділянках, неможливістю забезпечення потрібних обсягів вантажообігу через круті підйоми і необхідність у споживанні рухомим складом дуже тягових струмів високих рівнів, які, у свою чергу, здійснюватимуть вплив на апаратуру СЦБ і, відповідно, на безпеку руху поїздів.

2.1 Дослідження роботи РК та системи АБ на перевальній ділянці з крутим профілем

Використання рейок для пропуску зворотного тягового струму висуває вимоги щодо забезпечення безвідмовної роботи пристроїв залізничної автоматики.

До основних факторів, що впливають на роботу РК, відносяться термічні, заважаючі, пошкоджуючі та параметричні. РК є самими ненадійними елементами залізничної автоматики і водночас від їхньої справної роботи залежить забезпечення технологічного процесу перевезення вантажів і пасажирів.

На перевальних гірських ділянках з крутим профілем робота РК дуже ускладнюється і є досить проблематичною, адже для створення достатнього для руху потягу тягового зусилля потрібно, як правило, декілька локомотивів. Це, у свою чергу, призводить до споживання рухомим складом великих тягових струмів, які здійснюватимуть термічний вплив на апаратуру СЦБ, і, відповідно, на режими роботи РК.

Питання впливу тягового струму на роботу РК досліджувалися в 70-х роках науковцями ВНІЖТу, зокрема М. В. Пенкіним [72]. Вченими було розроблено методика розрахунку дросель-трансформаторів (ДТ). Та дані розрахунки стосувалися застарілих ДТ, що на сьогоднішній день не використовуються на залізниці. Тому постала проблема дослідження теплових режимів роботи ДТ, що на даний час мають широке застосування на залізниці. Проблема є актуальною і потребує детального дослідження.

Потрібно провести дослідження термічного впливу, якого в значній мірі зазнає апаратура РК. Основними елементами, що зазнають термічного впливу, є дросель-трансформатори (ДТ), дросельні перемички (ДП) та стикові з'єднувачі (СЗ). Вище приведені елементи повинні володіти високою електропровідністю та термічною стійкістю для забезпечення коректної роботи РК.

Було розглянуто перевальну ділянку Лавочне – Бескид – Скотарське, що знаходиться в Карпатах. Ділянка є дуже проблематичною, адже знаходиться на підйомі 30.4 ‰ і для того, щоб розвинути достатнє для такого підйому тягове зусилля використовується чотири локомотиви типу ВЛ-11. Під час проведення тягових розрахунків [73, 41] силу, що потрібна одному електровозу на розрахунковому підйомі було визначено за формулою:

$$F_{кел} = \frac{Q(W_o'' + i_p) + P(W_o' + i_p)}{4}, \quad (2.1)$$

де F_{kel} – сила тяги, Н;

Q – фактична маса потягу, т;

i_p – питомий опір на розрахунковому підйомі, кг/т;

W_o'' – основний питомий опір рухові електровозу ВЛ-11;

W_o' – основний питомий опір рухові чотирьох основних вагонів на роликкових підшипниках;

P – вага електровозу ВЛ-11.



Рисунок 2.1 - Перегін «Бескид - Скотарське»

Внаслідок проведеного тягового розрахунку [21] було встановлено, що сила тяги одного електровоза дорівнює $F_{kel} = 374200$ Н, рівні тягових струмів складають 7200 А. Цей показник є дуже великим, адже в РК звичайних ділянок з електричною тягою постійного струму за нормальної роботи такий струм не спостерігається. Тому відразу постає питання термічного впливу на РК, а саме на ДП, СЗ та ДТ. Призначенням ДТ є пропуск зворотного тягового струму в обхід ізолюючих стиків та узгодження низькоомного опору рейкової лінії з високоомним опором живлячого кінця (ЖК) і релейного кінця (РК) [4, 5].

На перегоні, що розглядається, встановлені ДТ типів ДТ-0,6-1000 на ЖК та ДТ-0,2-1000 на РК. ДТ таких типів можуть пропускати по кожній з напівобмоток струм 1000 А [48]. Приварні стикові мідні з'єднувачі пропускають від 70 до 90% струму при ослабленні затяжки болтів, а гранична величина струму, який пропускає мідний стиковий з'єднувач при тязі постійного струму складає 1100 А, для сталевого з'єднувача цей показник сягатиме 800 А. Для мідних та сталевих перемичок допустимі струми будуть розподілятися відповідно 1100А та 1400 А. У процесі руху електровозу в середині міжпостанційної зони струм розтікатиметься в обох напрямках і розділятиметься приблизно на рівні частини (по двом рейкам), тому, виходячи з отриманих внаслідок тягових розрахунків даних, по кожній з рейок протікатиме максимальний струм порядку 1800 А.

Ближче до підстанції струм буде вище цієї величини. Порівнюючи цей показник з вище наведеними допустимими нормами струмів, можна з упевненістю стверджувати, що робота ДТ, ДП, СЗ порушуватиметься.

2.1.1 Оцінка впливу асиметрії тягового струму на робочу область кодового рейкового кола 50 Гц

Числове кодове АБ частотою 50 Гц працює на перевальній ділянці Львівської залізниці з крутим профілем (більше 30 ‰). Оскільки рух через перевал потребує застосування трьох електровозів типу ВЛ 11, що працюють по системі СБОТ (система багатьох одиниць тяги), то, як показали тягові розрахунки, зворотній тяговий струм у рейках може досягати 7000 А [78, 81, 82]. Це призводить до створення асиметрії тягового струму у РЛ на окремих ділянках дороги, навіть при нормативній асиметрії 0,12, до 400 А і більше. Це супроводжується насиченням магнітопроводів колійних ДТ типу ДТ-0,6-1000 та ДТ-0,2-1000 і зниженням вхідних опорів по кінцям РЛ і, нарешті, до порушення області стійкості роботи РК АБ.

Для проведення оцінки основних режимів роботи кодового РК в умовах впливу асиметрії постійного тягового струму потрібно визначити величини асиметрії РЛ [6]. При цьому обов'язково потрібно володіти електромагнітними

характеристиками колійних дроселів у режимі підмагнічення їх кіл постійним тяговим струмом.

Потрібно зауважити, що у теорії РК дослідження та розрахунки представляють собою роботу магнітних систем дроселів з приведенням їх схем заміщення у лінійній постановці задач. До сих пір майже не приділялася увага до розрахунків цих вузлів РК у нелінійній постановці задач досліджень, виключаючи небагаточисленні роботи, опубліковані в останні роки в Україні. Більш того, ці роботи з'явилися за запитами та проханнями працівників залізниці, практиків, адже знадобилися більш глибокі дослідження по вирішенню проблем підвищення завадостійкості РК при електричній тязі змінного струму в умовах ожеледиці на проводах контактної мережі, коли в колі зворотного змінного тягового струму з'явилися багаточисленні гармонічні складові, включаючи постійну складову, що, як відомо, намагнічує ДТ. Також потрібно зауважити про факти порушення роботи РК на ділянках стикування доріг з електричною тягою постійного та змінного струмів внаслідок просторового розтікання зворотного постійного тягового струму від станції стикування по полігону, що примикає до станції з електричною тягою змінного струму.

Для проведення розрахунків роботи РК при підмагнічуванні дроселів потрібно мати відповідні експериментальні залежності магнітних характеристик цих пристроїв від струму підмагнічення. Для проведення подібних експериментів пошуку розрахункових параметрів застосувати схеми заміщення (СЗ) дроселів потрібні потужні джерела постійного струму [13]. На жаль, здійснити експерименти з їх використанням в умовах лабораторій університету не надається можливим. Тому у роботі запропонований непрямий метод знаходження електричних параметрів чотирьохполюсників схем заміщення колійних ДТ. Суть запропонованого спрощеного методу полягає в отриманні коефіцієнтів схеми заміщення ДТ при допусканні різних величин модулів опорів гілки намагнічення, що змінюються у процесі підмагнічення магнітопроводів ДТ постійним струмом.

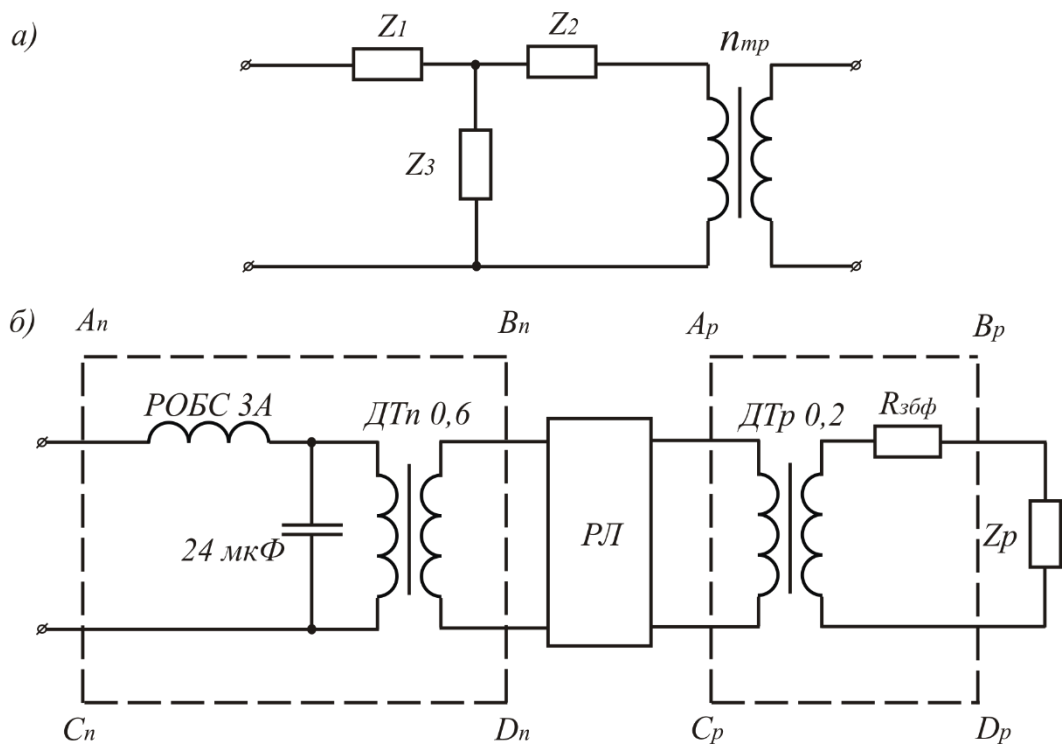


Рисунок 2.1 – Схема заміщення апаратури СЦБ:
 а) дросель-трансформатору; б) кодового РК 50 Гц

Метод розрахунку має наступні припущення:

- еквівалентна схема заміщення ДТ представлена Т-подібною та ідеальною схемами трансформатору з відповідними коефіцієнтами;
- опори z_1 та z_2 , що враховують втрати у ДТ, допустимо вважати неперервними, тоді схема заміщення виходить симетричною, внаслідок чого спрощуються розрахунки.

У таблиці 2.1 приведені значення опорів, що входять до складу симетричної СЗ ДТ-0,2-1000 та ДТ-0,6-1000, що застосовуються у схемі кодового РК частотою 50 Гц (рис. 2.1), що підлягає розрахунку.

Таблиця 2.1 - Значення параметрів

Елементи схеми заміщення	ДТ-0,6-1000		ДТ-0,2-1000	
	Модуль	Аргумент	Модуль	Аргумент
z_1	0,046 (0,048)	90°	0,015 (0,016)	90°
z_2	0,046 (0,048)	90°	0,015 (0,016)	90°
z_3	0,575 (0,602)	82°	0,19 (0,22)	81°

Приведені у табл. 2.1 дані отримані з використанням довідкових величин коефіцієнтів схем заміщення колійних ДТ, що використовуються для розрахунків кодового РК. Згідно Т-подібної схеми заміщення ДТ відомі коефіцієнти чотириполосників ДТ.

$$\begin{vmatrix} A_{II} & B_{II} \\ C_{II} & D_{II} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n_n & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_n} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_{III} & B_{III} \\ C_{III} & D_{III} \end{vmatrix}, \quad (2.2)$$

$$A_{II} = n_n \cdot A_{III}; \quad B_{II} = n_n \cdot B_{III}; \quad C_{II} = \frac{1}{n_n} \cdot C_{III}; \quad D_{II} = \frac{1}{n_n} \cdot D_{III},$$

де $A_{III}, B_{III}, C_{III}, D_{III}$ - коефіцієнти чотириполосника СЗ живлячого кінця,
 $n_n = 15$ - коефіцієнт трансформації ДТп.

Знаючи коефіцієнти ДТп дроселя, знаходимо коефіцієнти 2.2, які після розрахунку занесемо до таблиці 2.3.

Аналогічно запишемо матричні рівняння для визначення коефіцієнтів чотириполосника релейного кінця:

$$\begin{vmatrix} A_P & B_P \\ C_P & D_P \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{n_p} & 0 \\ 0 & n_p \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_{TP} & B_{TP} \\ C_{TP} & D_{TP} \end{vmatrix}, \quad (2.3)$$

де $A_{TP}, B_{TP}, C_{TP}, D_{TP}$ - коефіцієнти чотириполюсника СЗ релейного кінця (табл. 2.2)

$n_n = 23$ - коефіцієнт трансформації ДТр.

Із СЗ (рис. 2.1, б) знаходимо значення коефіцієнтів ДТ-0,6-1000, $z_{зДТ} = 0,35^{81^0}$.

$$\begin{aligned} A_{ТП} &= \frac{A_{П}}{n_n} = \frac{15,5^{-3^0 10'}}{15} = 1,033^{-3^0 10'}, \\ B_{ТП} &= \frac{B_{П}}{n_n} = \frac{1,815^{-73^0}}{15} = 0,1134^{-73^0}, \\ C_{ТП} &= C_{П} \cdot n_n = 0,135^{-80^0} \cdot 15 = 2,025^{-80^0}, \\ D_{ТП} &= D_{П} \cdot n_n = 0,08^{1,5^0} \cdot 15 = 1,2^{1,5^0} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Аналогічно коефіцієнти ДТ-0,2-1000 знаходяться наступним чином:
 $z_{зДТ} = 0,29$

$$\begin{aligned} A_{TP} &= A_P \cdot n_p = 0,152^{-3^0} \cdot 23 = 0,529^{-3^0}, \\ B_{TP} &= \frac{B_P}{n_p} = \frac{0,842^{61^0}}{23} = 0,0366^{61^0}, \\ C_{TP} &= C_P \cdot n_p = 0,244^{-82^0} \cdot 23 = 5,612^{-83^0}, \\ D_{TP} &= \frac{D_P}{n_p} = \frac{23^{-1^0}}{23} = 1^{-1^0}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

У таблиці 2.2 приведені коефіцієнти схеми заміщення основної обмотки

На основі даних таблиці 2.2 можна знайти значення опорів Т-подібної СЗ, приведеної до основної обмотки ДТ. Коефіцієнти чотириполюсників Т-подібної СЗ (рисунок 2.1, б) знаходяться за виразами:

$$A_{ТП} = 1 + \frac{z_1}{z_3}; B_{ТП} = 2z_1 + \frac{z_3 \cdot z_2}{z_1}; C_{ТП} = \frac{1}{z_3}; D_{ТП} = 1 + \frac{z_2}{z_3}. \quad (2.6)$$

Підставляючи сюди значення коефіцієнтів СЗ з табл. 2.2, знайдемо значення складових СЗ основної обмотки ДТ.

Таблиця 2.2 - Значення коефіцієнтів схеми заміщення

Елементи схеми заміщення	ДТ-0,6-1000		ДТ-0,2-1000	
	Модуль	Аргумент	Модуль	Аргумент
A_T	1,083	3°	0,529	-3°
B_T	0,1134	73°	0,0366	61°
C_T	2,025	-80°	5,612	-83°
D_T	1,2	$1,5^\circ$	1,0	-1°

Перейдемо до розрахунку кодового РК частотою 50 Гц. Для розрахунку використовуються наступні вихідні дані:

- коефіцієнти чотириполюсника РЛ, $f_c = 50 \text{ Гц}$;
- довжина рейкового кола $l_{PK} = 2600 \text{ м}$;
- опір ізоляції РЛ з урахуванням опор контактної мережі для літнього періоду року $r_{I3_{літо}} = 0,9 \text{ Ом} \cdot \text{км}$;

- коефіцієнти чотириполюсника РЛ влітку:

$$A = D = 3,9^{75^0}; \quad B = 3,4^{108^0}; \quad C = 4,722^{43,5^0}.$$

- опір опор контактної мережі $r_{0_{\min}} = 2 \text{ Ом} \cdot \text{км}$;
- опір ізоляції РЛ для зимового періоду року $r_{I3_{зима}} = 50 \text{ Ом} \cdot \text{км}$;
- коефіцієнти чотириполюсника РЛ взимку:

$$A = D = 1,024^3; \quad B = 2,1^{66^0}; \quad C = 0,052^1.$$

- для колійного приймача реле ИМВШ-110 напруга спрацювання з коефіцієнтом запасу $k_3 = 1,2 \quad U_P = 3,84 \text{ В}$;

- робочий струм реле $I_P = 0,0233 \text{ А}$;

- опір рейок $Z_P = 0,8 \cdot e^{j65} \text{ Ом}$;

- коефіцієнт повернення $k_{BH} = 0,75$;
- коефіцієнт надійного повернення $k'_{BH} = 0,625$;
- ємність обмежуючого конденсатору $C_{II} = 24 \text{ мкФ}$;
- $\gamma \cdot l_{KP} = 1,35^{32,5^\circ}$;
- $M = 0,00128^{-7^\circ}$;
- $z_3 = 0,575^{81^\circ} = 0,6$;

Коефіцієнти чотириполюсника ДТ-0,6-500 (без підмагнічування):

$$A_n = 15,5^{-3^{10^\circ}}; B_n = 1,815^{73^\circ}; C_n = 0,135^{-80^\circ}; D_n = 0,08^{1,5^\circ}.$$

Коефіцієнти чотириполюсника ДТ-0,2-500 (без підмагнічування):

$$A_p = 0,052^{-3^\circ}; B_p = 0,842^{61^\circ}; C_p = 0,244^{-86^\circ}; D_p = 23.$$

Перший етап розрахунку. Використовуючи розрахункові параметри, розрахуємо нормальний режим роботи (без підмагнічування). Коефіцієнти загальної схеми заміщення живлячого та релейного кінців РК знайдені з добутку матриць коефіцієнтів чотириполюсників:

$$A_H = 16,424^{1^\circ}; B_H = 4,81^{81^\circ}; C_H = 0,031^{31^\circ}; D_H = 0,067^{5^\circ}.$$

$$A_K = 0,051^{-3^\circ}; B_K = 6,65^{3,5^\circ}; C_K = 0,243^{-82^\circ}; D_K = 40^{47,5^\circ}$$

Кінцевою метою дослідження нормального режиму роботи є побудова залежності напруги на приймачі U_{III} від опору гілки намагнічення z_3 .

Результати розрахунку:

- напруги та струми в кінці та на початку РЛ
 $U_K = 0,354 \text{ В}; I_K = 1,78^{-85^\circ} \text{ А}; U_H = 7,25^{49^\circ} \text{ В}; I_H = 8,363^{16^\circ} \text{ А};$
- напруга та струм живлячого трансформатора
 $U_{III} = 149^{62^\circ} \text{ В}; I_{III} = 0,793^{21^\circ} \text{ А},$ перемножуючи на $k_{II} = 1,1$, отримаємо
 $U_{III} = 164,9^{62^\circ} \text{ В}; I_{III} = 0,872^{21^\circ} \text{ А};$

- опір передачі $z_{II \min} = k'_{TH} k_{TK} (z_{BHK} + z_l + z_{BXH}) = 3220^{3^0} \text{ Ом (зима)}$;

- $z_{II \max} = k_{TH} \cdot k'_{TK} (A \cdot z_{BHK} + B + (C \cdot z_{BHK} + D) z'_{BXH}) = 6416,6^{62^0} \text{ Ом (літо)}$;

- $k = \frac{z_{II \max}}{z_{II \min}} = 2$;

- максимальне значення напруги на колійному приймачі згідно регулювальних таблиць дорівнює: $U_{III} = 2 \cdot 3,84 = 7,65 \text{ В}$.

Ці розрахункові значення є базовими для оцінки результатів підмагнічування ДТ.

Перейдемо до другого етапу. Зімітуємо «підмагнічування» магнітопроводів ДТ-0,6-1000 та ДТ-0,2-1000. Умовно вважаємо, що вони насичуються одночасно. Для ДТ-0,6-1000 приймемо $z_3 = 0,35^{j81^0} \text{ Ом}$, інші опори z_1, z_2 залишимо такими ж.

Використовуючи (2.3), знайдемо коефіцієнти трансформатору ДТ-0,6-1000:

$$A_{III} = 1 + \frac{0,045^{9^0}}{0,35^{81^0}} = 1,09^{1^0}; \quad B_{III} = 2z_1 + \frac{z_3 \cdot z_2}{z_1} = 0,096^{84^0} \text{ Ом}; \quad C_{III} = 2,86^{-81^0} \frac{1}{\text{См}};$$

$$D_{III} = 1,12^{-1^0}.$$

Далі використовуємо вище знайдені коефіцієнти ДТ-0,6-1000 для $z_{зДТ0,6} = 0,35^{j81^0} \text{ Ом}$

$$A_{II} = 16,8 \cdot e^{j1^0} \quad B_{II} = 1,44 \cdot e^{j85^0} \text{ Ом}; \quad C_{II} = 0,191 \cdot e^{-j81^0} \frac{1}{\text{См}}; \quad D_{II} = 0,075 \cdot e^{-j1^0}.$$

Аналогічним чином отримаємо коефіцієнти чотириполюсника СЗ ДТ-0,2-1000 для $z_{зДТ0,2} = 0,12^{j81^0} \text{ Ом}$:

$$A_P = 0,0488 \cdot e^{j1^0} \quad B_P = 0,759 \cdot e^{-j17^0} \text{ Ом}; \quad C_P = 0,362 \cdot e^{-j81^0} \frac{1}{\text{См}}; \quad D_P = 25,83 \cdot e^{-j1^0}.$$

результаті розрахунку нормального режиму були отримані параметри РЛ:

- напруга і струм в кінці РЛ: $U_K = 0,332 \text{ В}; I_K = 2,52 \cdot e^{-j67^0} \text{ А}$;

- напруга і струм на початку РЛ: $U_H = 9,92 \cdot e^{j44,5^0} \text{ В}; I_H = 11,1 \cdot e^{j13^0} \text{ А}$

- напруга та струм у додатковій обмотці ДТ-0,2-1000:

$$U_{\text{дДТ0,2}} = 167 \cdot e^{j16,5^0} \text{ В}; \quad I_{\text{дДТ0,2}} = 2,37 \text{ А}$$

- напруга та струм на живлячому трансформаторі:

$$U_{\text{ПТ}} = 217 \cdot e^{j28^\circ} \text{ В}; I_{\text{ПТ}} = 1,37 \cdot e^{-j24^\circ} \text{ А}.$$

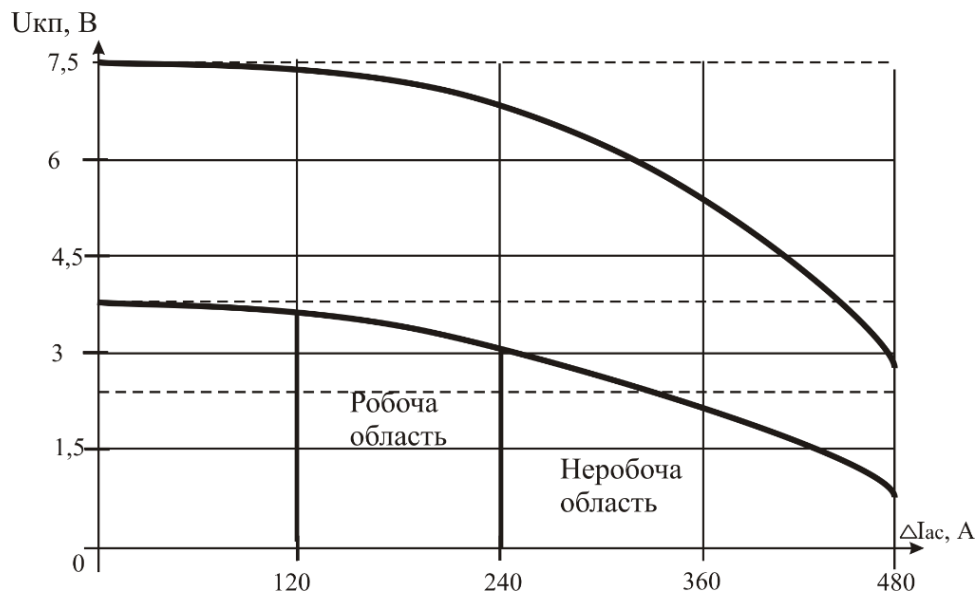


Рисунок 2.2 - Залежність напруги на колійному приймачі від струму асиметрії для опорів ізоляції у зимовий та літній період

Внаслідок проведених розрахунків було отримано залежності напруги на колійному приймачі ($U_{\text{КП}}$) від струму асиметрії для опорів ізоляції у зимовий та літній період (рис. 2.2), з яких можна зробити висновки, що взимку вірогідність відмови РК відсутня, адже $U_{\text{КП}}$ хоча і знизиться, але є запас по нарузі. Влітку відмови цілком вірогідні, адже $U_{\text{КП}}$ знижується нижче порогу спрацювання. У цьому випадку потрібно проводити профілактичні роботи зі зниження коефіцієнту асиметрії та застосовувати певні технічні рішення.

2.1.2 Дослідження теплових режимів роботи дросель-трансформаторів

Якщо розглянути особливості теплового режиму роботи колійного дроселя, то нагрівання обмотки та сталевого осердя ДТ від сигнального струму є досить малим і ним можна знехтувати. Нагрівання викликане, головним чином, проходженням тягового струму по обмоткам ДТ [78, 81, 82].

Рух потягу вздовж перегону супроводжується постійною зміною потужності, що споживається з контактної мережі. Це викликано нерівномірністю ведення локомотиву. Внаслідок цього рівень тягового струму, що споживається з контактної мережі, постійно різнитиметься і, у свою чергу, буде визначати струм в рейках та струм через ДТ зокрема [7, 59]. Таким чином ДТ знаходиться під впливом струму, рівень якого постійно змінюється в процесі руху локомотива і саме він визначатиме ступінь нагрівання ДТ.

Процес нагрівання дросель-трансформаторів можна розглянути як нагрівання однорідного тіла з коефіцієнтом тепловіддачі, який не залежить від температури. Під однорідним тілом з точки зору нагріву розуміється тіло з безкінечно великою внутрішньою електропровідністю, що всьому своєму об'єму має однакову температуру та питому теплоємність.

Розглянемо однорідне тіло, що має:

- масу m (в даному випадку під масою розуміємо масу ДТ-0.2-1000, що дорівнює $m_{0.2-1000} = 157\text{кг}$ та ДТ-0.6-1000 $m_{0.6-1000} = 235\text{кг}$);
- площу поверхні 14000 см^2 ;
- питому теплоємність $c = 0.886 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{Г} \cdot \text{С}}$;
- коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 1.3 \cdot 10^{-3}$;
- ΔU_0 - різниця температур навколишнього середовища та нагрітого тіла.

У момент $t=0$ кількість теплоти, що акумулюється в тілі, буде дорівнювати:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta U_0 \quad (2.7)$$

Тіло без внутрішнього джерела тепла передає своє тепло навколишньому середовищу, тому відповідно повинна знижуватися його температура [Боднар В. В.]. За час dt кількість тепла зменшиться на dQ :

$$-dQ = m \cdot c \cdot d \cdot \Delta U \quad (2.8)$$

Така кількість тепла dQ віддається за час dt навколишньому середовищу:

$$dQ = \alpha \cdot F \cdot \Delta U \cdot dt \quad (2.9)$$

Якщо прирівняти попередні рівняння та, то після перетворень отримаємо наступне диференційне рівняння:

$$-\frac{m \cdot c}{\alpha \cdot F} \cdot \frac{d(\Delta U)}{\Delta U} = dt \quad (2.10)$$

Введемо позначення: $\tau = \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot F}$

Назвемо τ постійною часу. Інтегруючи рівняння, отримуємо:

$$-\tau \cdot \ln \Delta U = t + C \quad (2.11)$$

В момент $t=0$ маємо $\Delta U = \Delta U_0$. Тоді постійна інтегрування:

$$C = -\tau \cdot \ln \Delta U_0 \quad (2.12)$$

При підстановці виразу (2.7) для C в рівняння (2.6) отримаємо:

$$-\tau \cdot \ln \Delta U + \tau \cdot \ln \Delta U_0 = t \quad (2.13)$$

Звідси отримуємо: $\ln\left(\frac{\Delta U_0}{\Delta U}\right)^\tau = t$ та $\ln\left(\frac{\Delta U_0}{\Delta U}\right)^\tau = e^\tau$.

У результаті отримуємо залежності, що описують процес нагрівання:

$$\Delta U = \Delta U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Під ΔU_0 розуміється те кінцеве значення температури, яке для тіла, що нагрівається, досягатиметься у встановленому режимі.

Залежності, виходячи з вище приведених формул, для ДТ-0.2-1000 та ДТ-0.6-1000 відображені на рис. 2.3.

Місцем виділення тепла в ДТ є обмотка, від неї тепло передається маслу, а від масла – до стінок ДТ, які виділятимуть тепло у навколишнє середовище шляхом випромінення та конвекції. Оскільки по обмоткам ДТ протікає струм, що майже у два рази перевищує допустимі норми, що не передбачено конструкцією ДТ, то робота ДТ порушується.

Було проведено теоретичне дослідження теплових режимів роботи ДТ при протіканні розрахованих тягових струмів [12].

$$t = -\tau \cdot \ln \cdot \left(1 - \frac{\theta_1}{\theta_{m1}}\right), \quad (2.15)$$

де t - час, за який ДТ перегрівається до температури 115°C ;

τ - постійна часу;

θ_1 - допустима температура перегріву масла по відношенню до повітря навколишнього середовища, град;

θ_{m1} - конструктивний параметр, що залежить від потужності ДТ, конструкції та коефіцієнта теплопередачі від масла до повітря.

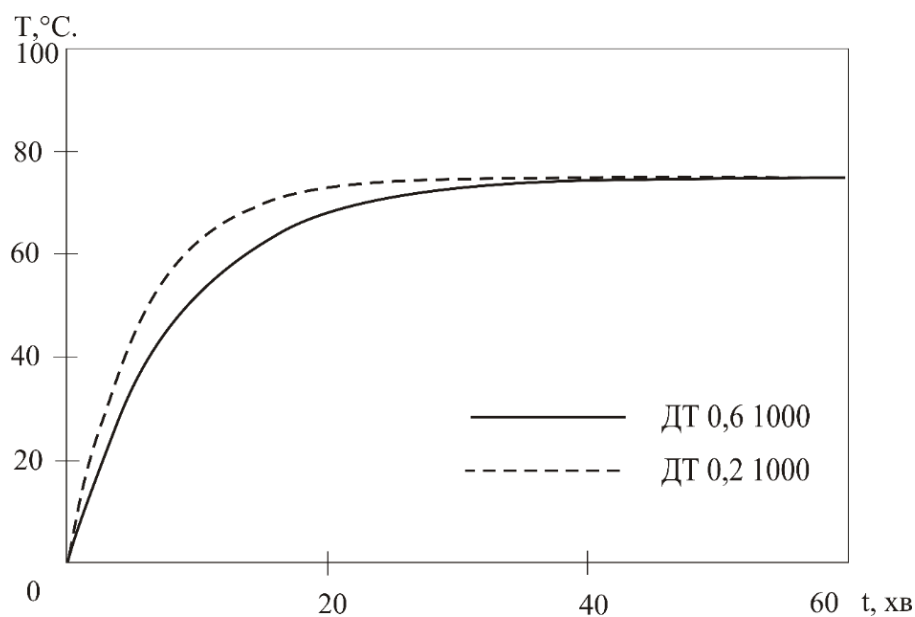


Рисунок 2.3 - Криві нагріву дросель-трансформаторів

При температурі, що встановилася, потужність, яка витрачається струмом на проходження його по обмотці, дорівнює потужності, що розсіюється поверхнею охолодження дроселя. Це можна записати рівністю:

$$P = k_p S_0 \theta_m \text{ Вт}, \quad (2.16)$$

P - потужність, що виділяється в обмотці дроселя, Вт;

S_0 - площа поверхні охолодження масла, см^2 ;

θ_m - допустима температура перегріву масла по відношенню до повітря навколишнього середовища, град.;

k_p - коефіцієнт теплопередачі від масла до повітря в $Вт/см^2$, що чисельно дорівнює потужності, яка розсіюється одним 1 см^2 поверхні охолодження при різниці температури масла навколишньої атмосфери [39], що дорівнює 1°C .

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2 + \alpha_s} + \frac{\delta}{\lambda}}, \quad (2.17)$$

α_1 - коефіцієнт теплопередачі від масла внутрішнім стінкам;

α_2 - коефіцієнт теплопередачі від зовнішніх стінок шляхом конвекції;

α_s - коефіцієнт теплопередачі випроміненням;

λ - коефіцієнт теплопровідності стінки;

δ - товщина стінки.

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{0,058} + \frac{1}{1000} + \frac{1}{0,535 + 0,78} + 0,25} \approx 1,3 \text{ вт} / \text{см}^2 \cdot \text{град.}$$

$$\alpha_s = \varepsilon C_s \frac{\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4}{T_2 - T_1} \text{ вт} / \text{см}^2 \cdot \text{град}, \quad (2.18)$$

T_2 - абсолютна температура стінки;

T_1 - абсолютна температура повітря;

C_s - постійна променевипускання абсолютно чорного тіла;

ε - відносна поглинаюча здатність тіла

Згідно $P = k_p S_0 \theta_m = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 7600 \cdot 75 = 740 \text{ вт.}$

Конструктивний параметр, що залежить від потужності ДТ, конструкції та коефіцієнта теплопередачі від масла до повітря, дорівнює:

$$\theta_m = \frac{P}{k_p S} = \frac{860}{1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 7600} = 87^\circ\text{C}.$$

При заданій максимальній температурі перегріву θ_m опір обмотки та площа поверхні охолодження повинні задовольняти умови:

$$\frac{I_0^2 R}{S_0} \leq k_p \theta_m \quad (2.20)$$

I_0 - сумарний тяговий струм в рейках;

R - омичний опір обмотки дроселя.

Тому, виходячи з вище зауваженого, взявши за основу дані по нашому перегону, потрібно розрахувати, чи буде спостерігатися небезпечний перегрів масла ДТ двох типів: ДТ – 0.2 – 1000 і ДТ – 0.6 – 1000.

За відомою формулою можна знайти значення θ в будь – який момент часу:

$$\theta = \theta_m - (\theta_m - \theta_0) e^{-\frac{1}{\tau}}, \quad (2.21)$$

θ_0 - початкове підвищення температури дроселя над температурою повітря навколишнього середовища.

Постійна часу дорівнюватиме:

$$\tau = \frac{G_1 C_1 + G_2 C_2 + k G_3 C_3}{3600 S k_p}, \quad (2.22)$$

G_1 - вага міді, кг;

G_2 - вага масла, кг;

G_3 - вага сталевого магнітопроводу, кг;

C_1 – 390 *вт·сек / кг·град* - питома теплоємність міді;

C_2 – 1670 *вт·сек / кг·град* - типова теплоємність масла;

C_3 – 480 *вт·сек / кг·град* - типова теплоємність сталі та чугуна;

k - коефіцієнт, що враховує особливості участі магнітопроводу у передачі тепла.

Було отримано графік, що показує, за який час температура перегріву ДТ досягатиме 115°C за відповідних величин тягових струмів (рис. 2. 2). На даному графіку: 1 – крива для ДТ-0.2-1000, 2 крива для – ДТ-0.6-1000. При температурі вище 115°C бітумна мастіка в місцях виводу ДТ може розплавитися, а також спостерігатиметься розгерметизація корпусу.

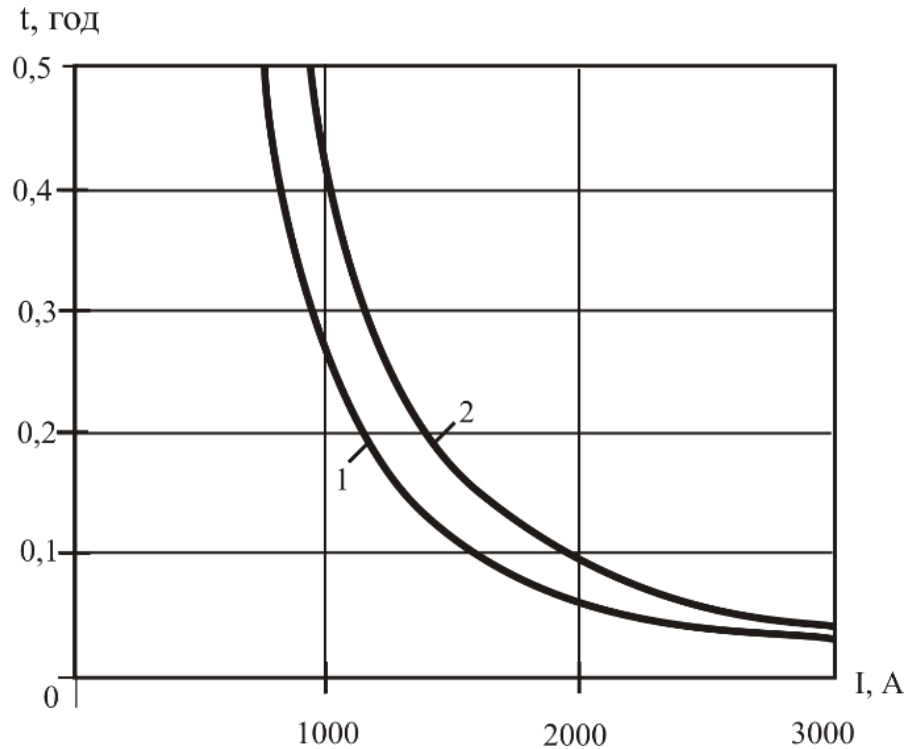


Рисунок 2.4 - Графік залежності часу, за який ДТ перегріється до температури 115°C, від величини тягового струму:

1-крива перегріву ДТ-0,2-1000,

2-крива перегріву ДТ-0,6-1000

Отже, з отриманих в результаті розрахунків залежностей можна зробити висновки, що при тяговому струмі 1800 А, що протікатиме по кожній з напівобмоток дроселя, ДТ-0,6-1000 та ДТ-0,2-1000 нагріватимуться до критичної температури відповідно за 4.5 хв. та 7 хв. Але це виконуватиметься за умови, що рухомий склад, споживаючи максимальний струм, весь час знаходитиметься в точці підключення ДТ. У процесі руху потягу частина тягового струму протікатиме через землю і тяговий струм в точці підключення ДТ буде змінюватися та досягатиме свого максимуму тільки при проїзді рухомим складом ординати ДТ, тобто ДТ працюють за таких умов у критичному режимі.

2.1.3 Розрахунок теплових режимів роботи дросельних перемичок

Використання рейок в якості зворотного проводу для пропуску тягового струму потребує застосування комплексу технічних, організаційних та технологічних заходів, направлених на забезпечення безвідмовної роботи пристроїв залізничної автоматики. Також потрібно забезпечити повну електромагнітну сумісність пристроїв тягового електропостачання з пристроями СЦБ та зв'язку, а також забезпечити нормальне функціонування технічних засобів, що забезпечують електробезпеку на електрифікованому транспорті. Це особливо необхідно враховувати при організації пропуску поїздів підвищеної ваги та довжини, а також на ділянках зі швидкісним рухом. Як свідчить практика, тільки при рівності гранично допустимих навантажень струму в контактному проводі і зворотній тяговій (рейковій) мережі можна максимально використовувати резерви пропускної здатності електрифікованих ділянок доріг [17].

Вважається, що до елементів рейкової мережі відносяться рейки зі стиковими, міждросельними міжрейковими та міжколійними перемичками, відсмоктуючі фідери, колійні та додаткові ДТ. Саме вище перераховані елементи повинні володіти потрібною електропровідністю, достатньо високою механічною та термічною міцністю, стійкістю до атмосферної та електричної корозії, невисокою вартістю. При цьому основними показниками, що характеризують електропровідність матеріалів, є питомий електричний опір та температурний коефіцієнт. У зв'язку з цим найбільші переваги мають мідні дросельні, міждросельні та міжрейкові перемички, а також електротягові з'єднувачі.

До недоліків мідних перемичок та з'єднувачів можна віднести дефіцитність та відносно високу вартість, а також складну технологію виготовлення (обтиск, лудіння). Окрім того, в місці обтиску створюється відносно високий перехідний опір, у зв'язку з чим у місці з'єднання тросу з клемою, болтом, обтисковою втулкою спостерігається нагрів. Це, у свою чергу, призводить до нерівномірного

розподілення струму по окремим дротам мідного тросу і, як правило, до виходу його з ладу.

У зв'язку з вище перерахованими причинами було проведено дослідження теплових режимів роботи дросельних та міждросельних перемичок.

Перемички дросельні та з'єднувачі електротягові втулкові, надалі перемички, призначені для кріплення в отвори рейок для пропуску тягового струму при експлуатації в зворотній рейкового кола.

Перемички дросельні мідні призначені для забезпечення безпеки руху поїздів, для підключення колійних дросель-трансформаторів при електротязі постійного і змінного струму. Перемички служать елементами зворотного тягової рейкової мережі і забезпечують безперервність кола по каналізації тягових струмів, струмів електрообігріву в межах фідерної зони та сталого забезпечення електроенергією рухомого електротранспорту; функціонування рейкових кіл СЦБ і АЛС, надійну роботу захисту від струмів короткого замикання в системі тягового електропостачання, вимоги електробезпеки, нормативні вимоги щодо обмеження витоку тягових струмів і захисту від електричної корозії підземних металевих конструкцій. В 1996-1997 рр. освоєно виробництво сталєво-мідний і сталєалюмінієвих дросельних перемичок, які є аналогами мідних перемичок.

Внаслідок чого отримано залежність часу нагріву перемички до температури плавлення від величини тягового струму. При протіканні тягового струму порядку ще 5000 А спостерігається надмірно швидкий нагрів перемичок до температури плавлення. Такі високі рівні тягових струмів були обрані у зв'язку з тим, що розрахунок було проведено з урахуванням специфіки перегону – перевальна ділянка залізниці з крутим профілем, рух важковагових потягів на якій супроводжується протіканням великих тягових струмів [111, 112]. Усі елементи зворотної тягової мережі по термічній стійкості повинні відповідати максимальному розрахунковому рівню ефективних тягових струмів. Тому було проведено дослідження розповсюдження тягового струму вздовж рейок і виявлено його небезпечні рівні, які можуть призвести до виникнення ряду відмов, що несуть небезпечний характер.

Для розрахунку теплових режимів роботи дросельних перемичок використовуватимемо наступні величини:

m – маса проводу, г;

β - питома теплоємність матеріалу;

t – час дії струму;

α - температурний коефіцієнт зміни опору, що дорівнює $\alpha = 0,0038 \frac{1}{0C}$;

W – тепловіддача з поверхні проводу;

S – площа поперечного перерізу, m^2 ;

l - довжина проводу, м;

ρ - питомий опір матеріалу, для міді $\rho = 0,0175 \frac{Om \cdot mm^2}{m}$;

Опір перемички знаходиться за формулою:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

$$W = 0,67 + 0,125 \cdot l \cdot \frac{-R - 100}{35}, \frac{Bm}{0C}.$$

Кінцева формула для розрахунку теплових режимів роботи дросельних

перемичок:
$$t = \frac{\ln(1 - \theta_{nl} \frac{W - I^2 \cdot \alpha}{I^2 \cdot R})}{-\frac{W - I^2 \cdot \alpha}{S \cdot m \cdot \beta}}.$$

Струм у рейках, а, відповідно, і в ДТ, являє собою змінну випадкову величину і залежить від багатьох факторів і, поперед усього, від розміщення ДТ відносно тягової підстанції, від кількості та місця розміщення поїздів, наявності колійних з'єднувачів.

По результатам розрахунків було побудовано графіки залежності часу нагріву перемичок до температури плавлення.

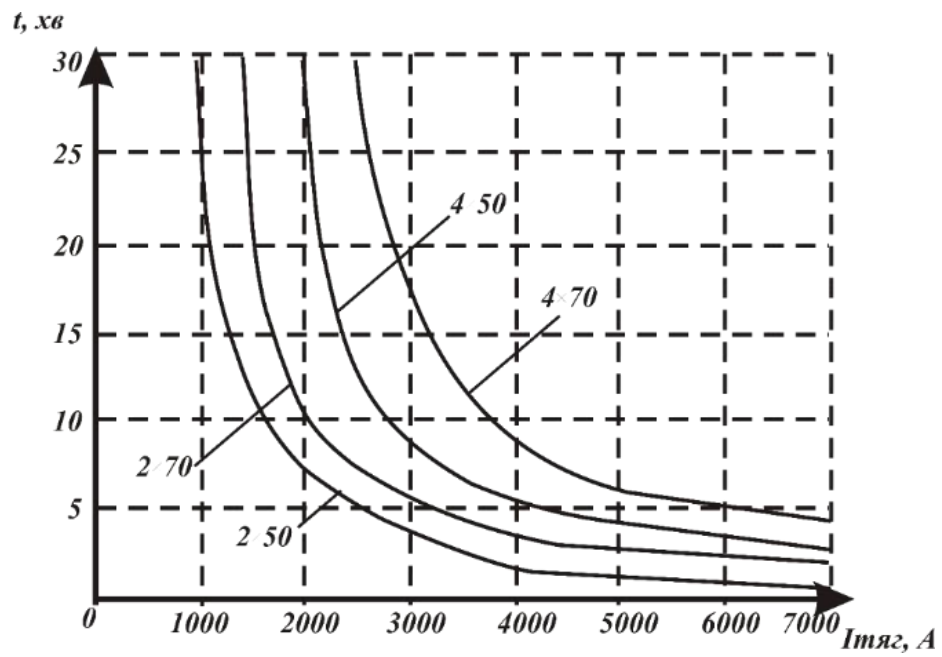


Рисунок 2.4 - Залежність часу нагріву міжросельних перемичок до температури плавлення

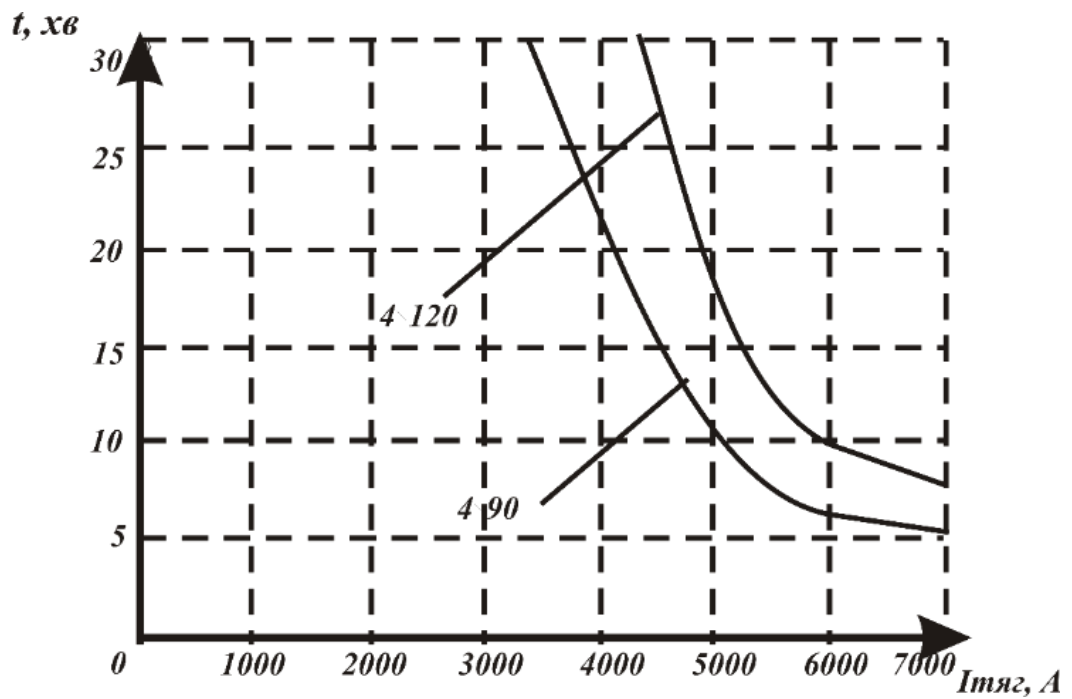


Рисунок 2.5 - Залежність часу нагріву дросельних перемичок до температури плавлення

З графіків видно, що при нормальних режимах роботи системи тягового електропостачання та роботи захисту немає небезпеки перегорання перемичок. Та в нашому випадку при протіканні таких великих рівнів тягових струмів (порядку 7000 А) спостерігається порушення нормального функціонування роботи як дросель-трансформаторів, дросельних, між дросельних перемичок, так рейкових кіл в цілому.

Отже, згідно проведеного дослідження можна спостерігати наступне: розраховані високі рівні тягових струмів здійснюють значний вплив на ДП, внаслідок чого теплові режими роботи цих елементів тягової мережі на гірській ділянці Лавочне – Бескид – Скотарське не виконуються.

2.1.4 Розрахунок режимів роботи рейкових кіл на гірських ділянках зі встановленими двома дросель-трансформаторами на живлячому та релейному кінцях

Між станціями Лавочне-Бескид-Скотарське відстані складають не більше 5 км, то припустивши, що локомотиви рухатимуться з середньою швидкістю 30 км/год можна стверджувати, що загальний час руху по перегону даного рухомого складу – менше 10 хв.

Оскільки потяг рухатиметься, поширення тягових струмів залежатиме не тільки від місцезнаходження рухомого складу, а й від розміщення тягових підстанцій. Як зазначалося раніше, за деяких обставин може спостерігатися перегрів ДТ, ДП та СЗ, внаслідок чого порушуватиметься нормальне функціонування РК.

Як альтернативне вирішення проблеми нагрівання ДТ внаслідок протікання великих тягових струмів пропонується дублювання ДТ відповідно на ЖК та РК (рис. 2.6). Як зазначалося вище, ДТ призначені для пропуску зворотного тягового струму, тому в даному випадку ДТ будуть виконувати не тільки свою основну функцію, а й додаткову – знижуватимуть великі навантаження, що мають місце за встановлення по одному ДТ на ЖК та РК. Це допоможе вирішити проблему нагрівання ДТ.

До РК висуваються вимоги, які за будь-яких умов повинні виконуватися. До цих вимог в першу чергу належить передача інформації про вільність РК за відсутності рухомого складу та інформація про зайнятість РК за наявності хоча би однієї колісної пари рухомого складу або при пошкодженні рейки [48]. Виходячи з цього, при розрахунках та дослідженнях розрізняють режими роботи РК. Проведено розрахунок роботи РК з двома ДТ у наступних режимах: нормальному, шунтовому, контрольному та АЛСН.

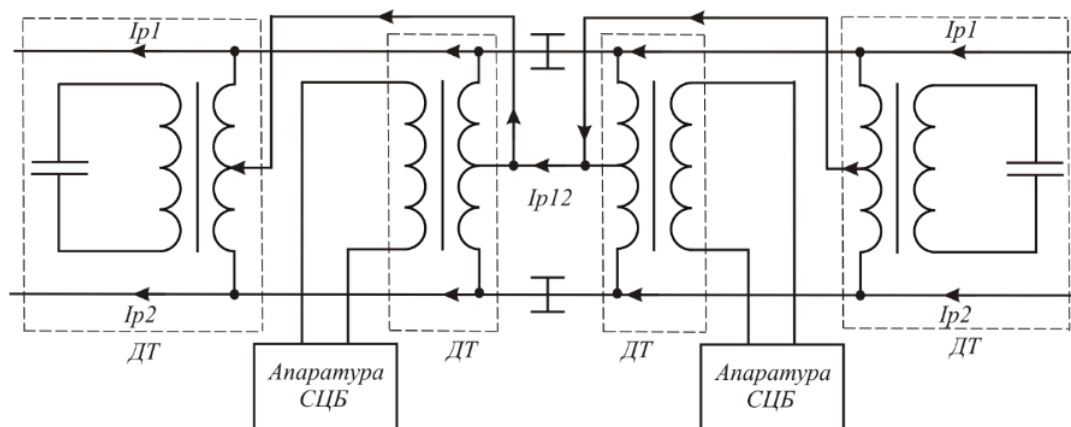


Рисунок 2.6 - Схема паралельного підключення двох ДТ на релейному та живлячому кінцях

Кожному з вище приведених режимів роботи відповідає певна схема заміщення, в якості якої застосовується каскадна схема з трьома чотириполюсниками: Н – початку, РЛ – рейкової лінії, К – кінця. Чотириполюсник Н включає апаратуру живлячого кінця: ДТ, узгоджуючі трансформатори, обмежувачі та ін. [4, 5]. Чотириполюсник К включає всю апаратуру релейного кінця та колійний приймач. Усі коефіцієнти чотириполюсників Н та К беруться незмінними. У розрахунках для ДТ-0,6-1000 було взято коефіцієнт трансформації $n=15$, для ДТ-0,2-1000 $n=17$. При паралельному з'єднанні двох однакових чотириполюсників застосовуються додаткові перетворення, що полягають спочатку у переході до Y-форми:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}' & Y_{12}' \\ Y_{21}' & Y_{22}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{11}'' & Y_{12}'' \\ Y_{21}'' & Y_{22}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2D}{B} & -\frac{2}{B} \\ -\frac{2}{B} & \frac{2A}{B} \end{bmatrix} \quad (2.23),$$

A, B, D – коефіцієнти чотириполосників, які паралельно з'єднуються;

$Y_{11}', Y_{12}', Y_{21}', Y_{22}', Y_{11}'', Y_{12}'', Y_{21}'', Y_{22}''$ – коефіцієнти чотириполосників, що утворилися внаслідок Y - перетворення;

$Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}$ – результуюча матриця суми перетворених чотириполосників.

Далі здійснюється перехід до А-форми:

$$\begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Y_{22}}{Y_{21}} & -\frac{1}{Y_{21}} \\ -\frac{\Delta_y}{Y_{21}} & -\frac{Y_{11}}{Y_{21}} \end{bmatrix} \quad (2.24),$$

Δ_y – детермінант результуючої матриці суми перетворених чотириполосників;

A', B', C', D' – коефіцієнти результуючої матриці А-форми.

Розрахунок режимів роботи РК з двома ДТ на ЖК та РК показав, що режими роботи рейкових кіл відповідають нормативним. Особливу увагу слід приділити шунтовому режиму роботи, який повинен виконуватися за найгірших умов [4, 106]. Шунтовий режим в значній мірі залежить від того, де на РЛ знаходиться шунт. Якщо шунт знаходиться в місці мінімальної шунтової чутливості, то спостерігатимуться найнесприятливіші умови для шунтового режиму. Внаслідок дослідження шунтового режиму роботи, за якого було визначено коефіцієнти шунтової чутливості на ЖК та РК, виявилось, що він є критичним за умови знаходження шунта на РК. Це можна пояснити зниженням опору на ЖК та РК. Тому паралельно обмотці ДТ пропонується встановити ємність, налаштовану в резонанс. Саме така схемна реалізація, як показали розрахунки, забезпечує шунтовий режим роботи рейкових кіл згідно нормативним.

Отже, проведений розрахунок режимів роботи РК при встановленні двох ДТ на ЖК та РК висвітлює суттєвий недолік, що полягає у економічній недоцільності внаслідок високої вартості. Тому розглядається варіант встановлення ТРК, які з часом знаходять все більше застосування. До основних переваг ТРК належать [102]:

підвищення завадостійкості та зниження взаємного впливу між РК внаслідок використання сигнального струму тонального діапазону, відсутність ізолюючих стиків, завдяки чому забезпечується безперервність кола повернення тягового струму та зниження кількості ДТ, які встановлюватимуться тільки для вирівнювання потенціалів в рейках.

2.2 Дослідження розповсюдження тягових струмів та потенціалів вздовж рейок на гірських ділянках з електротягою постійного струму

В результаті переобладнання ділянки з гірським профілем системою АБ з ТРК [52, 108] зменшилася кількість ДТ. Дроселі фактично на ТРК не встановлюються, вони потрібні через деякі проміжки для вирівнювання потенціалів у рейках, при цьому ДТ пропускатимуть менший струм [109].

Якщо взяти до уваги такий важливий параметр, як коефіцієнт асиметрії, то його граничне значення за технічними умовами дорівнює $k_a = 0,12$. У такому випадку різниця струмів у рейках дорівнюватиме $\Delta I = 432 \text{ А}$. У дійсності коефіцієнт асиметрії може досягти значень 20 %. Внаслідок протікання великих тягових струмів через ДТ виникає таке явище, як насичення осердя ДТ, в результаті чого вхідний опір ДТ сигнальному струму значно знизиться, це може призвести до зниження напруги на колійному приймачі до значення напруги непритягання якоря реле [110]. Тобто ріст струму асиметрії може викликати параметричну відмову РК.

Живлення електричних локомотивів здійснюється через проводи контактної мережі і рейкові лінії. На залізниці прийнято, що додатній полюс підстанції приєднаний до контактної мережі, а від'ємний - до рейок. Оскільки рейки не ізольовані від землі, то струм проходить і по землі. Ця обставина здійснює істотний вплив на багато явищ, зокрема, на опір тягової мережі та роботу рейкових кіл.

Якби рейки були ізольовані від землі, то увесь струм локомотиву I протікав би по рейках. Струм витоку з рейок в землю залежить від різниці потенціалів між рейками і землею і від опору кола, по якому протікає цей струм. Це коло складається якби з двох послідовно сполучених частин. Опір першої частини це

опір місця переходу струму з рейок до шпал і баласту називають перехідним опором, а опір другої частини самої землі на шляху струму витоку називають опором розтіканню.

Розглянемо загальну картину протікання струму по рейках і землі для простого випадку: одностороннє живлення одного потягу. По мірі поширення струму в землі він захоплює все більші і більші її простори, і щільність струму в землі з видаленням його від рейок зменшується. Зважаючи на це найбільший опір протіканню струмів витоку зосереджений поблизу виходу їх з рейок. Це дозволяє без відчутної похибки при розрахунках струмів і потенціалів рейок включити опір розтіканню в перехідний опір і вважати потім, що опір землі дорівнює нулю. Таким чином, навіть при одній підстанції струм електровоза розтікається по рейках в обидві сторони (вліво і управо). При цьому на частині ділянки, найближчій до навантаження, струм з рейок витікає в землю, а потім на іншій частині повертається в рейки і на підстанцію. В середині цієї ділянки струм в рейках має мінімальне значення, він буде тим менше, чим менше опір переходу до землі і самої землі. Струм, що йде по рейках вправо від навантаження, врешті-решт повністю витікає в землю. Цей струм, так само як і струм, що витікає з рейок на найближчій до навантаження частині ділянки, повертається в рейки на іншій частині цієї ділянки і на ділянці зліва від підстанції [59, 7].

Відгалуження частини струму в землю призводить до того, що опір зворотного проводу (рейки, що шунтуються перехідним опором і землею) менше опору ізолюваного від землі рейкового шляху. Для проведення аналізу розтікання тягового струму по рейках в незалежності від поїзної ситуації і складності ділянки необхідно визначити навантаження підстанцій. Для спрощення цього розрахунку можна прийняти деякі допущення, які не внесуть відчутної похибки. При хорошій ізоляції рейок від землі, за відсутності витоків струмів в землю, навантаження потягів можуть бути розподілені між підстанціями звичайним способом - обернено пропорційне відстаням до сусідніх підстанцій (при незмінній площі перерізу проводів контактної мережі і однакової напрузі тягових підстанцій). Якщо ж перехідний опір від рейок до землі буде мінімальним, то значна частина струму

протікатиме по землі і при розподілі навантажень між підстанціями можна нехтувати опором зворотного проводу [98, 99] (рейки, що шунтуються землею), оскільки воно набагато менше опору проводів контактної мережі. Саме значення опору проводів контактної мережі і визначатиме в основному струморозподіл у такому разі. Іншими словами, можна вважати, що блукаючі струми не здійснюють істотного впливу на струморозподіл між підстанціями.

Після того, як навантаження усіх підстанцій знайдені, можна перейти до розрахункової схеми на якій підстанції замінені їх навантаженнями (струмами відсмоктуючих фідерів). У розрахунках велику роль відіграють наступні опори: r_p - опір 1 км рейкового шляху, Ом·км; r_n - перехідний опір від рейок до землі на довжині 1 км, Ом/км; r_3 - опір землі.

Якщо опори r_p і r_n постійні по усій довжині, то отримуємо коло з постійними параметрами, тобто лінійне коло. При розрахунку таких кіл може бути використаний метод накладення. В цьому випадку складний контур, що містить декілька підстанцій і навантажень, можна замінити рядом контурів, в кожному з яких протікає певний струм. Це призводить до розрахункової схеми з одним навантаженням при видаленому в нескінченність заземлювачі [28]. При цьому по черзі будуть розглянуті усі навантаження включаючи і струми підстанцій.

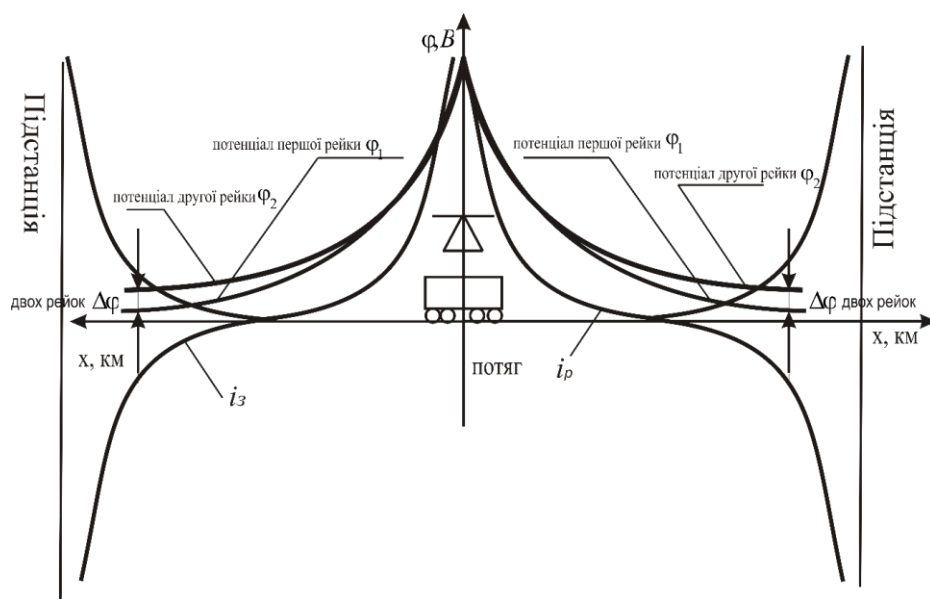


Рисунок 2.7 - Структурна схема розповсюдження струмів і потенціалів

Внаслідок того, що на перегоні, який ми розглядаємо, застосовується тяга постійного струму, то відстань між тяговими підстанціями буде меншою ніж при тязі змінного струму. Ділянка, що розглядається є складною гірською ділянкою, рух по якій супроводжується споживанням з контактної мережі значного струму. Для забезпечення потреб потягів в електроживленні в таких умовах необхідно скорочувати відстань між тяговими підстанціями. Враховуючи це для дослідження приймемо, що відстань між тяговими підстанціями становить 5 км. Це відповідає дійсності, адже на гірських ділянках тягові підстанції встановлюють майже на кожній станції.

Після переобладнання перегону замість АБ з РК частотою 50 Гц встановлено систему АБТЦ, яка використовує ТРК без ізолюючих стиків. У результаті переобладнання скоротилась кількість ДТ. Це значно полегшує експлуатацію рейкових кіл на перегоні, оскільки дросель є слабким місцем РК за наявності великих тягових струмів.

Перед проведенням дослідження треба визначити навантаження тягових підстанцій. Позначимо струм першої підстанції як I_1 , другої як I_3 , струм локомотива – I_2 . Відстані від підстанції до локомотива відомі. Тоді навантаження тягових підстанцій (їх струми) можна знайти виходячи з відстаней від локомотива до кожної з підстанцій. Отже тяговий струм першої підстанції визначається:
$$I_1 = \frac{I_2 - I_1}{I_2} \cdot I_2 = 4200 \text{ А.}$$

Аналогічним чином визначимо навантаження (тяговий струм) другої підстанції:

$$I_3 = \frac{I_2 \cdot (I_2 - I_1)}{I_2} \cdot I_2 = 2800 \text{ А.}$$

Слід відзначити, що згідно закону Кірхгофа загальний тяговий струм двох підстанцій дорівнює тяговому струму, що споживається локомотивом з контактної мережі. Визначивши струми підстанцій можна, скориставшись вище наведеними формулами визначити струм в рейках на ділянці. Результат дослідження отримуємо методом додавання графіків розповсюдження тягового струму окремих одиниць.

Особливістю ділянок з гірським профілем є наявність у рейках зворотного тягового струму великого значення. Це є результатом наявності крутого профілю та використання для тяги декількох локомотивів. Протікання тягового струму такого рівня може викликати збої в роботі пристроїв СЦБ за рахунок навіть струмів асиметрії. Також критичним є положення ДТ, що повинні пропускати тяговий струм, який іноді суттєво перевищує (у 2-2,5 разів) номінальний. При таких умовах нормальна робота ДТ може порушуватись за рахунок їх нагрівання, також можливий вихід з ладу ДТ внаслідок теплового перегріву. Тому зрозуміло прагнення зменшити рівень зворотного тягового струму в рейках до мінімального, полегшивши тим самим умови роботи колійних пристроїв СЦБ.

Дослідження розподілу потенціалів і струмів, оцінка їх рівнів у рейковій мережі, особливо струмів асиметрії в РЛ, з метою визначення району проникнення струмів витоку та ін. є важливим на сьогоднішній день. Актуальність вирішення проблеми пропуску зворотного тягового струму уздовж рейок викликана також тим, що у безстикових ТРК необхідно знати різницю потенціалів, яка може руйнувати підключену до рейок апаратуру ТРК, та визначити оптимальне місце встановлення урівнюючих ДТ [18].

Основою аналітичного дослідження розподілу сталих напруг і струмів вздовж РЛ, що представляє собою електричну довгу лінію, служать диференційні рівняння типу Гельмгольца. На вході лінії діє джерело зворотного тягового струму витоку, при цьому вирази для розподілу напруги і струму вздовж лінії мають вигляд,

$\frac{dU}{dx} = Z_0 I$, $\frac{dI}{dx} = \varphi_0 U$. Рішення цих рівнянь приводять до рівнянь виду:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} - \gamma^2 \cdot U = 0, \quad \frac{d^2 I}{dx^2} - \gamma^2 \cdot I = 0, \quad (2.25)$$

де $\gamma_0 = \sqrt{R_0 \cdot Y_0} = \alpha$, ($Hn/_{км}$);

α - коефіцієнт поширення РЛ при постійному струмі;

R_0, Y_0 - питомий опір рейок і провідність ізоляції елемента лінії Δx .

При розрахунку кожна колія заміщений двома двопровідними однорідними ланцюговими схемами (ОЛС) «рейка-земля» і представлені послідовно з'єднаними в

каскад Т-подібними чотириполюсниками [32]. Розрахункова ділянка РЛ умовно прийнята довжиною $l = 3 \text{ км}$ і містить $N=6$ однакових відрізків лінії по 0,5 км (масштаб квантування визначений точністю моделювання лінії).

У системах АБ, при електротязі, по межах блок-ділянки встановлюються ДТ, що забезпечують пропуск зворотного тягового струму в обхід ізолюючих стиків. Якщо знехтувати опором ДТ постійному струму ($\sim 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$), то дві ОЛС лінії «рейка-земля» виявляються закороченими, вирівнюючи потенціали обох рейок між собою. На схемі прийняті позначення:

$J_{1,2}$ - розрахункові струми на виході блок-ділянки ОЛС 1,2, що примикають до ДТ; кола, що розділяють;

$r_{B1,2}$ - внутрішній опір джерел струму, причому $r_{B1,2} \gg r_{DT}$.

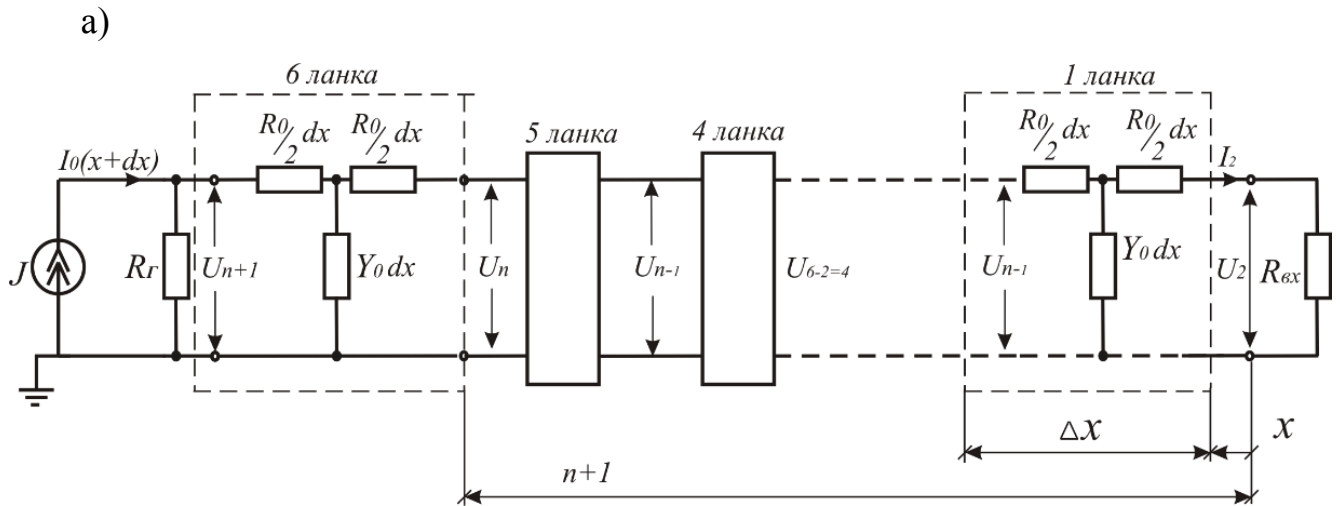
Видно, що сумарний струм $I_{1,2}$ розподіляється по виходах ОЛС 1,2 наступного каскаду Т-подібних чотириполюсників.

При розрахунках схем враховано, що параметри СЗ ліній можуть змінюватися в широких межах, причому при відносно низьких опорах ізоляції вхідні (вихідні) опори ОЛС 1, 2 дорівнюють характеристичним. Тоді навантаженням тяговому струму кожної лінії на межі блок-ділянок служать опори напівобмотки ДТ ($\approx 0,006 \text{ Ом}$), що вказує на те, що кожна ОЛС-лінія працює в режимі короткого замикання (КЗ). Крім того, при розрахунках прийняті допущення:

- виключені впливу витоків струму через колії проміжних станцій;
- довжина розрахункової блок-ділянки завищена до 3 км;
- знехтували впливом опору рейкових з'єднувачів, перемичок і міжколійних з'єднувачів.

Загальні рішення для рівняння (2.20) можна записати для симетричного чотириполюсника в системі координат x і в А-параметрах. Вважаємо напругу U_{n+1} і струм I_1 на вході ОЛС ($x=l$) заданими. Тоді рівняння чотириполюсника для всього кола можна записати так:

$$\begin{aligned}
 U_2 &= U_1 \cdot ch\Gamma N_0 - I_0 \cdot R_c \cdot sh\Gamma N_0; \\
 I_2 &= -U_1 \cdot \frac{sh\Gamma N_0}{R_c} + I_1 \cdot ch\Gamma N_0.
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$



б)

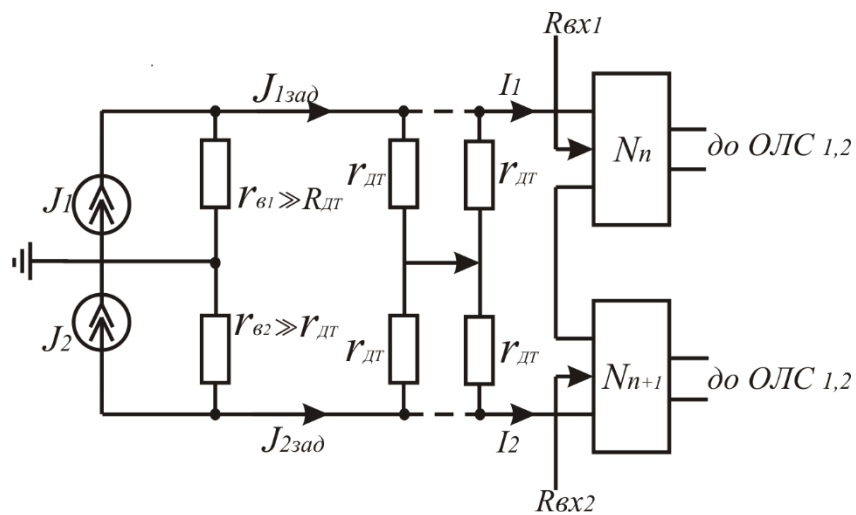


Рисунок 2.8 – Однорідна ланцюгова схема:

- а) навантажена ОЛС «рейка-земля» з Т-ланками;
- б) ОЛС кожної з рейок з переходом через дросель-трансформатор

Рівняння відповідають рівнянням симетричних чотириполісників в А-параметрах, якщо покласти:

$$\begin{aligned} A_{11} &= ch\Gamma N\varrho; A_{12} = R_c \cdot sh\Gamma N\varrho; \\ A_{21} &= \frac{sh\Gamma N\varrho}{R_c}; A_{22} = ch\Gamma N\varrho. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Для однієї ланки ОЛС можна записати

$$U_{n+1}/U_n = e^\Gamma; I_{n+1}/I_n = e^\Gamma, \quad (2.28)$$

Звідки $\Gamma = \ln(U_{n+1}/U_n) = \ln(I_{n+1}/I_n)$ - постійна передачі (послаблення) ланки,

причому

U_{n+1}, I_{n+1} - напруга і струм на вході $n+1$ -ї ланки;

U_n, I_n - теж на вході n -ї ланки;

$R_c = \sqrt{\frac{R_0}{Y_0}}$ - характеристичний опір лінії.

В довгих лініях параметри $\gamma \cdot l$ и R_c є аналогами Γ и R_y .

Постійна передачі всієї ОЛС характеризується відношенням напруг на початку і в кінці ОЛС

$$\Gamma_y = \ln \left[\left(\frac{U_1}{U_{1.2}} \right) \left(\frac{U_{1.2}}{U_{2.3}} \right) \dots \left(\frac{U_{n-1}}{U_2} \right) \right], \quad (2.29)$$

де U_n, U_{n+1} - напруга на вході ланки n , рахуючи від кінця до початку;

U_{n+1}, U_{n+2} - напруга на вході ланки $n+1$, рахуючи від кінця до початку.

Відповідно,

$$\Gamma_y = \ln \left(\frac{U_1}{U_{1.2}} \right) + \ln \left(\frac{U_{1.2}}{U_{2.3}} \right) + \dots + \ln \left(\frac{U_{n-1}}{U_2} \right) \quad (2.30)$$

і містить N рівних доданків.

Тому $\Gamma_y = \Gamma \cdot N$. Визначимо розрахункові параметри Т-подібної схеми «рейка-земля» ОЛС-1 колії перегону $R_0, \frac{Om}{км}$ - питомий електричний опір рейок і провідність ізоляції $Y_0, См \cdot км$. Опір рейкової петлі постійному струму становить $0,1 Om/км$ (при мідних стикових з'єднувачах або при дубльованих із сталі) тоді опір однієї рейки $0,05 Om/км$. При чому опір рейки (стикової) ланкової колії складається з двох складових.

$$R_0 = r + r_c, \quad (2.31)$$

де r - омичний опір цілої рейкової нитки в Ом/км;

r_c - омичний опір з'єднувачів 1км нитки в Ом/км.

Як показує практика експлуатації, обидві ці складові є випадковими величинами, залежними від ряду випадкових факторів - температури навколишнього середовища, питомого опору сталі, а опір з'єднувачів, крім того, залежить від якості приварки, числа обірваних жил тросу [101] та ін. В розрахунках проте прийняті нормативні значення параметра R_0 . Провідність ізоляції рейок Y_0 також випадковий параметр, що залежить від багатьох випадкових факторів: марки баластного матеріалу (щебінь, пісок), типу шпал і терміну їх експлуатації; вологості і температури навколишнього повітря, сторонніх домішок, що засмічують баластну призму (мінеральні солі, вугілля й ін.). Досвід експлуатації показує, що може Y_0 змінюватися від 10 до 0,02См·км.

Крім первинних параметрів властивості ОЛС визначаються двома вторинними [57] - характеристичним опором лінії $R_c = \sqrt{\frac{R_0}{Y_0}}$, Ом і постійною передачі $\Gamma_u = \sqrt{R_0 \cdot Y_0}$.

Ці параметри – аналоги R_c и $\gamma \cdot l$ довгої лінії. Таким чином, для розрахунку ОЛС-1 використані параметри $R_0 = 0,05 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ и $Y_0 = 0,04 \dots 4 \text{См} \cdot \text{км}$, довжина лінії (і число ланок) змінювалася от 1 км до 20 км.

Як відомо, при підключенні будь-яких типів заземлюючих пристроїв до рейок в двониткових РК для запобігання шунтування останніх необхідно приєднати всі заземлюючі пристрої до однієї рейкової нитки колії. У разі приєднання заземлюючих пристроїв до рейки двома провідниками відстань між їх підключеннями має бути мінімальною і не повинна перевищувати 200 мм. Остання вимога визначається тією обставиною, що порушення цілості рейкової нитки між точками підключення провідників не контролюється. Підключення заземлюючих пристроїв до однієї рейкової нитки двониткових рейкових кіл створює поперечну асиметрію рейкової лінії [60], за рахунок чого виникає асиметрія тягового струму.

Параметри для розрахунку ОЛС-2 обрані з урахуванням заземлення опор контактної мережі. Провідність і опір загального заземлення рейки:

$$G_{02} = Y_0 + Y_{on} \quad R_{32} = \frac{R_u \cdot R_{on}}{R_u + R_{on}}, \quad (2.32)$$

де Y_{on}, R_{on} - провідність і опір заземлення опор.

Зауважимо, що провідність Y_{on} протягом року в меншій мірі залежить від температури, оскільки глибина посадки в ґрунт більше 3 м. Згідно зі змінами в літній період на одному км колії провідність опор може досягати 0,3 ... 0,4 См, чому сприяє незадовільне утримання іскрових проміжків ІПМ-62. З досвіду експлуатації та розрахунків витікає також, що найбільш несприятливим періодом роботи рейкової лінії є зимовий, коли потенціали і струму можуть досягати найбільшого значення.

У табл. 2.3 наведені результати розрахунків схем ОЛС1, ОЛС2 при параметрах: $R_0 = 0,05 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$, $Y_0 = 0,04 \dots 4 \text{ См} \cdot \text{км}$. За такої схеми довжини ланцюгових схем 1...20 км.

За даними таблиці 2.3 побудована таблиця 2.4, в якій наведено розрахункові значення параметрів:

- ЕРС рейок і схем ОЛС-1, ОЛС-2 E_1, E_2 ;
- різниця цих ЕРС $\Delta E = E_1 - E_2$;
- різницю струмів в рейках на вході ОЛС-1,2 і коефіцієнт асиметрії $k_a = \frac{\Delta I}{I_1 + I_2}$

Таблиця 2.3 - Результати розрахунків параметрів ОЛС 1,2

Y_0	$Y_{on} + 0,4$	R_C	α	$e^{-\alpha l}$	Довжина							
					I		3	5	15	20		
					$\alpha l \cdot \frac{U_{6bix}}{I_{6bix}}$							
$См \cdot км$	$См \cdot км$	$Ом$	$Hn / км$	$l = 1 км$	$Hn \cdot Ом$							
0,04 $r = 25 Ом \cdot км$	-	1,12	0,0447	0,956	0,0447	$\frac{336}{300}$	$\frac{0,134}{0,874}$ $\frac{293}{262}$	$\frac{0,223}{0,8}$ $\frac{234}{243}$	$\frac{0,67}{0,511}$ $\frac{172}{153}$	$\frac{0,893}{0,409}$ $\frac{137}{122}$		
0,4	-	0,354	0,141	0,868	0,0447	$\frac{106,2}{300}$	$\frac{0,423}{0,655}$ $\frac{69,4}{196}$	$\frac{0,705}{0,494}$ $\frac{52,4}{148}$	$\frac{2,11}{0,121}$ $\frac{12,9}{360}$	$\frac{2,82}{0,06}$ $\frac{12,83}{17,9}$		
1,0	-	0,223	0,223	0,8	0,0447	$\frac{67,0}{300}$	$\frac{0,67}{300}$ $\frac{34,4}{153}$	$\frac{1,15}{0,328}$ $\frac{11,3}{98,4}$	$\frac{3,345}{0,036}$ $\frac{0,4}{10,5}$	$\frac{4,46}{0,0116}$ $\frac{0}{0}$		
2,0	-	0,158	0,316	0,73	0,316	$\frac{47,0}{300}$	$\frac{0,948}{0,387}$ $\frac{18,2}{116}$	$\frac{1,58}{0,206}$ $\frac{9,7}{61,8}$	$\frac{4,74}{8,7 \cdot 10^{-3}}$ $\frac{4,09}{2,62}$	$\frac{6,32}{1,8 \cdot 10^{-3}}$ $\frac{0,085}{0,54}$		
4,0	-	0,112	0,44	0,644	0,44	$\frac{33,6}{300}$	$\frac{1,32}{0,267}$ $\frac{9,1}{80}$	$\frac{2,2}{0,11}$ $\frac{3,7}{33}$	$\frac{6,6}{1,4 \cdot 10^{-3}}$ $\frac{0,047}{0,41}$	$\frac{8,8}{1,51 \cdot 10^{-4}}$ $\frac{0}{0}$		
	$\frac{0,44}{r_u = 2,2}$	0,337	0,148	0,86	0,148	$\frac{101}{300}$	$\frac{1,16}{0,86}$ $\frac{86,9}{258}$	$\frac{0,74}{0,477}$ $\frac{48,2}{143}$	$\frac{2,22}{0,108}$ $\frac{10,9}{32,4}$	$\frac{2,96}{0,052}$ $\frac{5,25}{15,55}$		
	0,12											
	$\frac{0,84}{r_u = 1,19}$	0,244	0,205	0,81	0,205	$\frac{61}{300}$	$\frac{0,615}{0,54}$ $\frac{33,0}{162}$	$\frac{1,227}{0,293}$ $\frac{17,8}{87,8}$	$\frac{3,075}{0,0412}$ $\frac{2,8}{13,86}$	$\frac{4,1}{0,0166}$ $\frac{1,02}{4,97}$		
	1,4											
	$\frac{2,4}{r_u = 0,416}$	0,144	0,345	0,708	0,345	$\frac{44,0}{300}$	$\frac{1,035}{0,355}$ $\frac{15,6}{106,5}$	$\frac{1,725}{0,178}$ $\frac{7,8}{53,5}$	$\frac{5,175}{5,6 \cdot 10^{-3}}$ $\frac{0,246}{1,697}$	- $\frac{0}{0}$		

Таблиця 2.4 - Розрахункові параметри

Довжина L	γ_0	$\gamma_0 + \gamma_{on}$	E_1	E_2	ΔE	ΔI	k_a
	$См \cdot км$	$См \cdot км$	B	B	B	A	-
3	0,04	0,44	$\frac{292}{262}$	$\frac{215}{192}$	77	70	0,154
	0,4	0,84	$\frac{220}{196}$	$\frac{181}{162}$	39	34	0,095
	2,0	2,4	$\frac{130}{116}$	$\frac{119}{107}$	11	9	0,04
	3,0	3,4	$\frac{105,7}{93,7}$	$\frac{98,2}{84,7}$	6,93	3,15	0,0387
15	0,04	0,44	$\frac{172}{153}$	$\frac{36,8}{32,94}$	135	120	0,64
	0,4	0,84	$\frac{159}{36,2}$	$\frac{5,6}{14}$	25	22,2	0,44
	2,0	2,4	$\frac{2,95}{2,7}$	$\frac{1,94}{1,7}$	1,04	40	0,227
	3,0	3,4	$\frac{1,0}{0,91}$	$\frac{0,72}{0,62}$	0,3	0,31	0,187

Значення параметрів представлені для довжин ліній 3 км і 15 км.

У графах $E_{1,2}$ знаменник вказує струм на виході ОЛС.

Аналіз розрахунків показав, що коефіцієнт асиметрії РЛ, що складається з двох ОЛС «рейка-земля», для довжини 3 км досягає 0,0403 ... 0,15; при зміні провідності $Y_{on_i+0,4}$ коефіцієнт знаходиться в межах від 0,44 до 2 См. Для довжини 15 км і при $Y_{min} = 0,4$ коефіцієнт k_a досягає 0,6, потім при $Y_{on_i} \rightarrow \max$ зменшується до 0,4, а при $Y_{on_i} \rightarrow 2...3См \cdot км$. Це добре пояснюється фізикою процесу: з ростом $x \cdot l$ струм в рейці ОЛС2 експоненційно знижується з більшою швидкістю, ніж в рейці ОЛС1.

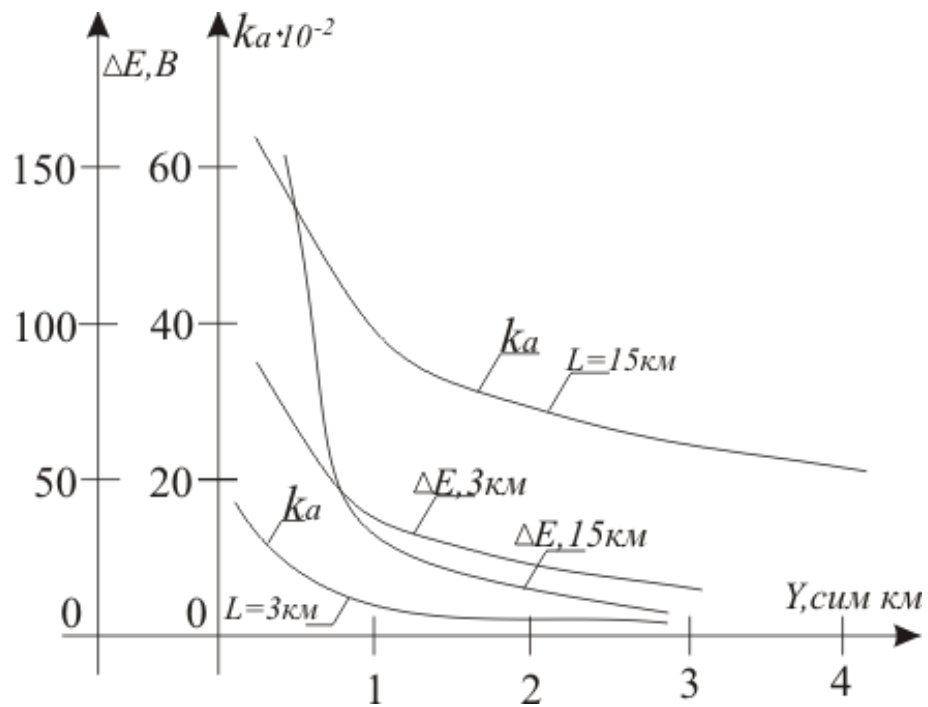


Рисунок 2.8 - Залежності коефіцієнта $k_a(Y)$ та різниці ЕРС $\Delta E(Y)$ в РЛ від провідності Y и $L_{зад}$

Різниця потенціалів між рейками ліній (рис.2.8) ОЦС1,2 з ростом провідності Y_o і Y_{on} також істотно швидко нелінійно спадає.

Згідно приведеної методики було написано програму у середовищі програмування Maple [56, 130], алгоритм роботи якої представлено на рис. 2.9 і дозволяє отримати епюри розповсюдження струмів та потенціалів уздовж рейок.

До вихідних даних алгоритму (рис. 2. 9) належать опір ізоляції, питомий опір однієї рейки, тяговий струм. Далі проводяться розрахунки методом чотиріполюсників для кожної з рейок окремо. Різниця полягає, як зазначалося раніше, у питомій провідності ізоляції. Відповідно, струми та потенціали на виходах одних чотиріполюсників та на вході інших будуть у різних у рейках. При чому чим більшою є кількість чотиріполюсників, тим більшою є точність отриманих даних.

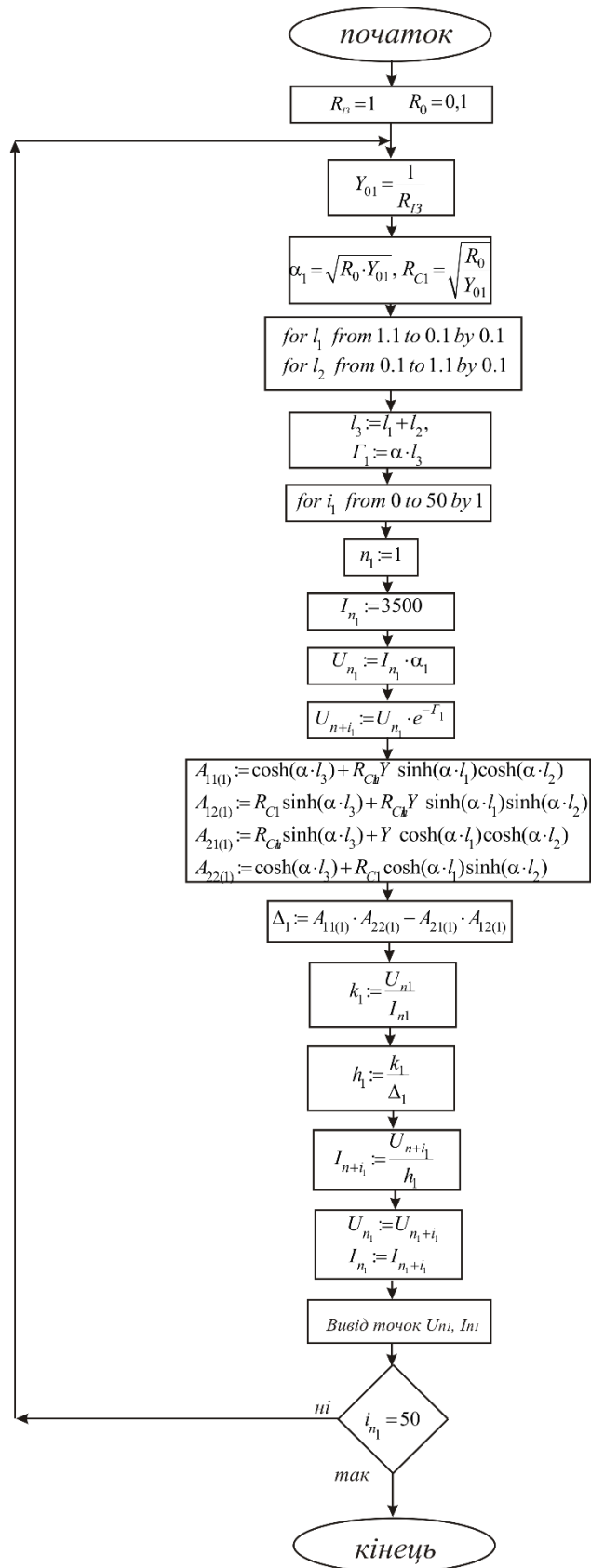


Рисунок 2.9 - Алгоритм роботи програми побудови розповсюдження струмів та потенціалів уздовж рейок

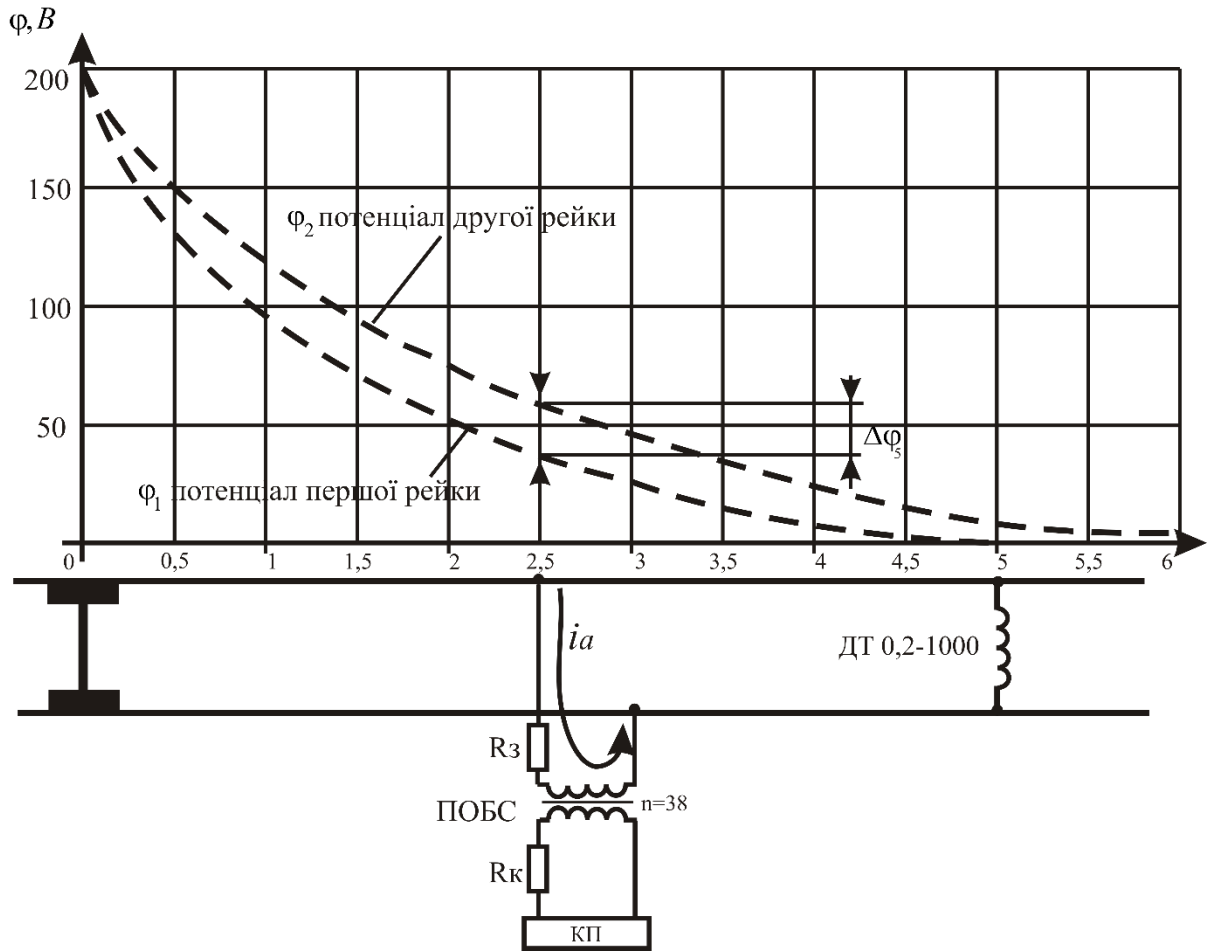


Рисунок 2.10 - Розповсюдження потенціалів уздовж рейок при встановленні ДТ кожні 6 км

Кількість чотириполіусників задаємо в алгоритмі. Далі отримані криві розповсюдження струмів та потенціалів уздовж кожної з рейок співставляються і, судячи з отриманої різниці, можна робити висновки щодо струмів асиметрії

Як бачимо з отриманих залежностей на рис. 2.10 та 2.11, рівні потенціалів для кожної з рейок будуть різними [70]. Їхня різниця спадатиме поблизу ДТ, що вирівнюють потенціали у рейках. Слід звернути увагу, що різниця потенціалів, $\Delta\phi$, на середині довжини підключення ДТ буде максимальною, наприклад, рис. 2.11, де приведено розповсюдження потенціалів уздовж рейок при встановленні ДТ кожні 5 км. При такому підключенні ДТ $\Delta\phi=35\text{ В}$, що є критичним.

На рис. 2.12 (а, б) приведені криві розповсюдження потенціалів уздовж рейок при встановленні ДТ кожні 3 км та 3,5 км, з яких видно, що $\Delta\phi$ на відстані 1,5 км буде максимальною і дорівнюватиме 14 В. Цей показник є значно меншим, аніж попередній.

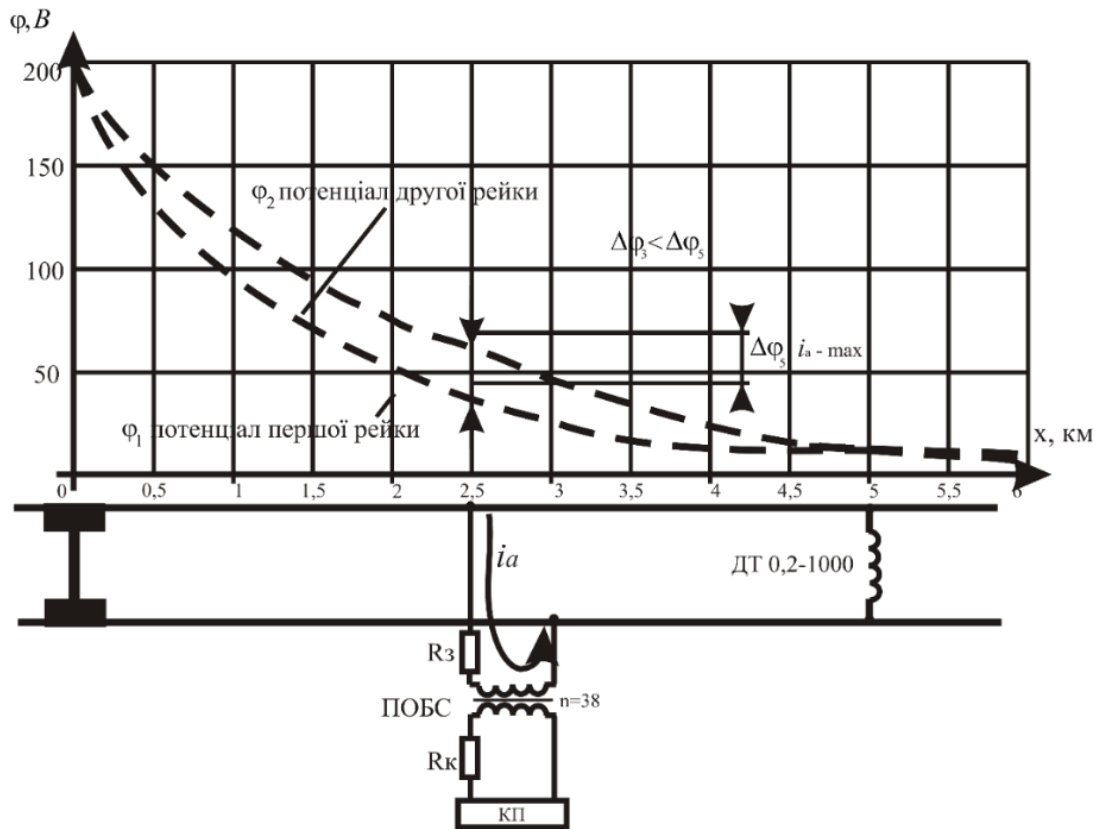
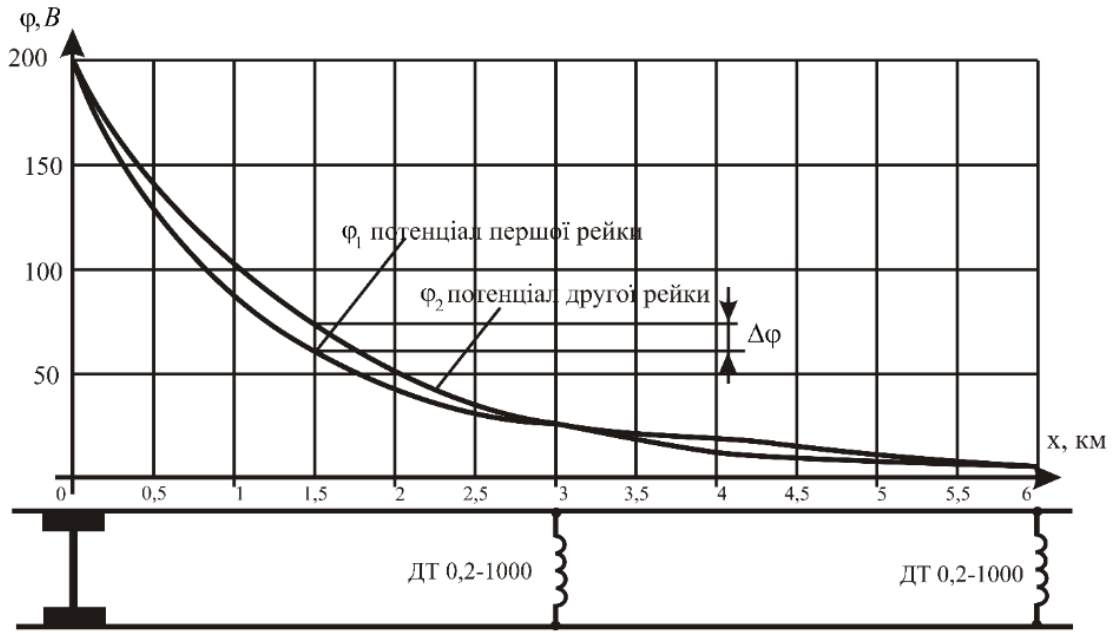


Рисунок 2.11 - Розповсюдження потенціалів уздовж рейок при встановленні ДТ кожні 5 км

На рис. 2.13 приведені залежності величини різниці потенціалів у рейках $\Delta\phi$ від інтервалу встановлення ДТ (через кожні 3 та 5 км). Як видно з рисунку, на половині відстані встановлення ДТ, як зазначалося раніше, різниця потенціалів досягає свого максимального значення. Напруга 35 В здійснюватиме негативний вплив на роботу апаратури РК, а саме: захисного резистору, автоматичного вимикача АВМ, розрядника РВНШ та колійного трансформатору ПОБС, роботу якого розглянуто у наступному пункті.



Розповсюдження потенціалів уздовж рейок

б)

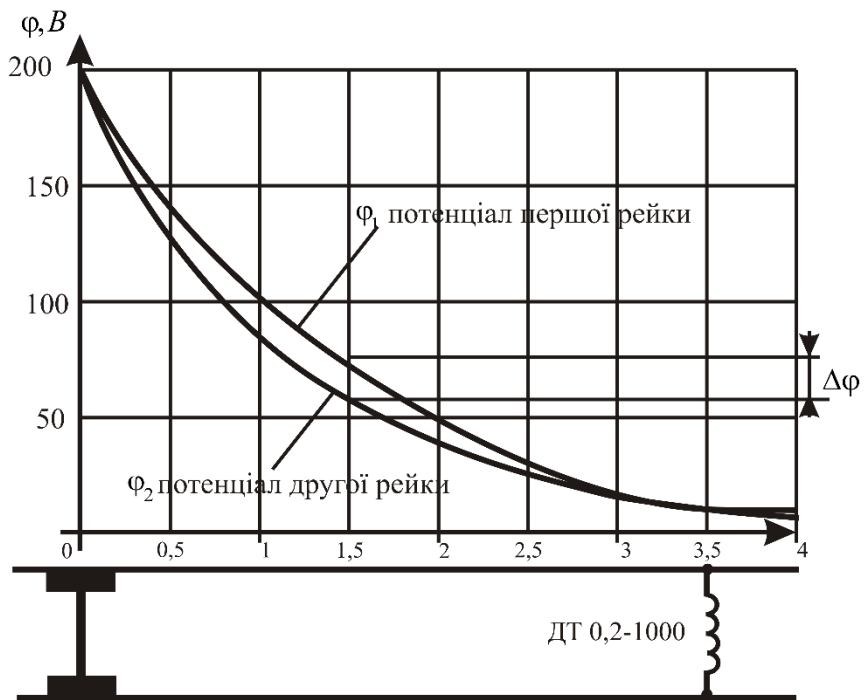


Рисунок 2.12 - Розповсюдження потенціалів уздовж рейок при встановленні ДТ:

- а) кожні 3 км;
- б) кожні 3,5 км.

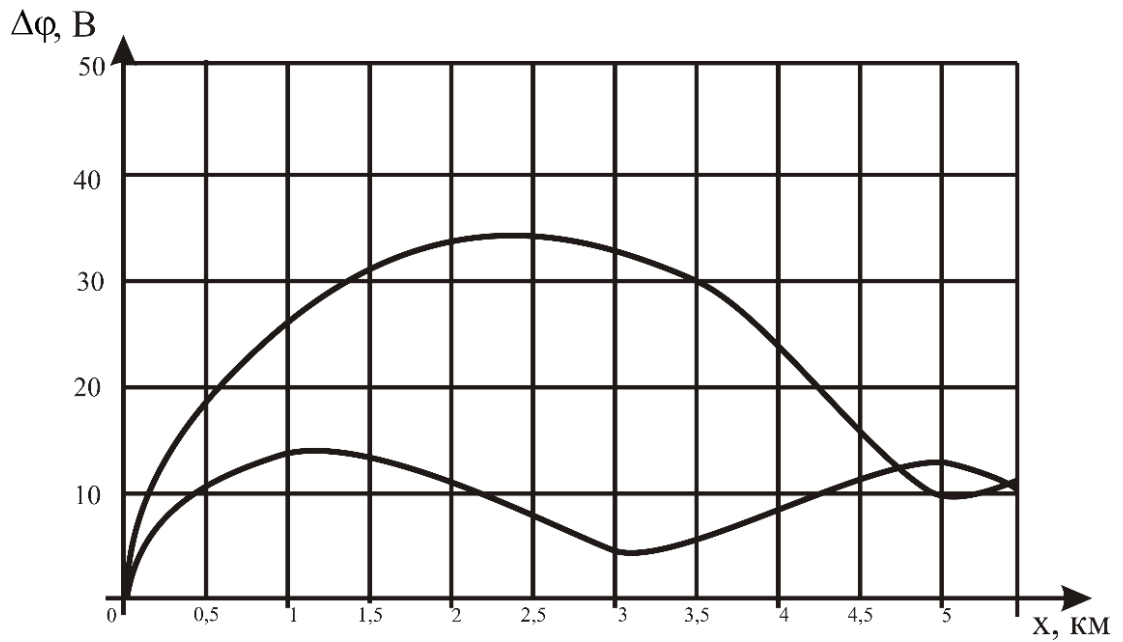


Рисунок 2.13 - Залежність різниці потенціалів від відстані встановлення ДТ

2.2.1 Дослідження роботи трансформатора ПОБС 2А

Трансформатори ПОБС призначені для експлуатації в безперервному режимі в складі апаратури СЦБ на залізницях в колах змінного струму частотою 25 і 50 Гц, також вони застосовуються у складі апаратури ТРК.

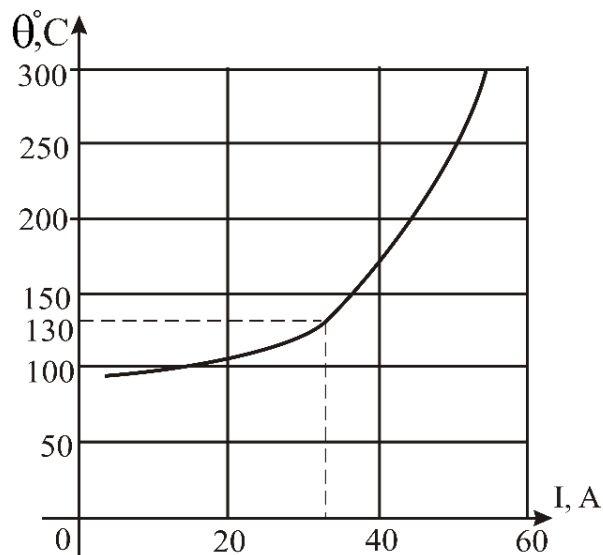


Рисунок 2.14 - Графік залежності температури нагріву трансформатора ПОБС2А від струму асиметрії

Було здійснено дослідження роботи трансформатора типу ПОБС 2А при відгалудженні в апаратуру ТРК струмів асиметрії. Внаслідок проведених розрахунків встановлено, що трансформатор нагріватиметься до температури 130°C при впливі струму величиною 34 А за 2,4 хв (рис. 2.14). З рис. 2.12 (а, б) видно, що різниця потенціалів при встановленні вирівнюючих ДТ кожні 3 та 3,5 км буде набагато меншою, аніж при інтервалі 5, 6 км. Тому для вирішення проблеми впливу струмів асиметрії на роботу апаратури ТРК пропонується встановлювати ДТ з меншим інтервалом. При виборі конкретного показника потрібно керуватися, по-перше, величиною різниці потенціалів, а по-друге, економічною ефективністю, яка при встановленні ДТ кожні 3,5 км буде більшою, ніж при інтервалі 3 км, при чому струм асиметрії відрізнятиметься не суттєво.

2.3 Висновки за розділом 2

Проведено дослідження впливу високих рівнів тягових струмів на апаратуру системи АБ.

Внаслідок проведених розрахунків було:

1. Отримано залежності напруги на колійному приймачі ($U_{КП}$) від струму асиметрії для опорів ізоляції у зимовий та літній період, згідно яких взимку вірогідність відмови РК відсутня, адже $U_{КП}$ хоча і знизиться, але є запас по напрузі. Влітку відмови цілком вірогідні, адже $U_{КП}$ знижується нижче порогу спрацювання. У цьому випадку потрібно проводити профілактичні роботи зі зниження коефіцієнту асиметрії та застосовувати певні технічні рішення.

2. Досліджено теплові режими роботи дросель-трансформаторів, дросельних перемичок. Було встановлено, що внаслідок тривалої дії високих рівнів тягових струмів їх термічна стійкість порушується.

3. Одним із запропонованих технічних рішень було дублювання дросель-трансформаторів на релейному та живлячому кінцях. Для такого варіанту підключення розраховано режими роботи РК, внаслідок якого встановлено, що шунтовий режим роботи є критичним за умови знаходження шунта на РК.

4. Запропоновано переобладнання розглянутого перегону тональними рейковими колами, у результаті чого кількість дросель-трансформаторів значно зменшується.

5. Було вдосконалено метод розрахунку розповсюдження потенціалів та струмів у рейковій мережі перегону для електричної тяги постійного струму, що відрізняється представленням загальної цепної схеми кожної рейки в якості чотириполюсників з урахуванням заземлення опор контактної мережі на крайні рейки, що дозволило оцінити рівні струмів асиметрії, які відгалуджуються в апаратуру тональних рейкових кіл і здійснюють вплив на роботу елементів рейкової мережі. Проведене дослідження допомогло оцінити різницю потенціалів, що відгалуджуватиметься і здійснюватиме негативний вплив на апаратуру ТРК.

6. Досліджено трансформатор типу ПОБС-2 А, а саме вплив струму асиметрії на його роботу, внаслідок чого встановлено, що при дії струму асиметрії 34 А ПОБС-2 А перегріватиметься до температури 130°C за 2,4 хв., тому пропонується встановлювати урівнюючі ДТ з меншим інтервалом, наприклад, кожні 3,5 км, внаслідок чого значно зменшуватиметься різниця потенціалів у рейках.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРУ ЧАСТОТИ ЯК ВТОРИННОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ТА ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ АПАРАТУРИ СЦБ ВІД ДІЇ ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД

Як зазначалося раніше, електронна апаратура систем ЗАТ перебуває у досить складній електромагнітній обстановці, адже на неї здійснюють вплив ПЗ, з одного боку, у вигляді грозових розрядів та блискавок, з іншого боку, у вигляді комутаційних перенапружень та коротких замикань тягової мережі. У попередньому розділі було розглянуто проблематичний перегон Лавочне - Бескид – Скотарське, що знаходиться у горах і характеризується дуже крутими підйомами, і вплив на роботу пристроїв СЦБ комутаційних перенапружень тягової мережі. Тепер потрібно розглянути іншу сторону великої комплексної проблеми: вплив грозових розрядів та блискавок, а точніше, забезпечення виключення проникнення ПЗ до апаратури систем ЗАТ.

Як свідчить проведений аналіз ЗЗ на сьогоднішній день не існує пристроїв, що повністю захищали би апаратуру ЗАТ від дії грозових розрядів та блискавок. Тому було вирішено розробити такий пристрій. За основу було взято перетворювач частоти ПЧ 50:25 і похідну від нього ПЧ 50:50-300 [66], що відрізняється від ПЧ 50:25 відсутністю постійної складової струму мережі. Це негативно впливає на роботу силових трансформаторів посту централізації за рахунок підмагнічування і нагріву їх магнітопроводів. Але найголовнішою особливістю та недоліком даного пристрою є наявність у конструкції обмотки зворотного зв'язку, через який ПЗ може відразу проникнути у вихідну контурну обмотку. Тому виникає необхідність у розробці такого пристрою захисту апаратури від дії грозових розрядів та комутаційних перенапружень, який би не володів вище приведеними серйозними недоліками.

У параметричних генераторах збудження електромагнітних коливань здійснюється на основі явища параметричного резонансу. Параметричні явища в

техніці відомі давно. Ще у 19 столітті їх вивченням в механічних системах займалися французькі вчені Мельде і Релей. Великий крок у розвитку теорії цих явищ був зроблений у 30-х роках минулого століття академіками Л. І. Мандельштамом та Н. Д. Папалексі, які досліджували явища параметричного резонансу і параметричного впливу коливань в електричних колах. У 1954 році параметричні генератори (параметрони) стали використовуватися в обчислювальних машинах. Поряд з цим йшов розвиток параметричних підсилювачів (ПП), що дозволили у багато разів збільшити чутливість радіоприймальних пристроїв.

Структура будови пристроїв вторинного живлення (ВДЖ) електронних систем практично збереглася колишньою, хоча використовується більш надійна елементна база і з меншим обсягом і вагою. Більш того, ці джерела живлення у ряді випадків мають недостатньо високу ступінь стабілізації вихідної напруги навантаження фільтрації і т.д., а також слабкий захист від короткого замикання, розрядів блискавки і комутаційних перешкод тягової мережі. Все це призводить до того, що схеми захисту від перешкод ВДЖ не завжди відповідають тепловим вимогам і будуються за принципом 2...5-східчастих захистів на трансформаторних напівпровідниках, що ускладнює схему і знижує її надійність.

Параметричні генератори мають широке застосування в якості генераторів контрольного струму у системах захисту електричних мереж, реле частоти, датчиків, джерел імпульсів частотою 25 Гц, в пристроях телевимірювання та зв'язку, в якості джерел живлення магнітних модуляторів інших гармонік, в системах зсуву фаз та інших елементах систем промислової автоматики.

Параметричні генератори будуються на магнітопроводах двох модифікацій з паралельними і неколінеарними полями. Паралельним є поле, в кожній точці якого вектори складових магнітної індукції складаються алгебраїчно; а в неколінеарні поля - складові індукції утворюють геометричну суму векторів.

3.1 Процес виникнення параметричного збудження коливань у генераторі

Як відомо, збудження електричних коливань є можливим у контурі з енергетичним параметром (індуктивністю або ємністю), що періодично змінюється.

При чому параметричне наростання комбінацій може мати місце тільки у тому випадку, якщо зміна L (або C) призводить до збільшення енергії коливань, що спочатку виникали у контурі, внаслідок несиметрії магнітних характеристик осердь або за рахунок незначних флуктуацій земного магнетизму. Такі слабкі коливання струму створюють напругу на ємності контуру, що змінюється приблизно за синусоїдальним законом [10].

Нехай індуктивність контуру дільника частоти зовнішнім джерелом енергії змінюється по наступному закону: в ті моменти часу, коли струм в контурі досягає максимуму ($i_k = \pm I_{max}$), індуктивність зменшується вельми швидко від значення L_2 до значення L_1 , а коли струм проходить через нульове значення, повертається до свого колишнього значення (рис. 3.1). При зменшенні індуктивності (моменти $t_0, t_2 \dots$) зовнішнім джерелом буде здійснюватися робота проти сил магнітного поля і енергія, що витрачається джерелом, дорівнюватиме приросту електромагнітної енергії контуру $0,5(L_2 - L_1) \cdot I^2 = 0,5 \cdot W_k \cdot \Phi_k \cdot \Delta i_{k1} = \Delta A_1$. Допускаючи, що магнітний потік при зміні індуктивності залишається незмінним, збільшення енергії контуру буде супроводжуватися стрибкоподібним збільшенням струму контуру приблизно на величину $\Delta i_{k1} = I_{kt} \frac{\Delta L}{L_{cp}}$.

Після отримання контуром прирощення енергії струм в індуктивності зменшується, а запасена в ній електромагнітна енергія буде переходити в електростатичну енергію конденсатора [118, 122]. Якщо через чверть періоду частоти контуру повернути індуктивність до її колишнього значення, то збільшення індуктивності не викликатиме зміни запасу енергії контуру, зосередженої в ємності, так як це відбувається в моменти $t_1, t_3 \dots$, тобто коли струм I_{kt} і, відповідно, електромагнітна енергія контуру дорівнюють нулю. При цьому на зміну індуктивності зовнішніх джерел, не витрачається енергія. Якщо у наступній чверті періоду, коли через індуктивність проходить струм протилежного напрямку, знову зменшити індуктивність, то отримаємо збільшення енергії в контурі на деяку

величину $\Delta A_2 > \Delta A_1$, оскільки струм контуру за першу половину періоду зріс на величину $\Delta i_{к1}$.

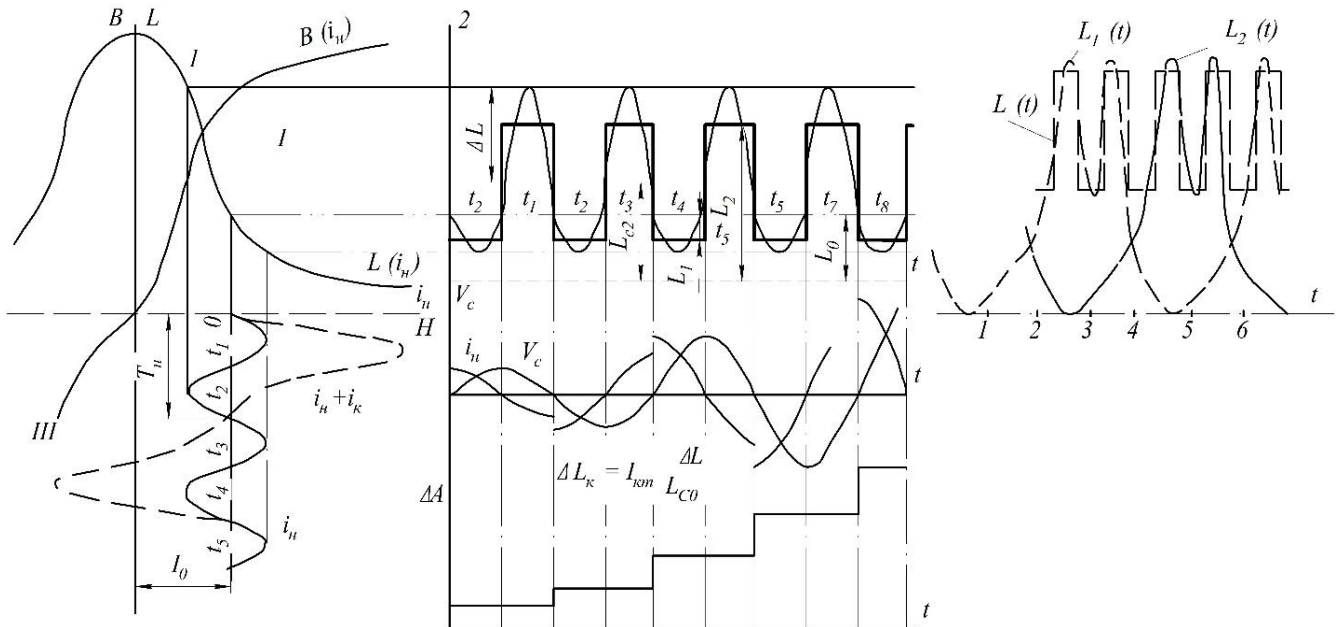


Рисунок 3.1 - Графіки зміни параметрів ПГ у процесі параметричного збудження

Конденсатор у коливальному контурі відіграє роль накопичувача енергії на ділянках переходу електромагнітної енергії в електричну, через кожні півперіоду він повертає накопичену енергію індуктивності. За кожний наступний цикл зміни індуктивності в контур вноситься нова «порція» енергії, яка викликає збільшення струму в контурі і напруги на конденсаторі. Енергія, запасена в контурі за період зміни струму, розсіюється на активному опорі. Отже, енергія контуру не буде спадати, а струм контуру не буде затухати в тому випадку, якщо буде справедливим наступне співвідношення:

$$0,5(L_1 - L_2)I_{кн}^2 \geq 0,5RI_{кн}^2 T_{II}.$$

Позначимо середнє значення індуктивності $m \geq \frac{R}{2L_{cp}} T_H \geq \delta T_H$, глибину

модуляції $m = \frac{R}{2L_{cp}}$, тоді нерівність може бути записано наступним чином:

$$m \geq \frac{R}{2L_{cp}} T_H \geq \delta T_H, \text{ де } T_H - \text{період зміни параметра.}$$

Звідси випливає, що коливання в контурі з індуктивністю, що змінюється вище приведеним чином, не буде затухати, якщо глибина модуляції не є меншою логарифмічного декременту загасання контуру. Таким чином, накопичення енергії в контурі відбувається за рахунок періодичної зміни енергоємного параметра, яке в реальній схемі перетворювача частоти здійснюється зовнішнім джерелом накачування. Тому поняттям «накачування» підкреслюється компенсація втрати енергії системи завдяки роботі, що здійснюється при модуляції індуктивності джерелом накачування (енергія як би накачується в систему). Відповідно до цього надалі використовуватимемо такі терміни, як «струм накачки», «напруга накачки» замість терміну «напруга мережі».

Графік зміни параметрів рис. 3.1 а, б, в, дозволяє виділити наступні особливості параметричного збудження коливань:

1. Найефективнішим режимом порушення коливань є такий, при якому зміна параметр відбувається з частотою накачки [115] вдвічі більшою частоти збуджених коливань (рис. 3.1, а)

2. Важливе значення мають фазові співвідношення між зміною індуктивності і струму. Якщо змістити моменти зміни індуктивності L на Δt за часом t або на $2\omega\Delta t$ за фазою, то зменшення L буде відбуватися тоді, коли $|i| < |I_{KT}|$ що призведе до зменшення енергії, що вноситься у контур; збільшення L буде відбуватися при $U \neq 0$, а тому буде супроводжуватися витратою енергії контуру. Якщо ж зрушити моменти зміни індуктивності на $\Delta t = \frac{T_H}{4}$, то індуктивність буде зменшуватися ($i_H \approx 0$) і збільшуватися ($|i_K| = I_{KT}$), адже енергія у контур взагалі не буде надходити,

і її витрата при цьому виявиться найбільшою. Така зміна L призведе до збільшення загасання контуру.

Якщо говорити про трансформацію енергії, що відбувається у параметричному генераторі, то за приклад можна взяти розгойдування гойдалок. Нехай до центру маси M , що розгойдується на гойдалках, відстань R . При відхиленні маси від нижньої точки вертикалі на висоту потенціальна енергія складатиме $W_{\text{п}} = M \cdot \Delta h$.

У міру обертання гойдалок ця енергія переходить у кінетичну енергію, де $W_{\text{к}} = \frac{mV^2}{2} = \frac{J\omega^2}{2}$, де $J = MR^2$ момент інерції, $\omega = \frac{V}{R}$, V - лінійна швидкість обертання маси. Нехай до моменту досягнення вертикалі той, що розгойдується присідає, при цьому радіус до центру маси зростає на ΔR . Вважаючи частоту ω незмінною, за цикл коливань швидкість проходження гойдалками нижньої точки зростає на величину $V_1 - V_0 = \omega \Delta R$, а кінетична - на величину $2 \cdot \Delta W_{\text{к}} = 2m\omega^2(R + \Delta R)$. З балансу енергій $W_{\text{к}}$ і $W_{\text{п}}$ випливає, що в кожному циклі буде зростати і потенційна енергія, оскільки висота підйому маси зростає. Звідси випливає, що за цикл коливання гойдалок в систему двічі вноситься енергія, причому в наступні цикли збільшення енергії і коливань буде зростати за експоненціальним законом. Цей процес називається параметричним збудженням коливань: параметр (маса) здійснить коливання з частотою, яка дорівнює половині частоти зміни радіуса до центра маси.

Завдяки розміщенню обмоток під кутом 90° змінний струм обмотки накачки створює магнітний потік, що не перетинає контурну обмотку. У зв'язку з цим принципово виключається трансформація струму накачування в контур дільника [114, 123], у тому числі при частковому замиканні витків обмотки накачки. Виконання цієї умови є обов'язковим для виключення неправильної роботи фазочутливого колійного реле. Принцип дії цього генератору частоти також заснований на явищі параметричного резонансу [125].

Отже, усі вище перераховані властивості, особливості та характеристики ми надалі використовуватимемо для створення такого генератору, який би використовувався би і як ВДЖ, і як пристрій захисту від дії грозових розрядів.

У сталому режимі генерації в генераторі з неколінеарними магнітними полями можна також виділити два характерних магнітних стани секції магнітопроводу. Конструктивний аналіз напрямів магнітних потоків в секціях та векторної діаграми потоків обмоток показує, що протягом періоду частоти накачки потоки обмоток поперемінно складаються (віднімаються) у двох діагонально розташованих секціях. Виявляється, що сума потоків чотирьох секцій дорівнює потоку обмотки накачки, створеному струмом цієї обмотки, такий же процес відбувається і з потоком контурної обмотки.

Параметричний генератор з ортогональними (колінеарними) полями являє собою як дільник частоти з паралельними полями, так і суттєво нелінійний пристрій, що володіє електричними властивостями, які дають можливість досить ефективно використовувати його для різних цілей. Він складається з магнітопроводу, виконаного у вигляді прямокутного паралелепіпеда з чотирма наскрізними вікнами, розташованими на діагоналях його граней.

3.2 Вибір схеми параметричного генератора та параметрів його елементів

Із впровадженням швидкісного руху на залізницях України постає питання підвищення вимог щодо захисних пристроїв апаратури СЦБ, адже комутаційні перенапруги, грозові розряди та розряди блискавки, як зазначалося раніше, створюють достатньо серйозні проблеми в роботі пристроїв ЗАТ, безперебійне функціонування яких є невід'ємною частиною забезпечення безпеки руху залізничного транспорту. Внаслідок цього, як зазначалося раніше, виникла потреба у розробці такого пристрою захисту від дії ПІЗ, який би володів високим коефіцієнтом корисної дії (ККД), стабільністю вихідної напруги, повністю задовольняючи теплові режими роботи пристроїв СЦБ. Саме таким пристроєм є ПГ на неколінеарних магнітних полях, який може використовуватися як для живлення, так і для захисту навантаження від завад.

За основу було взято параметричний генератор [25], конструкційною особливістю якого є наявність зворотного зв'язку між вхідною обмоткою накачки та

вихідною обмоткою контуру. Цей пристрій являє собою індуктивний параметричний генератор [128, 129], що містить феромагнітне осердя з неколінеарними магнітними полями, три обмотки: вхідну, вихідну та зворотного зв'язку.

Як зазначалося раніше, наявність у конструкції ПГ обмотки зворотного зв'язку є суттєвим недоліком, адже через неї ПЗ може проникнути у вихідну обмотку. Іншим важливим недоліком є недостатня стабільність вихідної напруги при зростанні вхідної напруги. Тому, виходячи із суджень усунення цих серйозних недоліків було розроблено інший ПГ, основною технічною задачею якого було би підвищення надійності роботи, покращення енергетичних показників та коефіцієнту стабілізації вихідної напруги ПГ шляхом вдосконалення схеми кола накачки.

Цього пропонується досягнути шляхом спрощення схеми вхідного кола і введення в його коло конденсатору, ємність якого утворює з індуктивністю обмотки накачки резонансний контур, та розділення обмотки накачки на дві зустрічно увімкнені секції з різною кількістю витків.

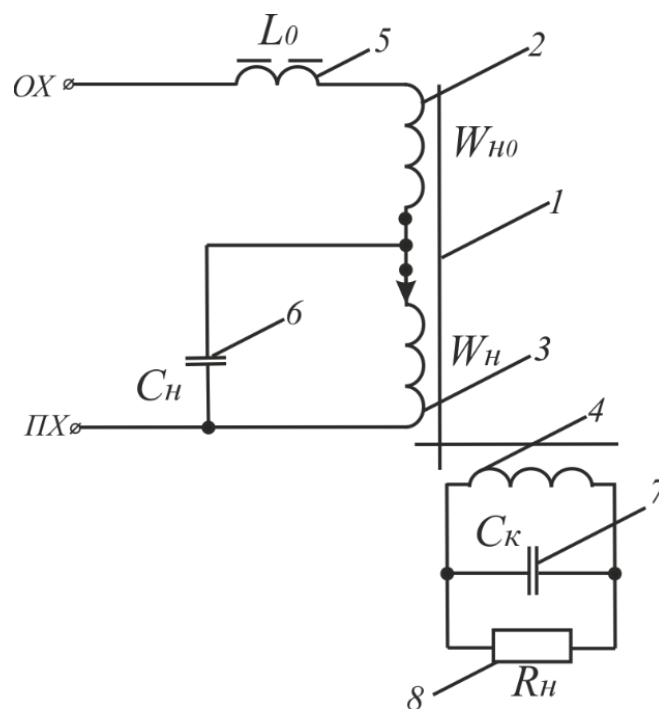


Рисунок 3.2 - Двоконтурний параметричний генератор з захистом навантаження від завад

ПГ містить феромагнітне осердя 1, обмотку накачки, що складається із секцій W_{H0} 2 та W_H 3, контурної обмотки 4, лінійної індуктивності 5, що послідовно підключена до секції W_{H0} 2 вхідної обмотки W_H 2, 3 та конденсатору 6, який паралельно підключений до W_H 3 секції обмотки накачки, вихідного контуру, що містить конденсатор 7 та навантаження 8, які паралельно підключені до контурної обмотки W_K .

Пристрій працює наступним чином. У основі роботи параметричного генератора частоти знаходиться явище параметричного резонансу, сутність резонансу полягає в наступному: при підключенні вхідної напруги в коло накачки генератора індукція в магнітному колі осердя впливає на нелінійну індуктивність контуру з частотою в два рази більшою, ніж частота живлячої мережі. При надходженні струму 50 Гц в контурі останній, взаємодіючи з індуктивністю контуру, забезпечує передачу енергії від джерела живлення в контур

$$\Delta W = \frac{1}{2} \int_0^T i_{1K}^2 dL_2 = L_2 \frac{\pi}{4} I_{1K}^2 \sin 2\varphi$$
, де I_{1K} - амплітуда першої гармоніки струму контуру; L_2 - друга гармоніка кривої індуктивності контуру.

Встановлено, що введення у схему вхідного кола LC -контур, утвореного ємністю додаткового конденсатора та індуктивністю обмотки накачки, дозволяє суттєво покращити енергетику параметричного генератора. Цьому сприяє також підключення двох секцій обмотки накачки W_H та W_{H0} , увімкнених між собою зустрічно.

Одна з секцій W_{H0} разом з лінійною індуктивністю L_0 (рис. 3.2) обмежує індукцію в обмотці накачки, якщо напруга джерела живлення зростає, або в LC -контурі проявляється ферорезонанс струмів. Як показано на рис. 3.3, струм в середині LC -контур завжди змінюється на ділянці $d-q$ (заштрихована зона) амплітудної характеристики контуру, не перевищуючи задане значення I_{2cp} . Зі зростанням напруги на обмотці накачки підсилюється насичення сталі, що

супроводжується зниженням індуктивності обмотки накачки. При цьому реактивні опори конденсатора контуру та індуктивності обмотки наближаються до границі ферорезонансу струмів, при цьому струм у контурі зростає, а струм I_1 живлячої мережі падає, при цьому зростає коефіцієнт корисної дії. Дослідження показали, що при вибраних параметрах ємності, витків секції та лінійної індуктивності повний ферорезонанс струмів може виникнути тільки за межами граничних рівнів напруги живлячої мережі. Введення у вхідне коло генератора резонансного LC-контуру дозволить вирішити задачу покращення енергетики параметричного генератора. Схема забезпечує зниження струму на вході перетворювача приблизно обернено пропорційно зростанню струму в середині контуру.

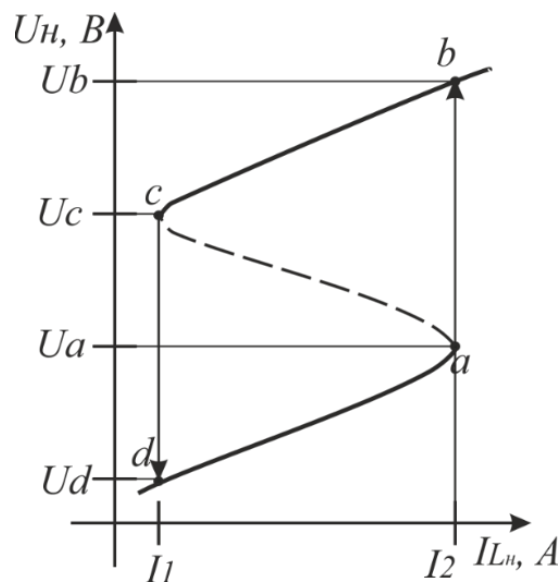


Рисунок 3.3 - Амплітудна вольт-амперна характеристика ферорезонансу струмів

Для того, щоб скласти математичну модель, що описувала би роботу ПГ, потрібно визначитися з вихідними даними, тобто параметрами схеми, які би найкращим чином реалізували вихідні характеристики ПГ та ККД. Для цього потрібно розрахувати потужність навантаження, число витків обмоток накачки та

контур, ємність параметричного контуру та ін. У будь-кому випадку усі ці розрахунки будуть потребувати уточнення експериментом.

Найбільш сприятливим для стаціонарного режиму роботи параметричного генератора та для забезпечення максимуму коефіцієнту корисної дії є вибір раціональної лінійної індуктивності L_0 в межах 0,3..0,5 Гн. У цьому випадку досягаються мінімальне значення струму в обмотці накачки і розрахункова вихідна потужність.

Напругу мережі задаємо $U_H = 235 \text{ В}$.

Потужність навантаження $\geq 200 \text{ Вт}$ (потребує уточнення експериментом).

$$P = V \cdot b \cdot h \cdot f \cdot k_3 = 1,267 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 50 \cdot 2000 = 209 \text{ Вт}.$$

де $V = 1,267 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ об'єм сталі.

Число витків обмотки накачки

$$W_H = \frac{U_H}{4,44 \cdot f \cdot b_H \cdot S \cdot 10^{-4}} = 350,$$

перетин $S = 20,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;

Число витків контурної обмотки при $b_K = 1,75 \text{ Тл}$

$$W_K = \frac{235}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,75 \cdot 20,2 \cdot 10^{-4}} = 300$$

Ємність параметричного контуру, якщо номінальний опір дорівнює:

$$R_H = \frac{U^2}{P} = 240 \text{ Ом},$$

$$C_K = \frac{10^6}{\delta \cdot \omega \cdot R_{np}} = \frac{10^6}{0,29 \cdot 314 \cdot 240} \approx 40 \text{ мкФ}.$$

Струм в обмотці контуру

$$I_K = \frac{U_{вих}}{X_C} = \frac{235}{63,69} = 3,69 \text{ А (потребує уточнення експериментом)}$$

У деякому діапазоні зміни індукції (напруги) в обмотці накачки W_H , у колі $(L_0 + L_{W_{H0}}) - C_k$ виникає ферорезонанс напруг, що прискорює процес встановлення генерації частоти 50 Гц у вихідному контурі.

Скористаємося методом розрахунку за діючим значенням напруги (струму), аналізуючи явища. Тут, фактично, несинусоїдальні величини U та i замінюються їх еквівалентами синусоїд.

Скористаємося вольт-амперною характеристикою нелінійної індуктивності. На рис. 3.4 приведена вольт-амперна характеристика (ВАХ) послідовного резонансного кола. Точки, що належать результуючій ВАХ схеми - вигнута N -подібна крива $E(\sum(U_L - U_C) + U_R)$, що ілюструє тригерний ефект $L-C-R$ кола – стрибок струму з точки 2 в точку 4. Результуюча напруга ВАХ дорівнює гіпотенузі трикутника, побудованого на катетах i -ї точки $U_R, U_L - U_C$

Для досліджень беремо криву намагнічування сталі магнітопроводу, використовуючи формулу апроксимації $h = \alpha sh\beta b$, знайдену для сталі 2412, де $\alpha = 2,06 \frac{A}{m}$, $\beta = 4,8 \frac{1}{Tl}$. Ця формула має переваги, адже вона описує фізичні процеси у більш широкому діапазоні зміни індукції. По ній будується залежність $b(h)$ перетворювача. Далі методом вольтметра-амперметра будується ВАХ $E(I)$ обмотки, а по формулам $E = 4,44 \cdot f \cdot b \cdot S \cdot W_H$ (формула добре працює до B_s , за «другим» коліном) або $h = \alpha sh\beta b$ перевіряється точність побудови ВАХ $E(I)$ (рис. 3.4).

Методика побудови характеристики відома і її сутність коротко полягає у наступному: головним завданням є побудова узагальненої залежності напруги на індуктивності U_L від вхідної напруги. Із заданої точки $E = 150 \text{ В}$ проводим дотичну (лінія А рис. 3.4) до кривої U_L . Торкання відбулося в точці a ВАХ індуктивності кола при струмі $I_2 = 0,35 \text{ А}$. Потім проводимо ВАХ ємності (лінія В) U_C , яка повинна пройти з початку координат паралельно дотичній. Тангенс кута нахилу лінії В до осі абсцис чисельно дорівнює $\frac{1}{\omega C} = \text{tg}x$, тому ємність $C_1 = 40 \text{ мкФ}$, як і у

попередніх розрахунках. Причому, повинні бути враховані масштаби напруги

$m_E = 5 \frac{B}{мм}$ та струму $m_i = 0,05 \frac{A}{мм}$. Тоді $tg\alpha = \frac{E \cdot m_i}{I \cdot m_v} \approx 0,8$; $X_C = \frac{E}{I} = 80 \text{ Ом}$, звідси

$$C = \frac{10^6}{0,8 \cdot 314 \cdot \left(\frac{m_E}{m_L} = 100\right)} = 40 \text{ мкФ}.$$

У момент ввімкнення генератору струм у $L-C-R$ кола стрибком змінюється з $I_2 = 0,35$ до $3,1 \text{ А}$, тобто у 8 разів.

Ферорезонанс напруг досліджується для визначення його області у початковий момент генерації коливальних, адже він забезпечує стрибок U_L у колі накачки, далі мови ферорезонансу напруг зникають, так як індуктивність $L_{обм}$ обмотки накачки падає, але виникає ферорезонанс струмів, що працює в області стаціонарних коливальних у контурі. Ферорезонанс напруг у даному випадку прискорює процес генерації кидком напруги на L_n і це його корисна властивість. Зато ферорезонанс струмів працює надалі і забезпечує мінімум вхідного струму, стабілізацію індукції від вхідної напруги, струму з мережі та підвищення ККД.

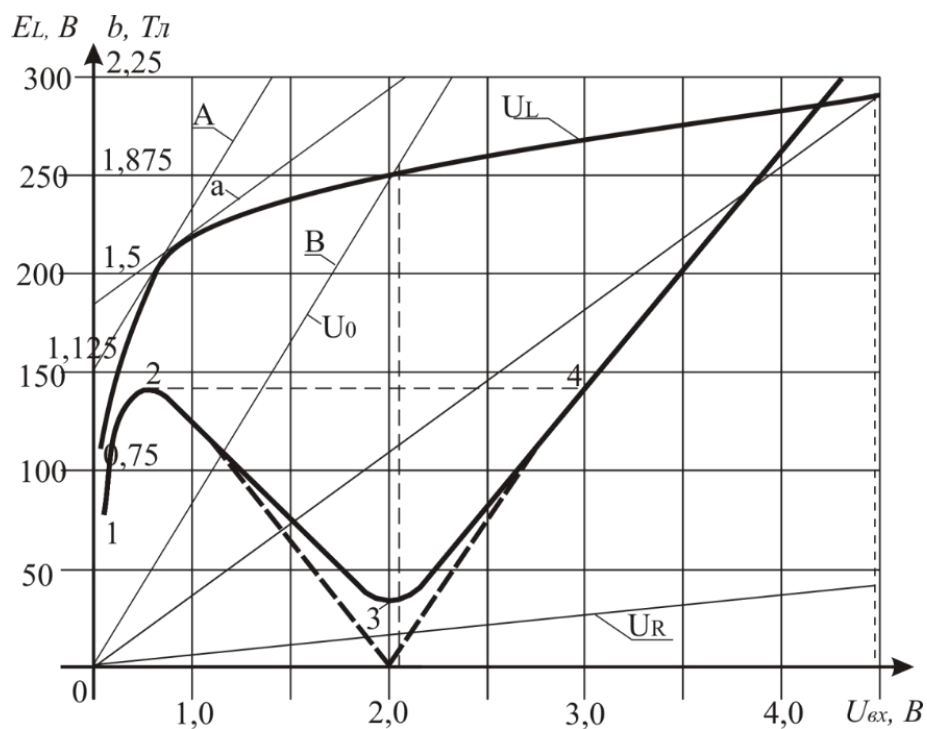


Рисунок 3.4 - Вольт-амперна характеристика паралельного резонансного кола

Оскільки при ферорезонансі напруг перша гармоніка струму збігається по фазі з напругою E джерела ЕРС (точка перетину прямої U_C та кривої U_L , (рис. 3.5). Явище ферорезонансу можна спостерігати, змінюючи E джерела живлення і параметри обмотки індуктивності-накачки або осердя магнітопроводу.

Отже, за допомогою вище приведених розрахунків було визначено конструктивні параметри ПГ, зокрема, W_H, W_K, R_H, L_0, C_H , які у подальшому знадобляться при складанні математичної моделі і виготовленні макетного зразку для проведення низки досліджень.

3.3 Математичне моделювання параметричного генератору частоти

ПГ 50:50

Введення додаткових елементів у вхідне коло ПГ, у першу чергу, вимагає розробки нового математичного обґрунтування доцільності. Більш зручним виявилось розбиття циклу досліджень параметричного генератора на дві частини.

3.3.1 Дослідження диференційного рівняння, що описує роботу вхідного кола параметричного генератору

Згідно законам Кірхгофа (рис. 3.3) складена система рівнянь генератору:

$$\begin{cases} i = i_C + i_H + i_R \\ L_0 \frac{di}{dt} + \frac{d\psi}{dt} \left(1 - \frac{1}{n_{mp}}\right) = E_m \end{cases}, \quad (3.1)$$

Нехай нелінійна характеристика $\psi(i)$ апроксимується неповним поліномом третього ступеня $i = a\psi + b\psi^3$, коефіцієнти знайдені методом вибраних точок і рівні $a = 4,23 \frac{A}{B \cdot c}$, $b = 4,244 \frac{A}{B^3 \cdot c^3}$.

де i_C, i_H, i_R - струми, що протікають, відповідно, через ємність, обмотку накачки і резистор;

Ψ - магнітний потік обмотки накачки W_H ;

L_0 - лінійна індуктивність;

коефіцієнт $\beta = (1 - \frac{1}{n_{mp}})$ - враховує дійсне потокозчеплення осердя

магнітопроводу з урахуванням обмотки W_{H0} накачки;

$n_{mp} = \frac{W_H}{W_{H0}}$ - співвідношення витків зустрічно включених секцій обмотки

накачки.

Перетворюючи (3.1) запишемо рівняння для струмів у такому вигляді:

$$C \frac{d^2 \Psi}{dt^2} + (a\Psi + b\Psi^3) + \frac{1}{R} \frac{d\Psi}{dt} = i \quad (3.2)$$

Після диференціювання (3.2) і підстановки результату в (3.1) маємо:

$$C \frac{d^3 \Psi}{dt^3} + (a + 3b\Psi^2 + \frac{\beta}{L_0}) \frac{d\Psi}{dt} + \frac{1}{R} \frac{d^2 \Psi}{dt^2} = -E_m \omega \cos \omega t .$$

Використовуючи позначення $x = \frac{\Psi}{\Psi_m}$, $\tau = \sqrt{\frac{a}{c}}$, $t = \omega_0 t$, $\gamma = \frac{1}{\omega_0 CR}$,

$\lambda = \frac{a}{\omega_0^2 C} + \frac{b}{\omega_0^2 CL_0}$; $\nu = \frac{3b}{\omega_0^2 C}$ отримаємо нормоване рівняння типу Дуффінга [102]

$$\frac{d^3 x}{d\tau^3} + \frac{d^2 x}{d\tau^2} \gamma + (\lambda + \nu x^2) \frac{dx}{d\tau} = K \cos \alpha \tau , \quad (3.3)$$

де $K = \frac{E_m}{\omega_0^2 CL_0}$.

Рішення першого наближення (4) будемо шукати у вигляді:

$$x = X_m \cos \alpha t .$$

Тоді

$$\frac{dx}{d\tau} = -\alpha X_m \sin \alpha \tau , \quad \frac{d^2 x}{d\tau^2} = -\alpha^2 X_m \cos \alpha \tau , \quad \frac{d^3 x}{d\tau^3} = \alpha^3 X_m \sin \alpha \tau . \quad (3.4)$$

Підставляючи ці співвідношення у вихідне рівняння (3.3) після перетворень отримаємо

$$(\alpha^2 - \alpha\lambda)X_m - 0,5\nu\alpha X_m^3 = K. \quad (3.5)$$

При отриманні (3.5) знехтували деякими складовими і третьої гармонікою, причому фазу зовнішнього збурення також виключили з розгляду. Рівняння (3.5) третього порядку відносно X_m допомагає визначити амплітуду, яку потрібно знайти (3.5), вирішувалося за формулою Кардано.

Рівняння (3.5) для зручності запишемо в наступному вигляді:

$$a_1 X_m^3 + a_2 X_m + K = 0, \quad (3.6)$$

де: $a_1 = 0,5\alpha\nu$, $a_2 = \alpha^2 - \alpha\lambda$.

За допомогою (3.6) проведено аналіз впливу величин елементів (L_0 , α , C) на рівень напруги накачки перетворювача.

Спочатку проведемо оцінку впливу індуктивності L_0 (рис. 3.7) на амплітуду напруги обмотки накачки. Розрахунки виконані з використанням аналітичного рішення (3.6) при параметрах: $L_0 = 0,18 \dots 0,36 \dots 0,527$ Гн, вхідна напруга початку генерації 190 В, коефіцієнти $\alpha = 1,0$; $\beta = 0,857$; частота $\omega_0 = 314$ с; ємність вхідного кола $C_H = 40$ мкФ; максимальна величина потокозчеплення $\psi_m = 1,237$ Вс.

Таблиця 3.1 – Результати основних параметрів напруги

L_0 , Гн	a_1 , \bar{b}/p	a_2 , \bar{b}/p	Ψ , Вс	E_m , В	B_n , Тл	Q , \bar{b}/p
0,18	0,86	4,0	0,643	201,2	1,62	1,08
0,36	1,486	4,425	0,87	273	1,88	1,45
0,527	1,66	3,06	0,88	278	1,91	1,465

За величиною коренів рішення $x = \frac{\Psi}{\Psi_m}$ визначається амплітуда потокозчеплення [42, 62] і величина модулю напруги накачки $\sup U_n = \omega \Psi \leq U_{нзад}$, а також індукція осердя магнітопроводу.

У табл. 3.1 приведені результати розрахунків основних параметрів напруги на виході вхідного кола генератора (рис. 3.6).

Видно, що лінійна індуктивність здійснює істотний вплив на параметри кола – на напругу і індукцію обмотки накачки, за умови, що індуктивність не перевищує 0,25 Гн. Лінійну індуктивність у подальшому змакетуємо на базі реактору РОБС шляхом зміни числа витків обмотки; щоб струм, що протікає по обмотці накачки, не перевищував 3 А.

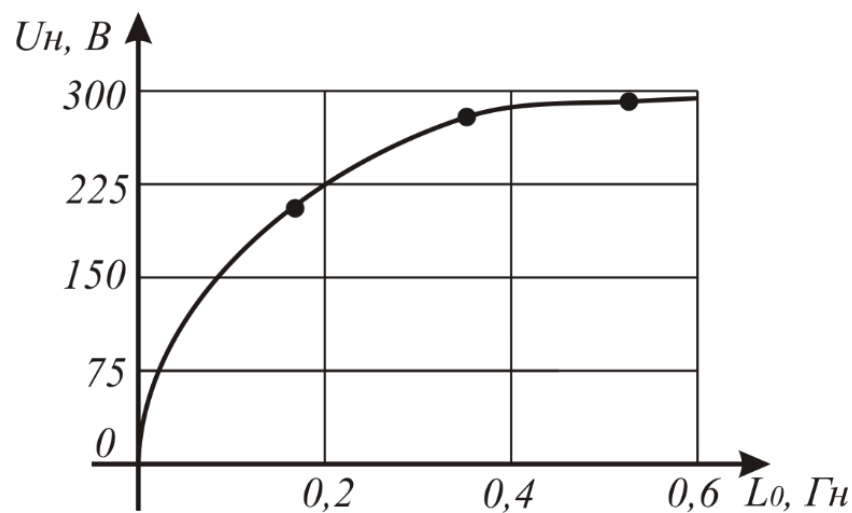


Рисунок 3.7 - Функція $U_n(L_0, U_{ген} = 190 \text{ В})$

На рис. 3.7 побудована залежність напруги накачки від індуктивності при заданій вхідній напрузі живильної мережі.

Звернемося до аналізу впливу ємності вхідного кола на електричні параметри генератора. Нас цікавитиме зміна напруги на ємності C_n (рис. 3.8) в момент ввімкнення генератору у мережу, тобто припускаючи, що в лінійному колі $L'_0 - C_n$ ($L'_0 = L_0 - L_{Wn0}$) можливий ферорезонанс напруг. Зауважимо, що нелінійна

індуктивність L_{W_H0} обмотки накачки W_H у вхідному колі впливає на протікання електричних процесів у цьому ж вхідному колі. Такий вплив враховано диференціальним рівнянням (3.3) і його рішенням.

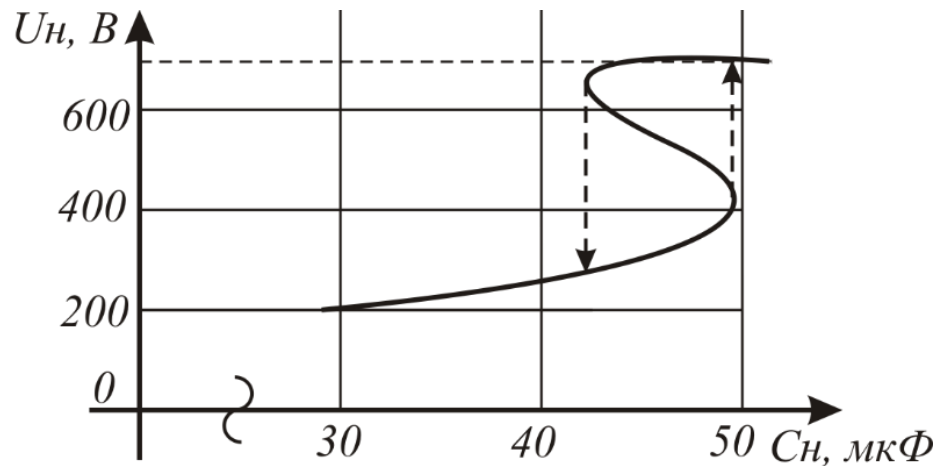


Рисунок 3.8 - Характерний вид амплітуди напруги накачки від ємності кола (тригерний ефект)

Результати рішення рівняння (3.6) показали, що при ємності C_H , близькій за величиною 50 мкФ, відбувається стрибок амплітуди напруги на елементах $L_0 - C_H$ лінійного кола до 700 В (рис. 3.8), що є характерним при ферорезонансі напруг.

Зауважимо, що власна частота цього кола $\omega_0^2 = \frac{1}{L_0 C_H} = 324 \frac{1}{с}$.

Для аналізу режимів роботи в процесі експлуатації параметричного генератора важливо також знати межі відхилення стабільності електричних характеристик, зокрема напруг на обмотках накачки і вихідного контуру. Розрахунки показали, що така стабільність істотно залежить від частотного розладу вхідних контурів (елементи L_0, L_H, C_H). На рис. 3.9 представлені залежності напруги обмотки накачки від розладу $\alpha = \frac{\omega}{\omega_0}$. Розрахунки аналогічної залежності $U_H(\alpha)$ проведені за рівняннями

(3.6) и (3.8). Одна з них випливає з рівняння Дуффінга [14], інша - з отриманого при

інших рівних значеннях параметрах вхідної схеми розширеного рівняння Дуффінга (3.7).

Розрахункове рівняння (3.8) випливає з рівняння Дуффінга, застосованого до вхідного кола генератора:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C} \left[\left(a + \frac{1}{L_1} \right) \psi + b\psi^3 \right] = -\frac{U_m}{\omega L_1 C} \cos \omega t \quad (3.7)$$

Для розв'язання рівнянь (3.3) і (3.7) прийнято метод гармонійного балансу. Отримано рішення (3.7) в такому вигляді:

$$0,75vx^3 + (\lambda - \alpha^2)x + K = 0, \quad (3.8)$$

Прийняті позначення: $v = \frac{b}{\omega_0^2 C}$; $\lambda = \frac{E_0}{\omega_0^2 C}$; $E_0 = -a + \frac{1}{L_1}$.

Розрахункові параметри: $L_1 = 0,19 \text{ Гн}$, $R = 400 \text{ Ом}$, $C_H = 40 \text{ мкФ}$, $E_{m0} = \sqrt{2} \cdot 250 \text{ В}$.

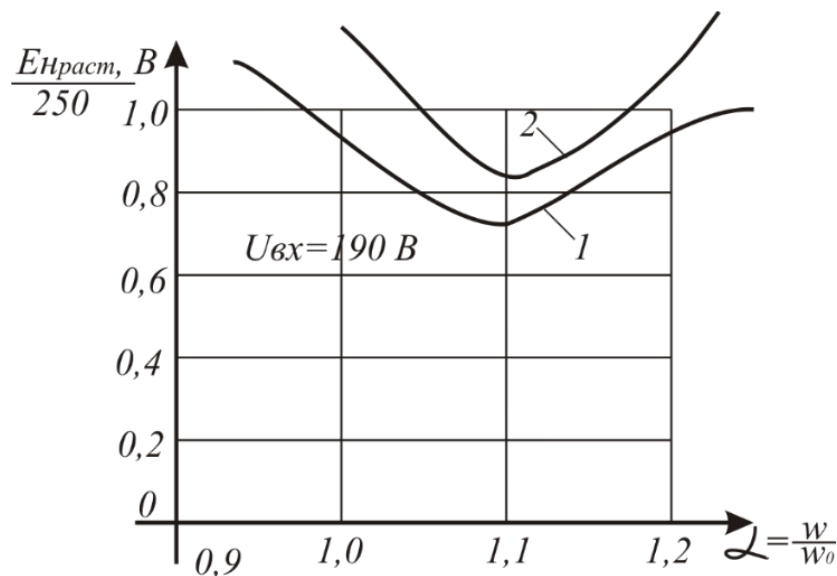


Рисунок 3.9 - Залежності амплітуди напруги накачки $E_{Hрозр}$ від розладу α : 1 - розрахунки за рівнянням (3.6), 2 - розрахунки за рівнянням (3.8)

Аналіз розрахунків залежності $U_H(\alpha)$ по рівнянням (3.6) и (3.8) показує, що при розладі, близькому до значенням $\alpha \approx 1,1$ існує мінімум амплітуди напруги накачки.

Зі збільшенням розладу більше 1,2...1,3 спостерігається зростання напруги на виході вхідної схеми кола живлення генератора, при розладах $\alpha \leq 0,9$ також спостерігається зростання напруги. З експлуатаційних міркувань доцільніше працювати при розладах частоти контурів вхідного кола в межах 1,05...1,15. У цьому випадку умови для генерації і підтримки коливань в контурі будуть більш сприятливими.

Зауважимо, що форма параболи і її мінімум залежать від величини коефіцієнта K , який суттєво впливає на резонансні властивості вхідного кола.

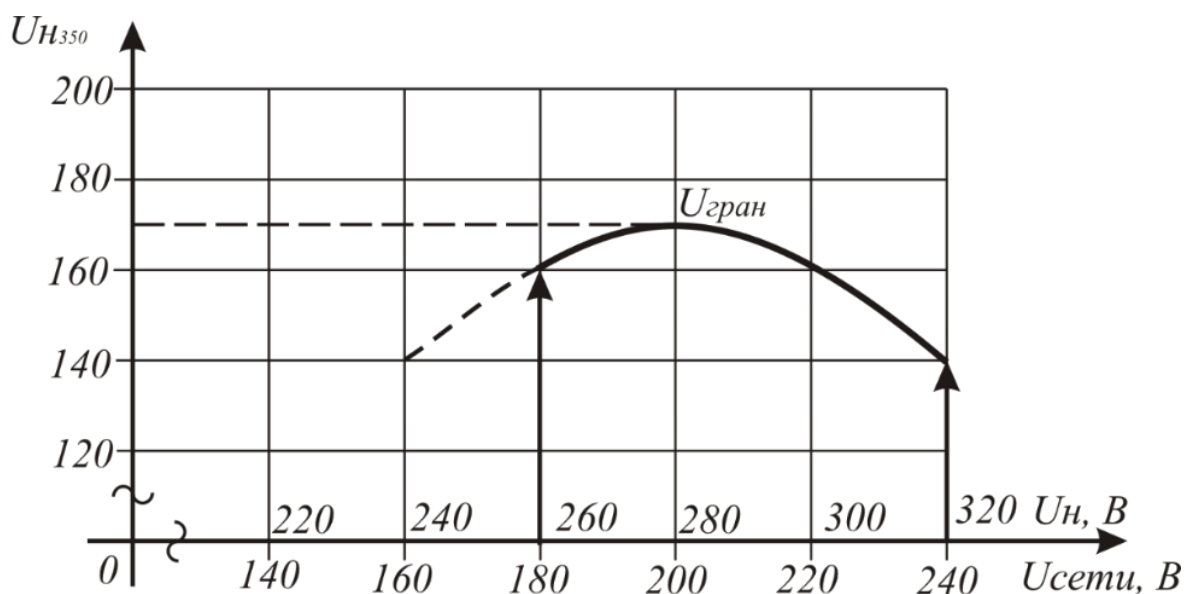


Рисунок 3.10 – Залежність напруги на 350 витках обмотки накачки від напруги живлячої мережі

Стабільність параметрів магнітного кола магнітопроводу в робочому режимі істотно змінюється. Дослідження залежності $X_L(U_{n350})$ (рис. 3.10) показало, що в діапазоні напруг від початку генерації до максимального живильної мережі зміна реактивного опору X_L може перевищувати 16 %.

3.3.2 Розробка диференційного рівняння контуру вихідного кола ПГ

Другий етап досліджень полягає у складанні диференційного рівняння вихідного контуру, що описує роботу параметричного генератора. При чому втрати на гістерезис не враховуються [3], а активні опори обмоток накачки та контуру дорівнюють нулю.

Система рівнянь згідно законів Кірхгофа матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} i_2 = i_{C_K} + i_{R_H} \\ U_2 = U_{R_H} = U_{C_K} = \frac{1}{C_K} \int i_{C_K} dt, \\ U_1 = W_1 S \frac{db_1}{dt} \end{cases} \quad (3.9)$$

де i_2 - струм контурної обмотки;

i_{C_K} - струм, що протікає через ємність контурної обмотки $C_K = 40 \text{ мкФ}$;

i_{R_H} - струм, що протікає через опір навантаження $R_H = 512 \text{ Ом}$.

Далі отримано диференційне рівняння параметричного контуру генератора:

$$\frac{d^2 b_2}{dt^2} + \frac{1}{R_H C_K} \frac{db_2}{dt} + \frac{l}{W_K^2 C_K S} h_2 = 0, \quad (3.10)$$

де h_2 - нелінійна функція створених обмотками накачки та контуру магнітних індукцій b_1 та b_2 .

Для переходу (3.10) до безрозмірного вигляду потрібно враховувати апроксимацію кривої намагнічування. Це можна здійснити шляхом застосування кубічного поліному $h_2 = k_1 b_2 + k_3 b_2 b_1^2 + k_3 b_2^2$ [103].

Враховуючи, що за конструкцією зсув фаз між напругою накачки та контуру дорівнює 90° , запишемо $b = b_1^2 + b_2^2$, при чому $b_1 = \frac{U_1}{4.44 \cdot f \cdot W_1 S_1} \cdot \cos \tau$.

Вхідний та вихідний сигнали при нормуванні рівняння матимуть вигляд:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{b_1}{b_0} = -x_{1M} \cos \alpha \tau \\ x_2 = \frac{b_2}{b_0} = x_{2M} \sin \alpha \tau \end{cases},$$

при чому $b_0 = 0,25 Tl$ - базовий параметр;

$$\alpha = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad \omega_0^2 = \frac{l_2 \cdot k_1}{S_2 C W_2^2}.$$

Після введення безрозмірного часу $\tau = \omega t$ рівняння (3.10) набудатиме наступного вигляду:

$$\frac{d^2 x_2}{d\tau^2} + \delta \frac{dx_2}{d\tau} + \zeta y_2 = 0, \quad (3.11)$$

$$\text{де } \delta = \frac{1}{R_H C_K}, \quad \zeta = \frac{l}{W_K^2 C_K S},$$

Оскільки наша система дуже близька до консервативної [3], тобто фактично являє собою гармонічний осцилятор, рівняння якого записується у наступному вигляді:

$$\frac{d^2 x_2}{d\tau^2} + x_2 = f(x_2, \dot{x}_2), \quad (3.12)$$

$$\text{де } f(x_2, \dot{x}_2) = x_2 - \delta \dot{x}_2 - \zeta y_2 \quad (3.11)$$

Для вирішення рівняння 3.11 застосовувався метод амплітуд, що повільно змінюються. За допомогою співвідношень, що приведені у [11] отримуємо скорочені рівняння, що описують роботу параметричного генератору:

$$\begin{cases} \frac{dB_2}{d\tau} = -B_2 \delta + \frac{1}{4} k_3 B_2 \cdot B_1^2 \cdot \sin 2\varphi \\ \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{4(\zeta k_1 + \frac{1}{2} k_3 B_1^2 - 1) + k_3 B_1^2 \cos 2\varphi + 3B_2^2}{8} \end{cases}, \quad (3.13)$$

Для отримання фазової характеристики ПГ вирішимо цю систему рівнянь відносно фази φ :

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\delta}{1 - p - \frac{g}{2} B_1^2 - \frac{3g}{4} B_2^2} \quad (3.14)$$

З фазової характеристики видно, що після досягнення ПГ напруги генерації 180 В зсув фаз між вхідною та вихідною напругами дорівнює 90° , що пояснює фізику роботи ПГ.

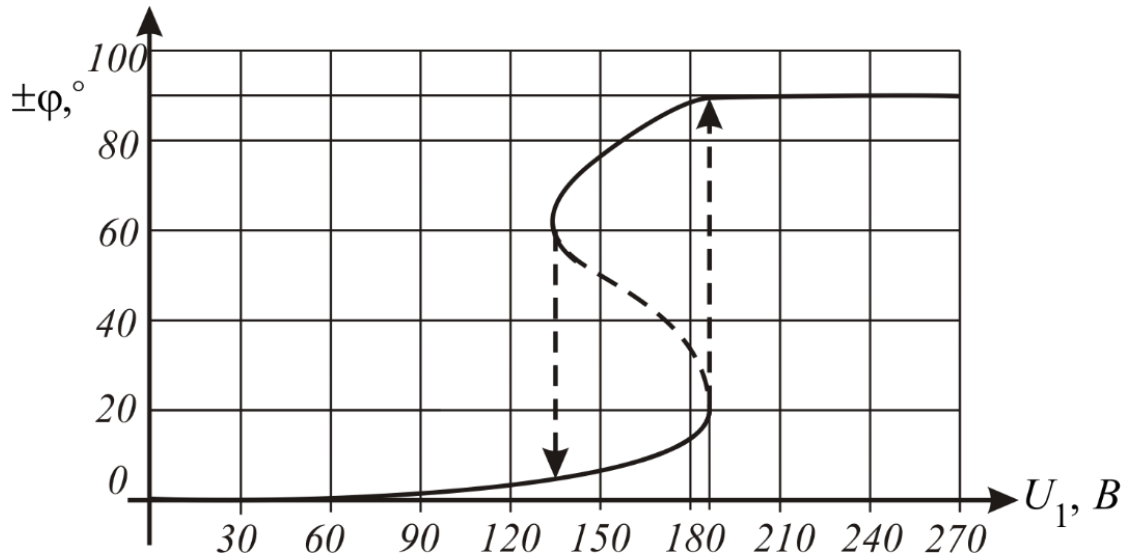


Рисунок 3.9 - Фазова характеристика ПГ

Для розрахунку амплітудно-частотних характеристик з рівняння (3.13) виключимо фазу φ , оскільки для стаціонарного режиму роботи ПГ $\dot{B}_2 = 0$, $\dot{\varphi} = 0$:

$$\frac{1}{3} B_2^2 \left(3 - \frac{4(2-p)}{g} + B_1^6 - \frac{16B_1^2(1-p)}{3g} + \frac{16(\delta^2 g^2 + g^2 - 2p + \zeta^2 \cdot k_1^2 \cdot k_3^2)}{3} \right), \quad (3.15)$$

де $p = \delta k_1$, $g = \delta k_3$.

Після вирішення (3.15) відносно B_2 отримали:

$$B_{2(1,2)}^2 = -\frac{4-2p}{3g} - \frac{2B_1^2}{3} \pm \sqrt{\frac{1}{9} \left(B_1^4 - 16 \frac{\delta^2}{g^2} \right)} \quad (3.16)$$

Використовуючи (3.16) була побудована амплітудна характеристика (АХ) [16, 27]. Перший доданок (3.16) задає криву АХ, другий - гілки АХ. Якщо змінити знак

V_1 на протилежний, то, як видно з рівняння (3.16) АХ зовсім не зміниться внаслідок наявності у вихідної напруги двох стійких станів, що відрізняються один від одного зсувом фаз 180° .

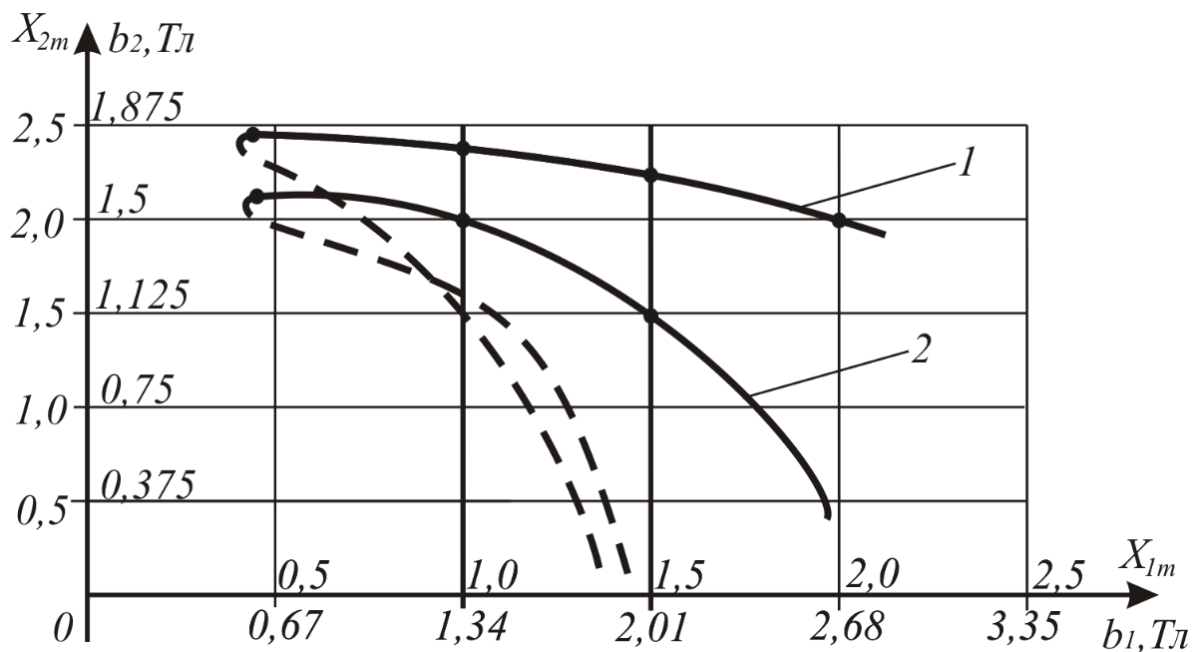


Рисунок 3.10 - Амплітудна характеристика ПГ:

1 – для $\alpha = 2,6, C_k = 30 \text{ мкФ}$, 2 – для $\alpha = 2,16, C_k = 20 \text{ мкФ}$.

Отже, розроблено математичну модель, що включає нелінійні диференційні рівняння двоконтурної схеми параметричного генератора, що працює в режимі повторення частоти. За допомогою запропонованої математичної моделі досліджені статичні характеристики генератора і отримані величини основних параметрів елементів вхідної та вихідної схем генератора, що забезпечують стійку генерацію вихідних коливань і найкращі енергетичні показники (ККД, активні потужності, струми та ін.).

3.4 Дослідження стійкості рішень нелінійного диференційного рівняння

Згідно теорії стійкості [10] наша система, а саме ПГ, працює по принципу нестійкості «у великому». Це означає, що при достатньо великому відхиленні від вихідного стану і припиненні дії збудження система не повертається до вихідного стану, тобто у початковий момент часу при подачі напруги у коло накачки ПГ знаходиться у стані стійкості, з якого він виходитиме при досягненні вхідної напруги величини генерації. Існує досить велика кількість методів дослідження стійкості нелінійних систем, серед яких метод Ляпунова [53], Ван-дер-Поля та Пуанкаре, при чому методи двох останніх учених є основоположними, адже методи Крилова-Боголюбова, Гольдфарба [19], Айзермана є лише їхніми видозміненими формами. При чому методи Ван-дер-Поля та Пуанкаре є досить точними, але дещо громіздкими, тому для дослідження стійкості рішень нелінійного рівняння другого порядку, що описує роботу ПГ, було обрано метод Матьє-Хілла, який описано у [107].

Для дослідження стійкості обираємо рівняння (3.10), яке можна записати у загальному вигляді, як прийнято у теорії коливань [2, 3], наступним чином:

$$\frac{d^2x}{d\tau_2} + f_1(x) \frac{dx}{d\tau} + f_2(x, F(\tau)) = 0 \quad (3.17)$$

де $f_1(x)$, $f_2(x)$ - нелінійні періодичні функції часу x , $F(\tau)$ - змушуюча нелінійна функція x .

У нашому випадку виявилось, що змушуюча функція $F(\tau)$ головним чином залежить від потокозчеплення, що створюється обмоткою накачки, та від кількості гармонік, що враховуються в періодичному рішенні для x . Для дослідження періодичних процесів стійкості рівняння (3.10), (3.17) краще привести до рівняння типу Хілла - Матьє, лінійного диференційного рівняння з коефіцієнтом, що періодично змінюється. Це стало можливим, в одному випадку, внаслідок того, що рішення цих рівнянь у нелінійній електротехніці добре відомі і широко вивчені, з

іншої сторони – тому що функція $f_1(x) = \frac{1}{R_H C_K}$ є постійним числом [2, 3]. В результаті отримано рівняння Матьє:

$$\frac{d^2\eta}{d\tau^2} + (a + qch\beta x)\eta = 0, \quad (3.18)$$

у якому другий доданок – коефіцієнт, що періодично змінюється;

a, q - коефіцієнти, що визначаються параметрами схем, при чому a -

характеризує співвідношення частот коливань в контурі та живлячій мережі $a = \frac{\omega_H^2}{\omega_K^2}$

та затухання контуру δ ,

q - характеризує глибину модуляції параметра m .

З теорії рівняння Хілла – Матьє [104] відомо, що його рішення може бути представленим сумою двох лінійно незалежних рішень

$$\eta = C_1 e^{\mu\tau} \varphi(\tau) + C_2 e^{-\mu\tau} \varphi(\tau), \quad (3.19)$$

де C_1, C_2 - постійні інтегрування, що залежать від початкових умов, $\varphi(\tau), \psi(\tau)$ - періодичні функції τ ,

μ - характеристичний показник, величина якого залежить від числового значення коефіцієнтів ряду a, q [2].

Стійкість рішення (3.19) порушується, якщо показник μ - дійсне додатне число, тобто умову самозбудження генератору можна записати як $\text{Re}\mu \neq 0$, знаходження показника μ здійснюється по відомим коефіцієнтам a, q (3.17), при чому методика рішення цієї задачі є доволі громіздкою [10].

Для спрощення суджень задачі стійкості рішення рівняння Матьє скористаємося рис. 3.4, на якому у площині a, q побудовані області нестійкості, всередині яких (див. пунктирну лінію) коефіцієнт μ має дійсні значення, при чому з віддаленням від границь в глибину області величина $\text{Re}\mu$ зростає [86].

Границям областей відповідає $\mu = 0$ [107]. Області нестійкості стягуються до точок осі абсцис, в яких $a = n^2$, де $n = 1, 2, \dots$ У нашому випадку досліджується ПГ, що

працює у режимі повторення частоти, тому можна вважати, що $n^2 \approx \frac{\omega_H^2}{\omega_K^2} = 1$ [1], значить в 1 області має місце самозбудження коливань у контурі [120, 121, 127].

Проведено розрахунок параметрів a, q , внаслідок якого видно, що рішення потрапляють у першу область нестійкості [85] (пунктирна лінія рис. 3.11).

Отже, розраховано параметри ПГ, досліджено два нелінійних диференціальних рівняння другого порядку, що описують роботу вхідного та вихідного кіл ПГ та враховують наявність усіх додаткових елементів у колі накачки і їх вплив на роботу самого ПГ. Досліджена нестійкість рішень диференціального рівняння.

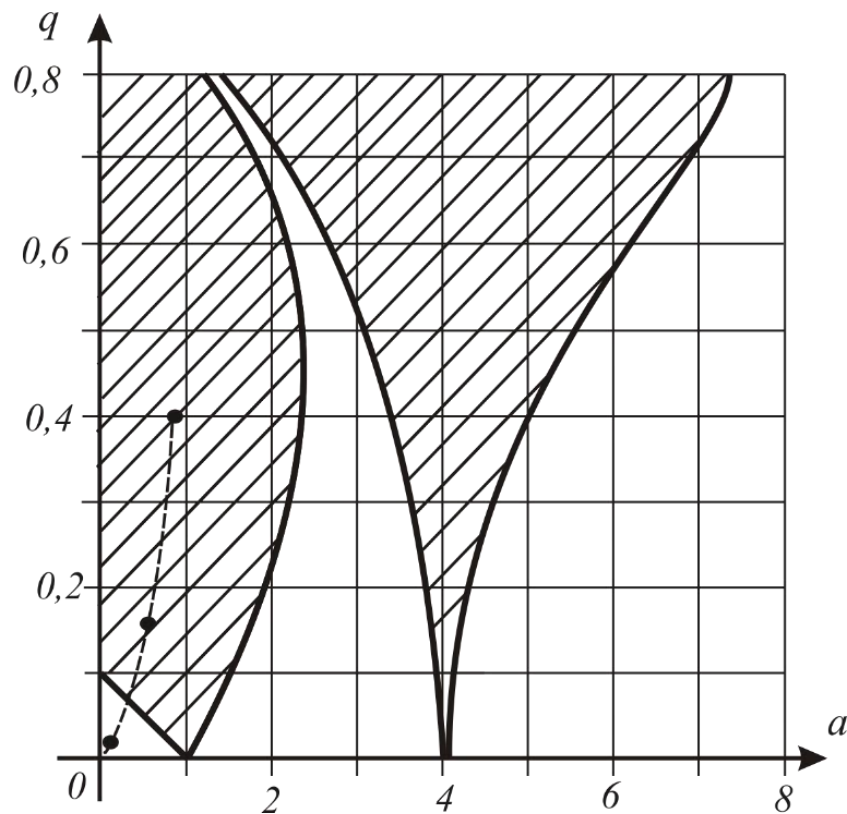


Рисунок 3.11 - Діаграма нестійкості рівняння Матъє

3.5 Висновки за розділом 3

1. Вдосконалено схему вхідного кола шляхом введення конденсатору, ємність якого утворює з індуктивністю обмотки накачки W_H паралельний контур, що викликає ферорезонанс струмів для прискорення процесу генерації та лінійної індуктивності, що з ємністю утворює послідовний контур для забезпечення процесу резонансу напруг.

2. Обмотку накачки розділено на дві зустрічно увімкнені секції з різною кількістю витків для підвищення надійності роботи апаратури РК, покращення енергетичних показників та коефіцієнту стабілізації вихідної напруги ПГ.

3. Розраховано параметри схеми параметричного генератора частоти на неколінеарних магнітних полях, які надалі використовувалися при вирішенні диференціальних рівнянь та потребують подальшого уточнення експериментом.

4. Розроблено математичну модель ПГ, що включає в себе два диференціальні рівняння. Одне з них описує вхідне коло і вирішене методом гармонійного балансу. За допомогою цього рівняння проведено аналіз впливу величин елементів (L_0 , α , C) на рівень напруги накачки перетворювача. Інше диференціальне рівняння описує вихідне коло ПГ і вирішене методом амплітуд, що повільно змінюються. Це рівняння дозволило отримати фазову та амплітудну характеристики ПГ, що працює у режимі повторення частоти.

5. Досліджено нестійкість рішень нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку методом Матьє-Хілла, в результаті чого на першій області нестійкості рішень отримано точки, що відповідають роботі параметричного генератора частоти.

4. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МАКЕТНОГО ЗРАЗКУ ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРУ ЧАСТОТИ

4.1 Виготовлення дослідного зразку та схема для дослідження характеристик параметричного генератора частоти

Для виготовлення макетного зразку були використані ті параметри, що були розраховані у розділі 3. Ці параметри потребуватимуть подальшого уточнення експериментом. Для виконання досліджень було виготовлено макетний зразок ПГ зі сталі Ново-Ліпецького металургійного комбінату (рис. 4.1). Електротехнічна сталь 2412, з якої виготовлено осердя ПГ, є холоднокатаною тонколистною ізотропною і володіє хорошими магнітними властивостями [83, 84, 87].

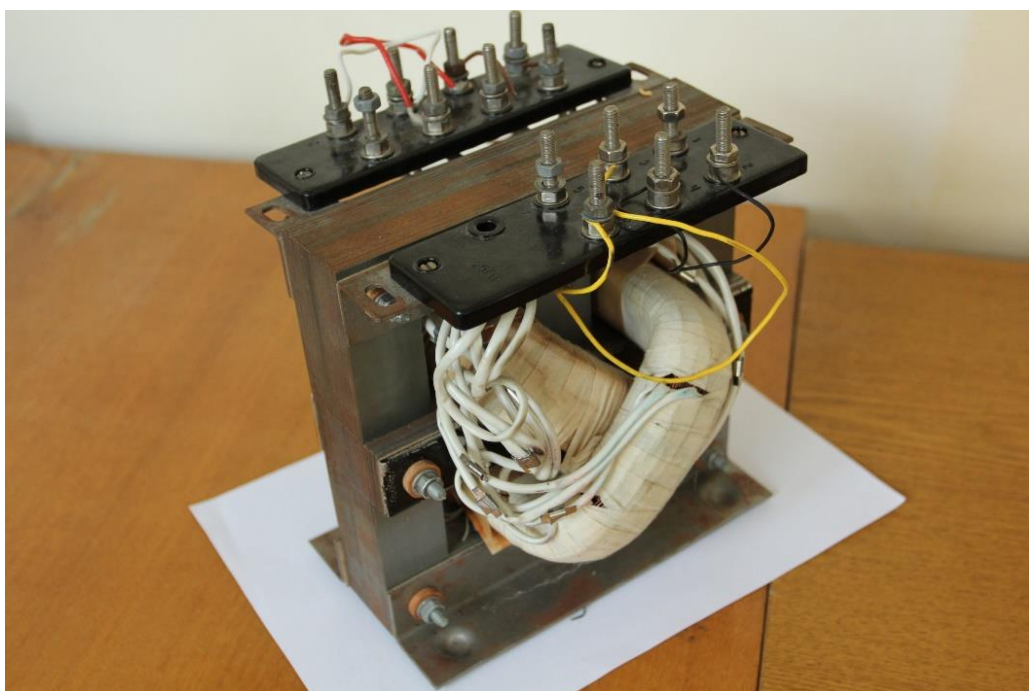


Рисунок 4.1 - Макетний зразок ПГ 50:50

Як видно з рис. 4.1 обмотки ПГ розміщені ортогонально, чим забезпечується зсув фаз 90° між вхідною та вихідною напругами.

Дослідний зразок генератора, зібраний на неколінеарних магнітних полях, потужністю 150 Вт, має такі параметри: об'єм сталі магнітопроводу $V = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$;

середня лінія $l_{cp} = 0,34 \text{ м}$; штамп сталі Ш-33-50-198, ємність кола накачки $C_H = 40 \text{ мкФ}$, ємність контуру $C_K = 40 \text{ мкФ}$. має наступні параметри:, витки обмотки накачки $W_{H_1} = 300$, $W_{H_2} = 50$, витки контурної обмотки $W_K = 300$ [64].

Було зібрано схему [80, 89, 90], що приведена на рис. 4.2

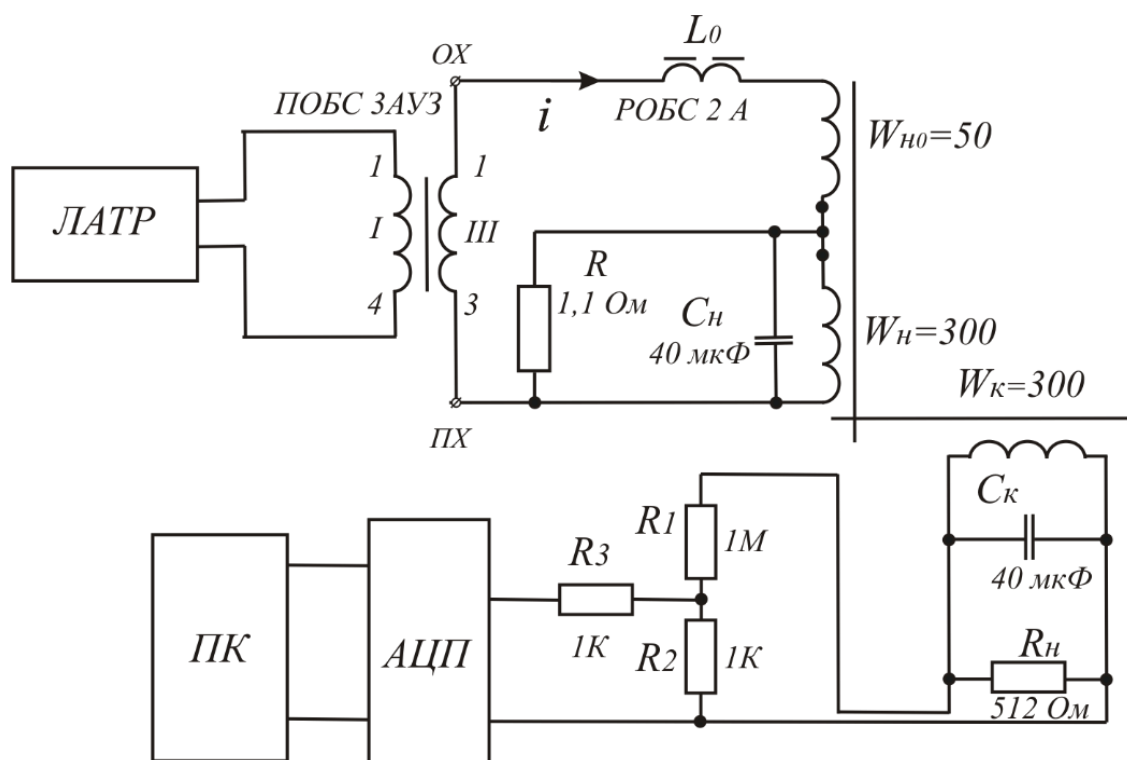


Рисунок 4.2 - Схема для дослідження характеристик параметричного генератору частоти

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що поліпшення енергетичних показників генератора (ККД η та вихідна потужність $P_{вих}$) може бути досягнуто введенням у вхідні схему енергоємних елементів, що створюють резонанси [8, 9, 65].

Так елементи кола $L_0 - C_H$, включені послідовно, можуть привести до лінійного резонансу напруг; в паралельному колі $L_H - C_H$ з нелінійною індуктивністю обмотки накачки можливий ферорезонанс струмів [9, 69]. Вхідне

коло генератора, таким чином, містить два резонансних контури, в яких можливі лінійний резонанс напруг і ферорезонанс струмів.

У розділі 3 здійснено розрахунок характеристик елементів вхідного кола, що забезпечують в обмотці накачки індукцію, яка створює режим коливань у вихідному параметричному контурі без перенасичення сталі осердя генератора.

Виявилося, що шукана ємність при заданих параметрах генератора становить 30..40 мкФ, такій ємності відповідає струм у колі $L_0 - C_H$ не більше 2,5 А. Зауважимо, що ця ємність максимальна, при якій проявляється ферорезонанс струму, який супроводжується стрибком струму [67]. Насправді величина ємності обрана менше, оскільки режим повного резонансу струму при роботі генератора небажаний з точки зору обмеження струму намагнічування обмотки накачки.

У схемі рис. 4.2 послідовно включені елементи $(L_0 + L_{H0}) - C_H$ створюють передумову для виникнення лінійного резонансу напруг (індуктивність L_{H0} менша L_0). При резонансі напруг, як відомо, струм у колі збігається за фазою з ЕРС. У цьому випадку вхідний опір схеми чисто активний, а струм на вході - максимальний. Напруга на індуктивності обмотки накачки W_H досягне величини $U_L = QU_I$, де відношення $Q = \frac{\omega_0 \cdot (L_0 + L_{H0})}{R}$ - добротність резонансного контуру; U_{BX} - напруга джерела живлення; ω_0 - власна частота контуру, може відрізнятись від частоти живлячої мережі до 40% [88].

Тому при обраних параметрах елементів вхідної схеми дослідного зразка, резонанс напруг може розвиватися лише на 20...30% від максимальної добротності контуру.

4.2 Дослідження параметрів елементів схеми захисту вхідного кола генератору

Було проведено розрахунок оптимальних параметрів кола накачки та контуру ПГ, при яких забезпечувалась би потрібна потужність та найбільш доцільні енергетичні показники [36, 66, 68]. Як зазначалося раніше, витки обмотки накачки

ввімкнені зустрічно. Потрібно здійснити уточнення кількості зустрічно ввімкнених витків з величиною ємності накачки.

Спочатку експериментально перевіримо доцільність застосування L_0 . Була підключена схема, що приведена на рис. 4.2. При повному виключенні L_0 зі схеми накачки генерація не настає навіть при входній напрузі 220 В. Тобто наявність у схемі додаткової лінійної індуктивності L_0 позитивно впливатиме на добротність вхідної схеми.

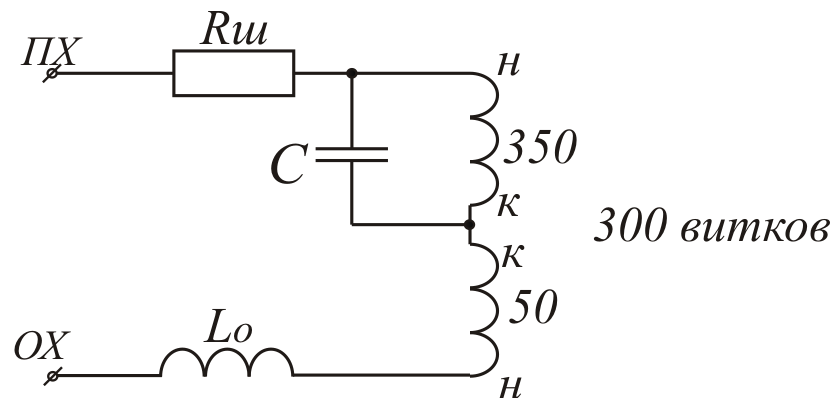


Рисунок 4.3 - Схема вхідного кола ПГ з зустрічним включенням витків обмотки накачки 350 та 50

Результати вимірювань зведені у таблицю 4.5.

Таблиця 4.1 – Результати експериментальних досліджень

$U_{\text{мережі}},$ В	$U_{\text{н}},$ В	$U_{\text{к}},$ В	$i_{R_{\text{ш}}},$ А	$C_{\text{нак}},$ мкФ	$C_{\text{к}},$ мкФ	$R_{\text{навант}},$ Ом	$P,$ Вт
180	242	262	1,5	40	40	460	150
210	256	260	1,5	40	40	460	150
220	267	257	1,5	40	40	460	145
230	279	252	1,6	40	40	460	138
255	295	240	1,4	40	40	460	125

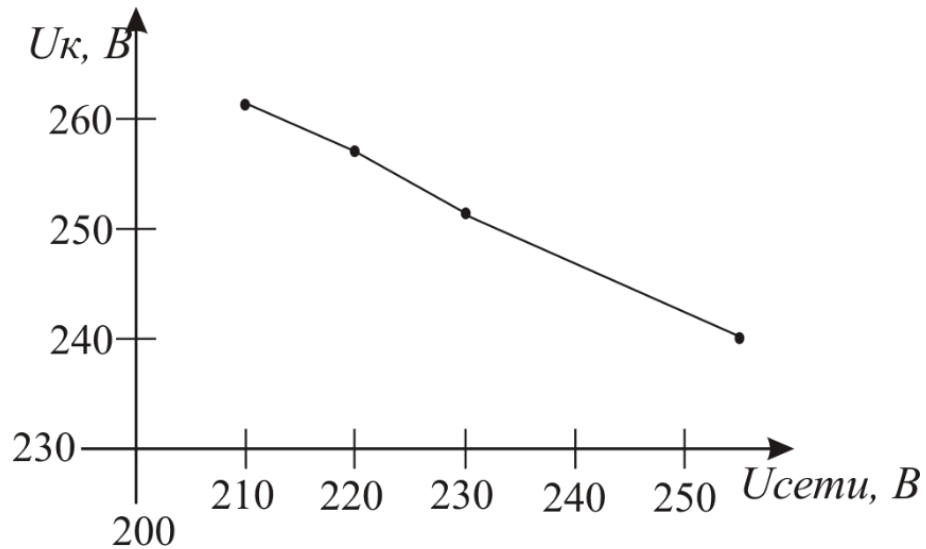


Рисунок 4.4 - Залежність величини вихідної напруги контуру від напруги живлячої мережі при $C_{нак} = 40 \text{ мкФ}$ та відніманні витків обмотки накачки 350 та 75

Під час проведення експериментальних досліджень було обрано дуже велику кількість різних варіантів підключення витків обмоток накачки (зустрічне, узгоджене), різних номіналів ємностей. Виходячи з отриманих даних, здійснено розрахунки вихідної потужності, ККД. Як показали дослідження, найбільш вдалою є схема з зустрічно увімкненими витками, із наступною кількістю витків: $W_{H0} = 50$ та $W_H = 350$ та ємністю у колі накачки 40 мкФ (рис. 4.3).

Як видно з рис. 4.4 вихідна напруга є стабільною, адже її зниження не перевищує 8 %, що згідно ТУ є допустимим. Для даного схемного рішення ККД $\eta = 0,7$.

4.3 Дослідження вхідних та вихідних характеристик параметричного генератору частоти

По приведеній схемі було досліджено залежність вхідного струму від вхідної напруги при $L_0 = 0.26 \text{ Гн}$.

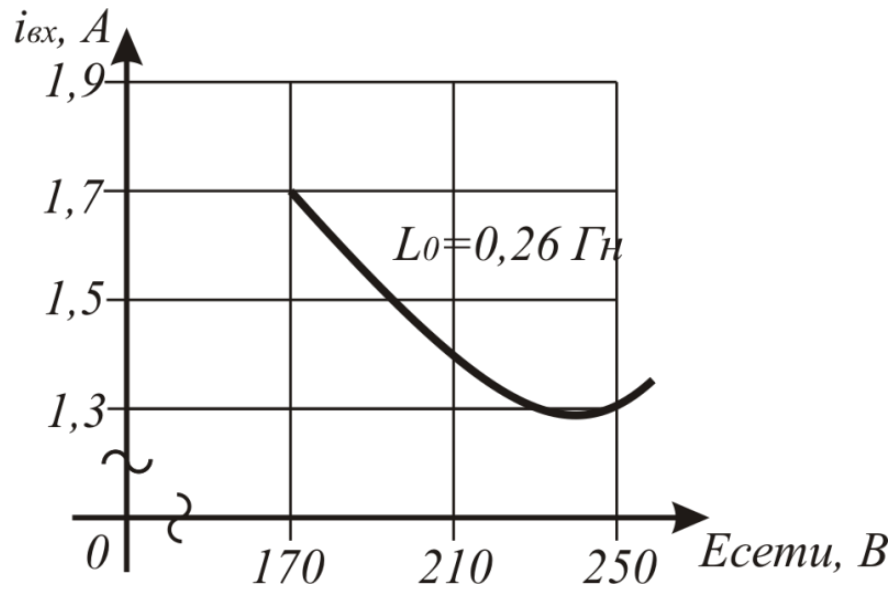


Рисунок 4.5 - Залежність вхідного струму від вхідної напруги

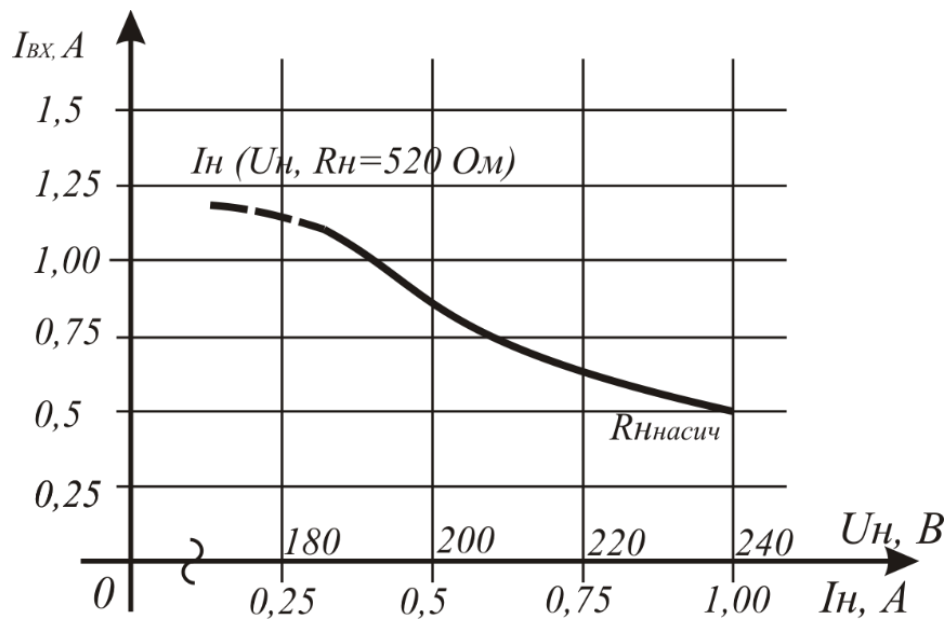


Рисунок 4.6 - Навантажувальна характеристика генератору ПГ 50:50-150 у режимі навантаження

З отриманої залежності видно, що зменшення вхідного струму припадатиме на напругу мережі (220-245 В). Із зростанням вхідної напруги струм мережі падає, що пояснюється впливом ФРС паралельного контуру. При цьому ККД може досягати 0,75. Разом з тим, індуктивність сприяє стабілізації індукції в осері з ростом напруги

та струму на навантаженні вхідний струм зменшуватиметься, що значно покращує $\eta \geq 0,7$ (рис. 4.12).

Приведемо зовнішню характеристику ПГ.ді магнітопроводу, покращуючи форму вихідної напруги.

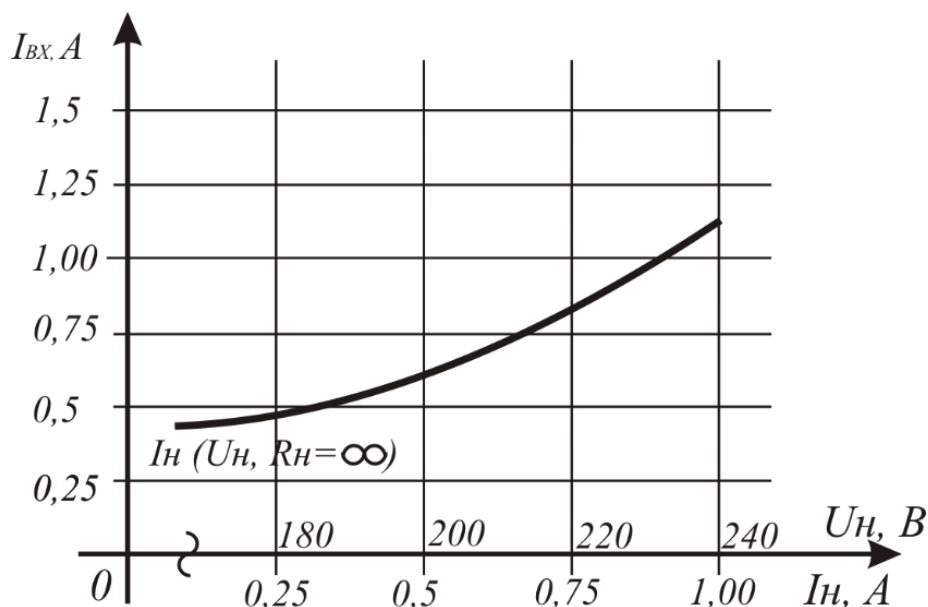


Рисунок 4.7 - Характеристика генератора ПГ 50:50-150 в режимі холостого ходу

До контурної обмотки паралельно ємності підключаємо навантаження, $U_{ген} = 180 \text{ В}$, досліджуємо вхідний струм в обмотці накачки при різних значеннях напруги та струму навантаження [86].

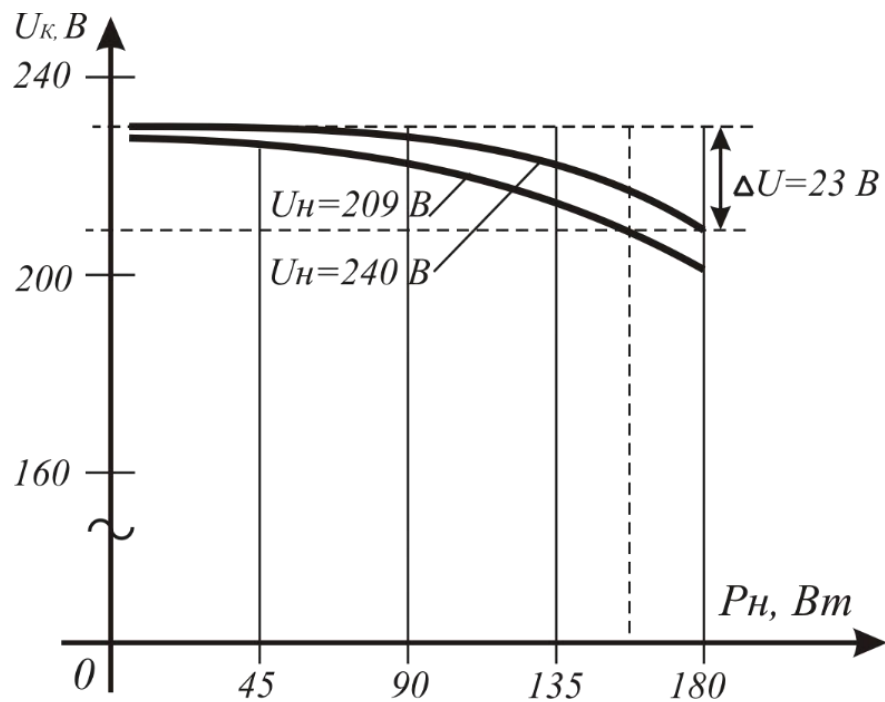


Рисунок 4.8 - Зовнішні характеристики генератора ПГ 50:50-150

Як бачимо, коефіцієнт зниження напруги в колі накачки U_n не перевищує 10% (рис. 4.8).

З отриманих результатів вимірювань можна зробити висновок щодо доцільного застосування ПГ як вторинного джерела живлення апаратури систем автоматики, телемеханіки та зв'язку.

4.4 Дослідження впливу ПЗ на роботу параметричного генератора частоти

Оскільки призначенням параметричного генератора частоти є не тільки стабілізація напруги, тобто використання його як вторинного джерела живлення, а й, у першу чергу, знищення потужної імпульсної завади, потрібно зробити дослідження щодо цієї функції пристрою.

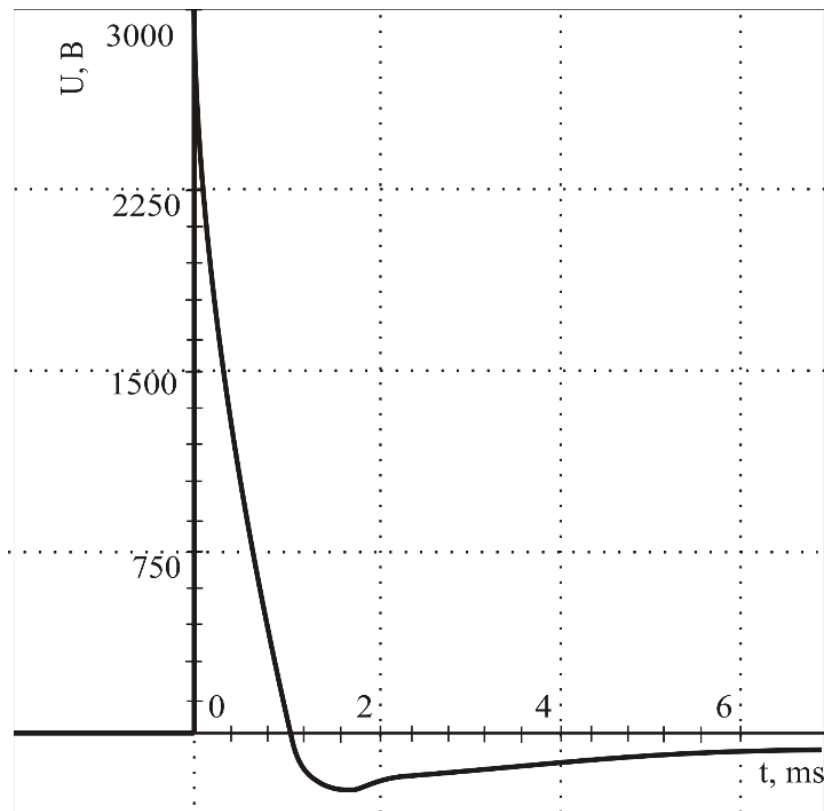


Рисунок 4.9 - Осцилограма ПІЗ на вході ПЧ 50:50

Дослідження показують, що при ударах блискавки амплітуда струму і напруги перешкод в кабелях до релейної шафи і щитовим установкам систем СЦБ може досягати 8 кА, 4.5 кВ з фронтом імпульсу 2 мкс і тривалістю 210 мкс [15, 37]. При цьому енергія потужної імпульсної перешкоди ($\int i^2 t$ Джоулів інтеграл) перевищує 30 кДж (розрядник РВНШ-250 має інтеграл $\int i^2 t$ 2.5 кДж) [45, 46].

Лабораторією випробувань технічних засобів залізничної автоматики і телемеханіки на електромагнітну сумісність Московського інституту залізничного транспорту (МІПТу) на наше прохання були проведені випробування статичного перетворювача ПЧ 50:50.

При випробуваннях на перетворювач за схемою «провід-провід» подавався вплив імпульсу напруги амплітудою до 4 кВ тривалістю до 100 мкс [75, 76, 77]. Виявилось, що при 3,5 кВ на вході ПГ на його виході вимірювалася перешкода амплітудою 5-7 В. Таким чином, перетворювач частоти знижує амплітуду випробувального впливу потужної імпульсної перешкоди в 500 разів [79].

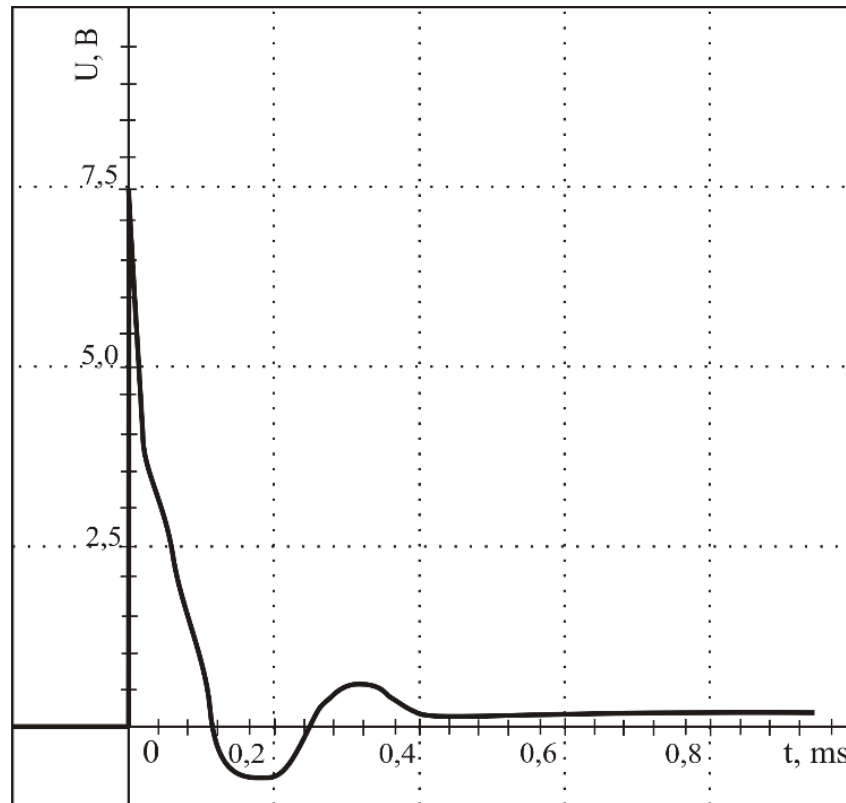


Рисунок 4.10 - Осцилограма ПІЗ на виході ПЧ 50:50

Отже, розроблено діючий зразок конструкції генератора, що дозволяє вирішити найважливішу практичну задачу - ефективний захист електронної апаратури систем залізничної автоматики від дії потужних імпульсних перешкод, створених грозовими розрядами [110], розрядами блискавки і комутаційними перенапруженнями тягової мережі доріг.

4.5 Дослідження характеру вихідного струму, вхідної, вихідної напруг з отриманих осцилограм

Вимірювання струму $i_{вх}$ та вихідної напруги ($C_k = 40 \text{ мкФ}$, $R_H = 460 \text{ Ом}$) (рис. 4.17).

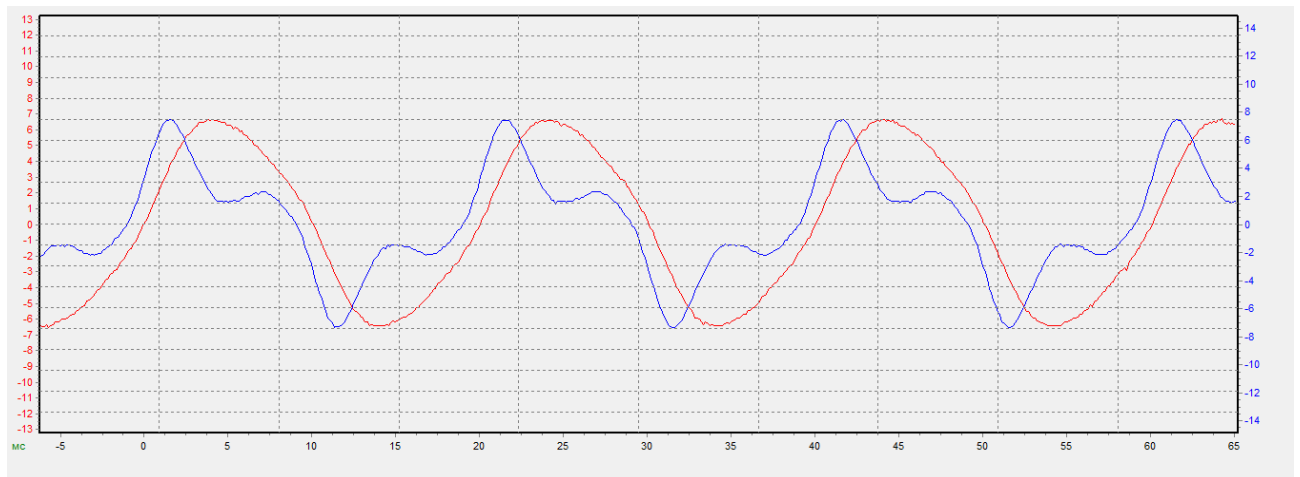


Рисунок 4.11 - Осцилограма вхідного струму та вихідної напруги:
синім кольором – вхідний струм, червоним – вихідна напруга

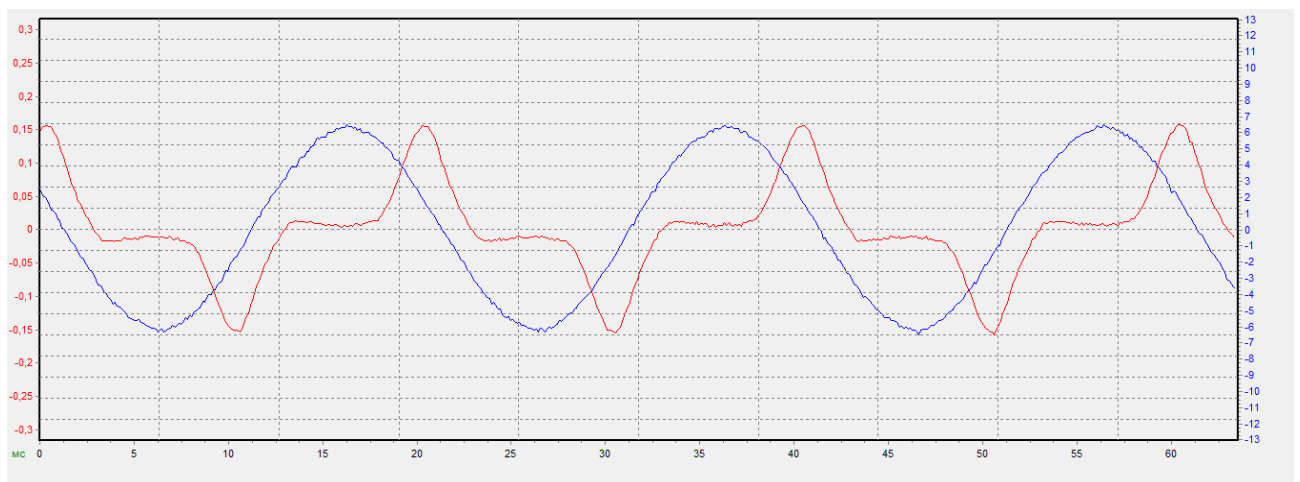


Рисунок 4. 12 - Осцилограма вхідної напруги та вихідного струму
синім кольором – вхідна напруга, червоним – вихідний струм

Як бачимо з рис. 4.17 синьою кривою позначена крива струму обмотки накачки, він не має характеру явно вираженої синусоїди, адже на нього здійснює вплив нелінійність контуру, а саме третя гармоніка, яка при розкладанні у ряд Фур'є має амплітуду близьку до першої гармоніки [93, 94]. Саме для подавлення третьої гармоніки було введено лінійну індуктивність, про яку говорилося раніше.

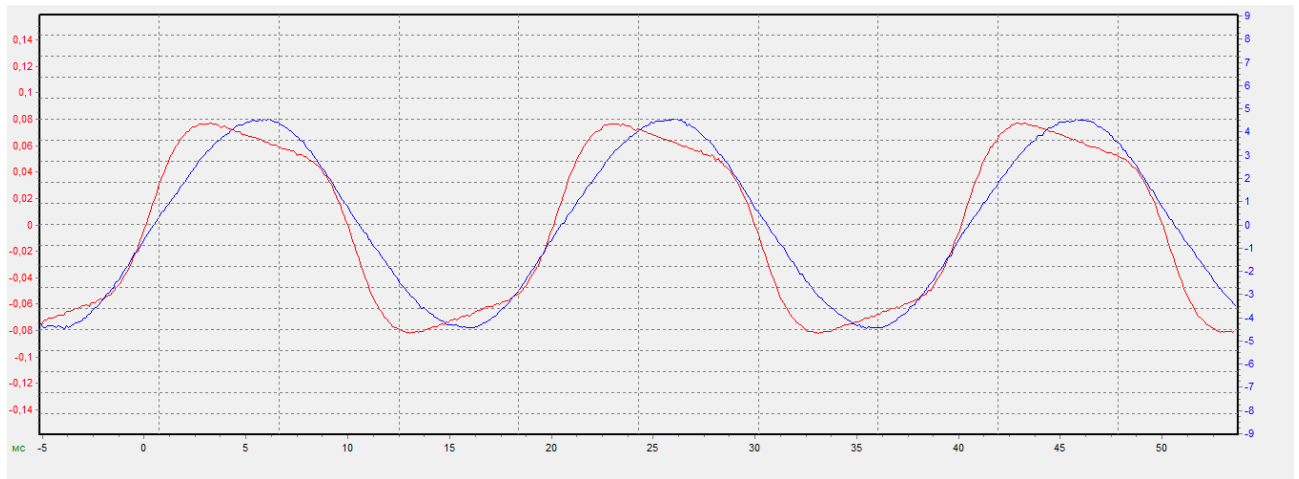


Рисунок 4.13 - Осцилограма вхідної напруги (синім) та вихідної напруги завади (червоним)

При збільшенні напруги і досягненні значення 185-190 В (напруги генерації) зсув фаз між напругою вхідного та вихідного контурів дорівнює 90° , що відображено на рис. 4.14.

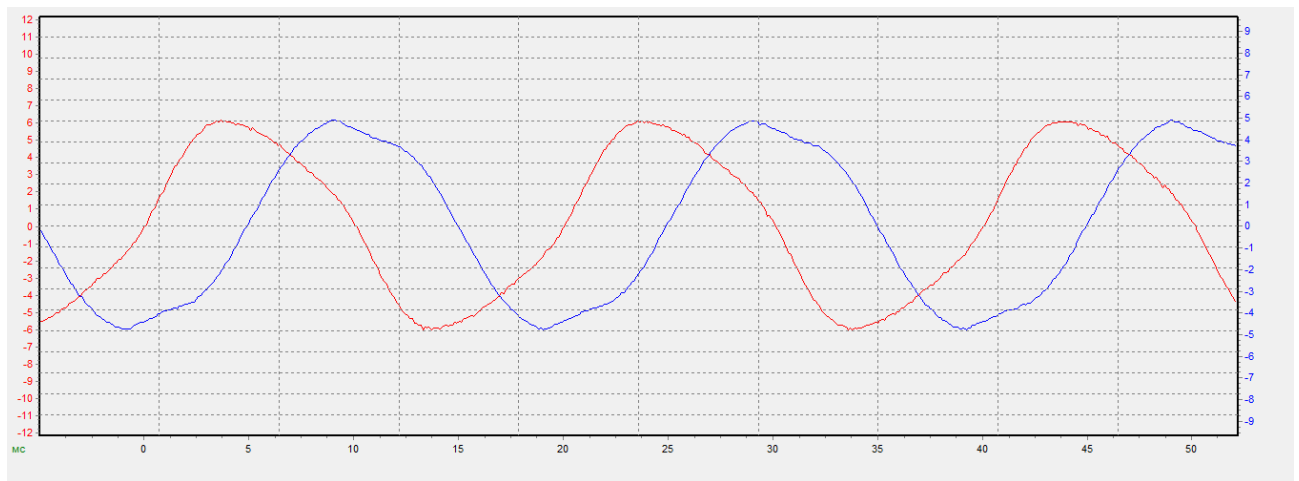


Рисунок 4.14 - Осцилограма вхідної та вихідної напруг в режимі генерації

Як видно з осцилограми проявляється параметричний ефект (фаза зсувається). Напруга в контурній обмотці ПГ U_k (червона лінія) випереджує напругу в обмотці накачки U_H (синя лінія).

Отже отримані осцилограми дуже яскраво відображають сутність процесів, що протікають в колах ПГ, а також пояснюють застосування додаткових елементів у вхідному колі накачки.

4.6 Дослідження теплового режиму роботи параметричного генератору частоти

При довготривалій роботі пристрою на навантаження потрібно перевірити його тепловий режим роботи, адже протікання струмів завжди супроводжується виділенням тепла [51]. Тому до ПГ було підключено мультиметри з термодатчиками. Протягом години проводилася фіксація температури (рис. 4.15).

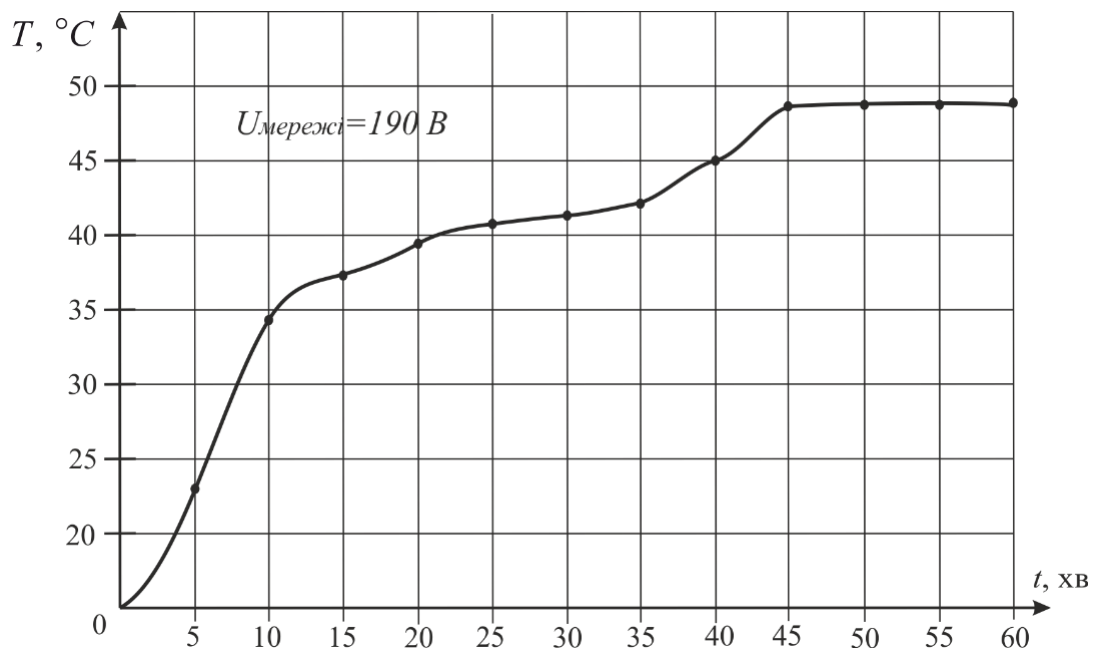


Рисунок 4.15 - Температурний режим роботи параметричного генератору

Як бачимо з отриманого графіку, робота пристрою повністю нас задовольняє по існуючим вимогам.

Отже, ПГ на неколінеарних магнітних полях, як бачимо, згідно проведених експериментальних досліджень є не тільки стабілізованим ВДЖ, а й прекрасним захисним пристроєм від впливу ПЗ і характеризується не тільки високим ККД і стабільністю вихідних характеристик [96], а й повним знищенням ПЗ грозового імпульсу. Тому можна зробити висновки щодо його застосування на залізницях України.

Як бачимо з отриманого графіку, робота пристрою повністю нас задовольняє по існуючим вимогам.

Отже, ПГ на неколінеарних магнітних полях, як бачимо, згідно проведених експериментальних досліджень є не тільки стабілізованим ВДЖ, а й прекрасним захисним пристроєм від впливу ПЗ і характеризується не тільки високим ККД і стабільністю вихідних характеристик, а й повним знищенням ПЗ грозового імпульсу. Тому можна зробити висновки щодо його застосування на залізницях України.

4.7 Висновки за розділом 4

1. Проведено експериментальне дослідження макетного зразку ПГ, що підтвердило коректність застосування зустрічного увімкнення обмоток накачки і дозволило уточнити параметри елементів вдосконаленої схеми. Отримано залежності величини вхідного струму від напруги мережі, отримані характеристики ПГ у режимі холостого ходу та навантаження, а також зовнішні характеристики, що дозволило зробити висновки щодо доцільного застосування ПГ як вторинного стабілізованого джерела живлення апаратури систем ЗАТ.

2. Проведене дослідження захисних властивостей ПГ за схемою «провід-провід», за якого при напрузі амплітудою до 3,5 кВ тривалістю до 100 мкс на вході ПГ з виходу знімалася напруга амплітудою не більше 5-7 В, свідчить про зниження амплітуди випробувального впливу завади у 500 разів, що вказує на наявність прекрасних захисних властивостей ПГ.

3. Здійснено дослідження адекватності математичної моделі ПГ отриманим експериментальним даним підтверджена за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності.

5 ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ ВНАСЛІДОК ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ ПРИ ДІЇ АТМОСФЕРНИХ ТА КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

5.1 Розрахунок надійності роботи системи автоблокування

Оцінка економічних втрат від затримок поїздів при відмовах систем АБ необхідна для більш повної характеристики надійності та вирішення технічних заходів щодо її підвищення. Потрібно зауважити, що при відмовах перегінних пристроїв АБ, коли на прохідному світлофорі горить червоний вогонь, рух поїздів не припиняється і здійснюється згідно діючих інструкцій. При цьому наслідком відмов є збільшення міжпоїздних інтервалів і, як правило, затримки поїздів ($\frac{n}{200}$) за час T_B від моменту появи відмови до її усунення.

Розглянемо залежність втрат пропускної здатності двониткової ділянки при групових відмовах пристроїв, уражених розрядами блискавки. Відомо, що пропускна здатність таких ліній визначається окремо для кожного напрямку:

$$N = \frac{(1440 - t_{TEX})}{I_p}, \text{ } n/\text{добу},$$

I_p - розрахунковий інтервал між поїздами при триблоковому інтервалі їх розмежування [41] при середній швидкості руху поїзду по трьом блок-ділянкам (з зеленого вогню на зелений);

$\alpha = 0,95$ - коефіцієнт надійності системи.

На вантажонапружених ділянках двоколієних ліній, де $N > 70$, зупинка поїзда перед червоним вогнем супроводжується так званими вторинними затримками [35]. Загальні затримки вантажних поїздів у такому випадку дорівнюватимуть:

$$T_0 = T_{01} + T_{02} + T_{03},$$

де T_{01}, T_{02}, T_{03} - втрати (поїзд/год) за час T_B , що є часом відновлення ритму графіку після усунення відмови і через додаткові обгони вантажних поїздів пасажирськими.

Скористаємося методикою розрахунку втрат поїздо-хвилин [61] при відмовах

АБ, доповнюючи його для випадків групових відмов пристроїв сигнальної установки АБ при ураженні розрядами грози та блискавки.

Розрахунки втрат поїздо-хвилин проведемо за формулами наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} T_{01} = 0,5 \cdot [2 \cdot t_{кр} + (\frac{T_{кр}}{I_{кр}} - 1)(I_{кр} - I_{сп})] \cdot \frac{T_{кр}}{I_{сп}} \cdot N; \\ T_{02} = 0,5 \cdot [\frac{t_{он}^Г}{I_{сп} - I'_п} - t_{он}] \cdot N; \\ T_{03} = T_{он} \cdot (t_{он}^Г - t_{он}^н) \cdot N_n \cdot \frac{t_{об}}{1440 \cdot I_{сп}}. \end{cases}$$

де $t_{кр}$ - різниця у часі ходу n по блок-ділянці під «З» та «Ч», хв.;

$T_{кр}$ - тривалість горіння червоного вогню на прохідному світлофорі, хв.;

$I_{кр}$ - хвилинний інтервал між поїздами після прослідування блок-ділянки, що загороджує світлофор з червоним вогнем, хв.;

$I_{сп}$ - середній інтервал між поїздами, хв.;

$t_{он}$ - час запізнення поїзду, який останнім прослідує заборонний сигнал, і визначається наступним чином:

$$t_{он} = t_{кр} + (\frac{T_{кр}}{I_{кр}} - 1)(I_{кр} - I_{сп}),$$

$I'_п$ - хвилинний інтервал при двоблоковому розмежуванні [41]

$$I'_п = \frac{0,06 \cdot (2 \cdot l_{бл} + l_n)}{V} + t_B,$$

t_B - час на сприйняття машиністом сигналу;

$T_{он}$ - період, у період якого вантажні поїзди будуть запізнюватися за рахунок обгону пасажирськими;

$$T_{он} = T_{кр} + \frac{[t_{кр} \cdot I_{кр} + (T_{кр} - I_{кр})(I_{кр} - I_{сп})] \cdot I'_п}{(I_{сп} - I'_п) \cdot I_{кр}}, \text{ хв.}$$

Середній час запізнення вантажних поїздів ($z_{он}^{зп}$) за час $T_{кр}$ і період

відновлення ритму графіку визначається за формулою:

$$z_{on}^{zp} = \frac{(T_{01} + T_{03})(I_{cp} - I'_p) + I_{кр} + n_{zp}}{T_{кр} \cdot (I_{cp} - I'_p) + t_{on} \cdot I_{кр}}, \text{ хв.},$$

t_{on}^{nc} - середній час запізнення пасажирського поїзда, $t_{on}^{nc} = t_{кр}$.

n_{nc} - добовий розмір пасажирського руху на даній ділянці;

$t_{об}$ - середня тривалість стоянки вантажного поїзду під обгін по графіку, $t_{об}$ для ділянки з АБ дорівнює 15-16 хв.

На кожен поїздо-годину затримки поїздів приходяться додаткові затрати на освоєння перевезень

$$M_n = (Y_{T_0}^{np} + Y_p) \cdot T_0,$$

На двоколіїних лініях за вище приведеними формулами можна визначити додаткові затрати на перевезення, що викликані відмовами пристроїв СЦБ. Розрахунок було здійснено для двоколіїних ділянок з наступними характерними даними:

- пропускна здатність при паралельному графіку $N = 180$ поїздів/добу;

- інтенсивність руху: вантажні – 60..100 поїздів/добу, пасажирські - 20 поїздів/добу у

кожному напрямку;

- $T_{кр} = 240$ хв;

- $I_{кр} = 16$ хв;

- $I'_p = 8$ хв;

- $t_{кр} = 8$ хв хв.;

- кількість сигнальних установок на ділянці – 59 шт.;

- ділянка має довжину 100 км.

При впровадженні параметричного генератора частоти інтенсивність відмов апаратури релейних шаф значно скоротиться за рахунок відсутності відмов пристроїв автоблокування. Кількість виробів N , що розміщені у релейній шафі,

складає 360 шт. Середня інтенсивність відмов пристроїв и дорівнює $4,1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$.

Тоді: $4,1 \cdot 10^{-6} \cdot 59 = 2,3 \cdot 10^{-4}$, інтенсивність відмов пристроїв у 59 релейних шафах.

Кількість виробів у 59 релейних шафах складає: $360 \cdot 59 = 21240$ шт.

Кількість відмов при впровадженні параметричного генератору частоти становить: $2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 21240 = 4,8852$.

Кількість грозових годин з грозовий період складає 2880 год.

Тоді інтенсивність відмов за нормальних умов експлуатації для ділянок доріг, де впроваджено параметричний генератор частоти, становитиме:

$$\lambda_{\text{норм}} = \frac{4,8852}{59 \cdot 2880} = 0,2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{год}}.$$

Статистикою встановлено, що з 95 грозових ударів доля уражень релейних шаф складає $\frac{10}{95} = 0,1$.

В результаті вражаються $n_{\text{РШ}} = 0,1 \cdot 59 \approx 6$ шт.

При цьому в середньому 4 вироби релейних шаф виходять з ладу, тобто $6 \cdot 4 = 24$. Час відновлення виробів сигнальних установок складає 192 год. Тоді інтенсивність відмов апаратури релейних шаф за грозовий період складає:

$$\lambda_{\text{гроз}}(t) = \frac{192}{8 \cdot 59 \cdot 2880} = 1,34 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{год}}.$$

Відношення інтенсивності відмов виробів у грозовий період та за нормальних умов роботи при впровадженні параметричного генератору складає:

$$k = \frac{\lambda_{\text{гроз}}(t)}{\lambda_{\text{норм}}(t)} = \frac{1,34 \cdot 10^{-4}}{0,2 \cdot 10^{-4}} = 6,7 \text{ рази.}$$

Отже, впровадження параметричного генератору з неколінеарними магнітними полями дозволить не тільки стабілізувати живлення пристроїв

автоматики, телемеханіки та зв'язку, а й забезпечити захист апаратури від дії потужних імпульсних завад у вигляді розрядів блискавки та грози, що здійснюють значний негативний вплив на роботу та функціонування в цілому системи автоблокування.

Розрахунки загальних додаткових затримок поїздів згідно показали:
 $T_{01} = 2060 \text{ н/год}$, $T_{02} = 238 \text{ н/год}$, $T_{03} = 10 \text{ н/год}$, $T_0 = 2308 \text{ н/год}$.

Тоді сумарні затрати, що викликані пошкодженням пристроїв СЦБ, визначаються:

$$M = (30,69 + 36,6) \cdot 2308 = 155790 \frac{\text{грн}}{100 \text{ км} \cdot \text{год}}$$

Потрібно зауважити, що на кожну поїздо-годину затримки поїздів приходить один розгін і, відповідно, додаткові затрати на освоєння перевезень.

Отже, сумарні витрати, що викликані пошкодженням пристроїв СЦБ складають $155790 \frac{\text{грн}}{100 \text{ км} \cdot \text{год}}$, що є високим показником. Впровадження низки заходів, що описані у розділах 2, 3 та 4, тобто впровадження ТРК на перегоні для захисту пристроїв системи АБ від впливу високих рівнів тягових струмів та ПЗ у вигляді комутаційних ПН та застосування ПГ на неколінеарних магнітних полях для захисту апаратури РК від грозових розрядів та перенапружень, дозволять значно підвищити надійність роботи системи автоблокування.

5.2 Розрахунок економічного ефекту та строку окупності від впровадження параметричного генератора частоти ПГ 50:50

Впровадження параметричного генератора частоти ПГ 50:50 дозволить знизити кількість відмов рейкових кіл по причині дії потужних імпульсних завад від грозових розрядів та з боку тягової мережі, що в кінцевому результаті дозволить підвищити безпеку руху.

Дослідження статистики відмов рейкових кіл по Укрзалізниці показали, що в середньому за рік спостерігається 65 відмов апаратури рейкових кіл по причині

грозових та комутаційних перенапруг.

Відмови пристроїв сигналізації, централізації та зв'язку (СЦБ) бувають небезпечні та захищені. Виникнення перших є неприпустимим внаслідок зниження загальної безпеки. Дія грозових розрядів відноситься саме до небезпечних відмов, внаслідок яких фактично паралізується рух залізничного транспорту на досить тривалий час. Відмови рейкових кіл супроводжуються зупинкою потягів та простоем рухомих складів, що призводить до економічних втрат залізниці по причині несправності пристроїв СЦБ. Додаткові втрати пов'язані з витратами часу та матеріальних ресурсів на ліквідацію відмов експлуатуючим персоналом. Впровадження параметричного генератора ПГ 50:50 дозволить суттєво знизити кількість відмов, пов'язаних з дією грозових розрядів, імпульсних та комутаційних перенапруг у контактній мережі, і як наслідок отримати економічний ефект від зменшення втрат при простоях рухомого складу та вивільнити час експлуатуючого персоналу.

Впровадження нових пристроїв та технічних рішень 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 [38], який для промислових організації і транспорту визначається як відношення приросту річного прибутку до капітальних затрат, що викликають цей приріст:

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

Значення коефіцієнту економічної ефективності E порівнюється з галузевим нормативом E_n . Якщо виявляється, що $E > E_n$, то розраховані капітальні вкладення визнаються ефективними. Норматив ефективності для господарства автоматики та зв'язку $E_{AZ} = 0,15$ [1]. По отриманому коефіцієнту економічної ефективності може бути визначений термін окупності капітальних вкладень як величина зворотна E :

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

5.2.1 Розрахунок капітальних вкладень в обладнання дільниці з тональними рейковими колами параметричним генератором частоти ПГ 50:50

На обладнання колії тональних рейкових кіл параметричним генератором частоти ПГ 50:50 необхідно додатково врахувати амортизаційні відрахування, що визначаються на основі вартості обладнання і складаються з відновлення, заміну деталей та капітальний ремонт. Щорічні амортизаційні відрахування складають 5% від вартості системи, а витрати на матеріали та запасні частини – 2% (табл. 1).

Таблиця 5.1 - Розрахунок капітальних витрат

№ п/п	Пристрій	Кількість	Вартість, грн
1	Параметричний генератор частоти ПГ 50:50	5	12000
2	Додаткова апаратура та монтажні матеріали	1	50
3	Монтаж	1	4000
4	Амортизаційні відрахування	5%	623
5	Витрати на матеріали та запасні частини	2%	290
6	Разом		16702

Тоді на обладнання дільниці залізниці:

$$K = 10 \cdot 16702 = 167020 \text{ грн}$$

Для визначення економічної ефективності впровадження параметричного генератора частоти ПГ 50:50 розрахуємо витрати залізниці на простій поїздів.

Кількість відмов рейкових кіл за рік та середній час затримки потяга (T_z) та кількість відмов по причині дії потужних імпульсних завад (Not) базуються на статистиці по залізниці [95].

5.2.2 Розрахунок економічної ефективності впровадження параметричного генератора частоти ПГ 50:50

При розрахунку економічної ефективності впровадження параметричного генератора потрібно врахувати наступні параметри:

- дільничну швидкість потягу (V_u), що враховує характерну інтенсивність руху вантажних та пасажирських потягів для ділянки, що проектується;
- коефіцієнт K_t враховує використання додаткових локомотивів для тяги або підштовхування деяких потягів на складних ділянках.
- середня відстань від посту ЕЦ до несправного рейкового кола вибрана виходячи з умови, що максимальна відстань до об'єкта, що обслуговується бригадою ШНС без спеціального автомобіля може складати 13,75 км.

Тарифна ставка, вартості розгону, простою та електроенергії приведені в гривнях станом на 1 вересня 2015 р.

Кожна відмова рейкового кола супроводжується зупинкою потягу, визначимо експлуатаційні витрати, що пов'язані із розгоном і сповільненням поїздів:
 $Z_p = C_p \cdot N_{ot} = 57673,85$.

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

$$NH = N_{ot} \cdot 2 \cdot L_u \cdot \left(\frac{1}{V_x} + \frac{1}{V_u} \right) = 935,025 \text{ поїздо-год}$$

Кількість вагоно-годин простою за рік визначається:

$$nh = NH \cdot m_v = 56101,5 \text{ вагоно-год}$$

Кількість локомотиво-годин простою за рік:

$$Mh = NH \cdot K_t = 1028,5275 \text{ лок-год}$$

T_{pshuk} - Середній час пошуку несправності в РК кодового АБ, 25 хв;

T_{us} - Середній час усунення несправності в РК кодового АБ, 30 хв;

S_1 - Середня відстань від посту ЕЦ до несправного РК 7 км;

V_{per} - Середня швидкість пересування ШН, 5 км/г;

T_p - Час на підготовку ШН до виходу, 15 хв;

C_e - Часова тарифна ставка ШН, 27 грн/год;

N_{ot} - Кількість відмов за рік на Укрзалізниці внаслідок дії потужних імпульсних завад від грозових розрядів та комутаційних перенапруг, 65 шт;

T_z - Середній час затримки одного потягу, 50 хв.;

Pp - Середні витрати енергії при простої потягу, 125 кВт×год;
 Lu - Довжина дільниці, 250 км;
 Vx - Ходова швидкість потягу, 60 км/г;
 Vu - Дільнична швидкість потягу, 32 км/г;
 mv - Середня кількість вагонів у потягу, 60;
 Kt - Коефіцієнт, що враховує додаткові локомотиви, 1,1;
 Sp - Вартість розгону та сповільнення одного потягу, 887,29 грн;
 Sv - Вартість простою одного вагону-часу, 15,0116 грн;
 Cl - Вартість простою одного локомотиво-часу 182,4222 грн;
 Cb - Вартість простою локомотивної бригади-часу, 698,2 грн;
 Skv - Вартість кВт×год, 1,9 грн.

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

N п/п	Одиниці виміру	Формула розрахунку	Значення показника	Витратна ставка, грн	Витрати, грн
1	Вагону-години	m	60,0000	15,0116	900,696
2	Локомотиво- години	1,1000	1,0000	182,4222	200,66442
3	Бригадо-години локомотивних бригад	1,1000	1,0000	698,2	768,02
4	Кіловат-годин електроенергії	1	125	1,23	153,75
5	Разом				1923,86792

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

$$Z_e = NH \cdot E_{NT},$$

де E_{NT} - укрупнена витратна ставка.

Отже: $Z_e = NH \cdot E_{NT} = 3428,428 \cdot 1923,86792 = 1798864,6$ грн.

Розрахуємо експлуатаційні витрати, пов'язані з пошуком та усуненням відмов рейкових кіл. Так як передбачається встановлення пристрою ПГ 50:50 на перегоні,

то рахуємо відмови, що трапляються з перегінними рейковими колами. Час, необхідний електромеханіку, щоб дістатися до місця відмови:

$$T_{per} = \frac{S1}{V_{per}} = 1.4 \text{ год}$$

Загальний робочий час, який витрачає електромеханік на усунення однієї відмови складається з часу на:

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

$$Totk = T_p + T_{per} + T_{poshuk} + T_{us} + T_{per v} = 3,667 \text{ ГОД}$$

Таблиця 5.3 – Апаратура релейних шаф

N п/п	Назва апаратури	Кількість	Вартість
1	Реле (колійне реле, аварійні, трансмітерні та ін.)	40	17000
2	Дешифраторна ячейка ДА	1	4020
4	Монтажна апаратура	-	4000
Загальна сума			25020

Тоді витрати на усунення відмов за рік:

$$Zus = Not \cdot Totk \cdot Ce = 7920,7 \text{ грн.}$$

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). Тоді з додатковими нарахуваннями отримуємо експлуатаційні витрати на усунення відмов [40]:

$$Zv = Zus + Zus \cdot 0,36 = 10772 \text{ грн.}$$

Враховуючи апаратуру релейних шаф (табл. 5.3), яка згорає при надходженні грозового імпульсу, розрахуємо загальні економічні втрати залізниці від простою поїздів по причині відмов рейкових кіл:

$$Z = Z_p + Z_e + Z_v = 35792 \text{ грн}$$

Приймачи, що $P = Z$, коефіцієнт економічної ефективності впровадження параметричного генератору ПГ 50:50 (E) буде дорівнювати:

$$E = \frac{P}{K} = \frac{35792}{167020} = 0,2$$

Розраховані капітальні вкладення визнаються ефективними. Срок окупності впровадження параметричного генератору дорівнює: $T = \frac{1}{E} = \frac{1}{0,2} = 5$ років.

Отже, впровадження параметричного генератору для захисту рейкових кіл від потужних імпульсних завад з боку грозових розрядів та перенапруг з боку живлячої мережі дозволить суттєво знизити кількість відмов, підвищити надійність роботи рейкових кіл, забезпечити високий рівень безпеки руху, отримати економічний ефект від зменшення втрат при простоях рухомого складу та вивільнити час експлуатуючого персоналу.

5.3 Висновки за розділом 5

1. Здійснено оцінку інтенсивності відмов апаратури релейної шафи за грозовий період та за нормальних умов експлуатації. При впровадженні ПГ частоти, інтенсивність відмов апаратури релейної шафи від дії грозових розрядів та ПН зменшується у 6,7 разів.

2. Здійснено розрахунок річного економічного ефекту від впровадження ПГ 50:50, що складає 35792 грн/рік. Отже, розраховані капітальні вкладення є ефективними і параметричний генератор частоти на неколінеарних магнітних полях може успішно застосовуватися в якості вторинного стабілізованого джерела живлення та засобу захисту апаратури рейкових кіл від впливу потужних імпульсних завад. Срок окупності складає 5 років.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладне завдання по підвищенню надійності системи автоблокування в умовах впливу високих рівнів тягових струмів та потужних імпульсних завад.

1. Було досліджено роботу РК в умовах протікання високих рівнів тягових струмів. Проведений аналіз статистики відмов пристроїв СЦБ свідчить про те, що на відмови систем АБ від дії грозових розрядів та комутаційних перенапруг припадає 13,36 %, а на ділянках з крутим гірським профілем цей показник досягає 16 %. Огляд характеристик існуючих ЗЗ апаратури ЗАТ показав, що за термічною стійкістю вони не відповідають вимогам.

2. Проведено дослідження впливу високих рівнів тягових струмів на апаратуру систем АБ. Вдосконалено метод розрахунку розповсюдження потенціалів та струмів у рейковій мережі перегону для електричної тяги постійного струму, що відрізняється представленням загальної цепної схеми кожної рейки в якості чотириполюсників з урахуванням заземлення опор контактної мережі на крайні рейки, що дозволило оцінити рівні струмів асиметрії, які відгалуджуються в апаратуру тональних рейкових кіл і здійснюють вплив на роботу елементів рейкової мережі.

3. Розроблено математичну модель для дослідження ПГ частоти на неколінеарних магнітних полях, що працює у режимі повторення частоти і використовується як ЗЗ від впливу атмосферних явищ та комутаційних перенапруг тягової мережі і відрізняється від аналогів відсутністю обмотки зворотного зв'язку, зустрічним увімкненням обмоток накачки та наявністю енергоємних елементів у вхідному кол для покращення енергетичних властивостей пристрою.

4. На основі проведених досліджень макетного зразку ПГ було уточнено електричні параметри струмів, напруг в колах накачки та контуру, побудовано залежності напруги контуру від напруги мережі, температури нагрівання обмоток від

часу, отримані зовнішня та навантажувальна характеристики, встановлено, що ПГ може успішно використовуватися як вторинне джерело живлення зі стабільними вихідними характеристиками та ККД. Проведено дослідження захисних властивостей ПГ за схемою «провід-провід», за якого при напрузі амплітудою до 3,5 кВ тривалістю до 100 мкс на вході ПГ з виходу знімалася напруга амплітудою не більше 5-7 В, що свідчить про зниження амплітуди випробувального впливу потужної імпульсної перешкоди в 500 разів. Адекватність математичної моделі ПГ отриманим експериментальним даним підтверджена за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності.

5. Здійснено оцінку інтенсивності відмов апаратури релейної шафи за грозовий період та за нормальних умов експлуатації. При впровадженні ПГ частоти, інтенсивність відмов апаратури релейної шафи від дії грозових розрядів та ПН зменшується у 6,7 разів. Здійснено розрахунок річного економічного ефекту від впровадження ПГ 50:50, що складає 35792 грн/рік. розраховані капітальні вкладення є ефективними.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – Москва : Наука, 1965. – 780 с.
2. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей / В. С. Андреев. – Москва : Радио и связь, 1982. – 280 с.
3. Андронов А. А. Теория колебаний / А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. – Москва : Физматгиз, 1959. – 915 с.
4. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва : Транспорт, 1990. – 295 с.
5. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В. С. Аркатов, Н. В. Котляренко, А. И. Баженов. – Москва : Транспорт, 1982. – 364 с.
6. Бабаев М. М. Аналіз впливу зовнішніх факторів на роботу рейкового кола / М. М. Бабаев, А. А. Прилипко // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – 2007. – Вип. 80. – С. 102-113.
7. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – Москва : УМК МПС, 2002. – 638 с.
8. Базуткин В. В. Расчеты переходных процессов и перенапряжений / В. В. Базуткин, Л. Ф. Домоховская. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.
9. Баев Е. Ф. Индуктивные элементы с ферромагнитными сердечниками / Е. Ф. Баев. – Москва : Сов. радио, 1976. - 320 с.
10. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – Москва : Высшая школа, 1996. – 580 с.
11. Боголюбов Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. – Москва : Физматгиз, 1963. – 407 с.
12. Боднарь В. В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В. В. Бондарь. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 177 с.

13. Бойник А. Б. Системы интервального регулирования движения поездов на перегонах / А. Б. Бойник. – Харьков : УкрГАЖТ, 2005. – 256 с.
14. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва : Наука, 1986. – 544 с.
15. Векслер Г. С. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / Г. С. Векслер, В. С. Недочетов, В. В. Пилинский. – Киев : Техника, 1990. – С. 26-36.
16. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) / В. А. Веников. – Москва : Высш. шк., 1976. – 479 с.
17. Виноградов В. В. Линии железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / В. В. Виноградов, С. Е. Кустышев, В. А. Прокофьев. – Москва : Маршрут, 2002. – 415 с.
18. 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 залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – № 31. – С. 221-225.
19. Гольдфарб Л. С. Метод исследования нелинейных систем регулирования, основанный на принципе гармонического баланса / Л. С. Гольдфарб // Сб. «Теория автоматического регулирования». – Москва : Машгиз, 1951. – 76 с.
20. ГОСТ Р 50397-2011 (МЭК 60050-161:1990). Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – 1.09.2012. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2012. – 24 с.
21. Гребенюк П. Т. Тяговые расчёты / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцова. – Москва : Транспорт, 1987. – 282 с.
22. Гук Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю. Б. Гук. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
23. Дмитриев М. В. Грозные перенапряжения на оборудовании РУ 35-750 кВ и защита от них / М. В. Дмитриев. – Санкт-Петербург : СПбГПУ, 2006. – 44 с.

24. Дмитриев М. В. Методика выбора ОПН для защиты оборудования сетей 110-750 кВ от грозových перенапряжений : дис. ... канд. техн. наук / М. В. Дмитриев. – Санкт-Петербург : СПбГПУ, 2006. – 250 с.
25. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – Москва : Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.
26. Жуковицкий И. В. О влиянии электрооборудования пассажирских вагонов на рельсовые цепи устройств безопасности / И. В. Жуковицкий, С. А. Разгонов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2005. – № 5. – С. 112-113.
27. Задерей Г. П. Параметрический трансформатор с ортогональными полями / Г. П. Задерей, В. И. Пунтус // Электронная техника. – 1972. – № 2. – С. 34-37.
28. Зевеке Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
29. Евсеев И. Г. Защита устройств связи и СЦБ / И. Г. Евсеев. – Москва : Транспорт, 1982. – 176 с.
30. Ермаков В. И. Физика грозových облаков / В. И. Ермаков, Ю. И. Стожков. – Москва : РАН, 2004. – 39 с.
31. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. СН РК 2.04-29-2005. – Москва, 1996. – 98с.
32. Каганов З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / З. Г. Каганов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 247 с.
33. Кадомская К. П. Анализ токовых нагрузок ограничителей перенапряжений, устанавливаемых на опорах воздушных линий / К. П. Кадомская, А. А. Рейхердт // Электричество. – 2000. – № 1. – С. 2-6.
34. 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.
35. Казаков А. А. Автоблокировка, локомотивная сигнализация и автостопы / А. А. Казаков, Е. А. Казаков. – Москва : Транспорт, 1980. – 360 с.

36. Каплан А. Е. Параметрические генераторы и делители частоты / А. Е. Каплан, Ю. А. Кравцов, В. А. Рылов. – Москва : Сов. радио, 1966. – 333 с.
37. Кармашев В. С. Электромагнитная совместимость технических средств / В. С. Кармашев. – Москва, 2001. – 74 с.
38. Карпов И. В. Экономика организация и планирование хозяйство сигнализации и связи / И. В. Карпов, С. Г. Климович, Л. И. Хляпов. – Москва : Маршрут, 2002. – 436 с.
39. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Л. Киш; пер. с венгер. М. Бики; под ред. Г. Е. Тарле. – Москва : Энергия, 1980. – 208 с.
40. Козлов В. Е. Техничко-экономическая оценка надежности устройств СЦБ на двухпутных линиях / В. Е. Козлов, Е. Г. Ефимова // Вестн. ВНИИЖТ. – 1982. – Вып. 7. – С. 21-24.
41. Кокурин И. М. Эксплуатационные основы устройств автоматики и телемеханики / И. М. Кокурин, Л. Ф. Кодратенко. – Москва : Транспорт, 1989. – 184 с.
42. Корн Г. Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1970. – 720 с.
43. Костенко М. В. Атмосферные перенапряжения и грозозащита высоковольтных установок ЛЛ / М. В. Костенко. – Москва : ГЭИ, 1949. – 330 с.
44. Костенко М. В. Заземления в сетях высокого напряжения и средства защиты от перенапряжений : учебное пособие / М. В. Костенко, И. М. Богатенков, Ю. А. Михайлов, Ф. Х. Халилов. – Ленинград : ЛПИ, 1983. – 72 с.
45. Костроминов А. М. Защита устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от помех / А. М. Костроминов. – Москва : Транспорт, 1997. – 192 с.
46. Костроминов А. М. Исследование проблемы грозового поражения кабелей без металлопокрытия / А. М. Костроминов, А-р А. Костроминов, А. А. Костроминов // V международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии ЭМС-2003 : собрание научн. докл. – Санкт-Петербург, 2003. – С. 340-342.

47. 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.
48. Котляренко Н. Ф. Электрические рельсовые цепи / Н. Ф. Котляренко. – Москва : Трансжелдориздат, 1961 - 327 с.
49. Кравцов Ю. А. Системы интервального регулирования движения поездов с централизованным размещением аппаратуры / Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – Москва : МИИТ, 1983. – 86 с.
50. 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.
51. Кузнецов В. В. Разработка и проверка адекватности динамической электромагнитной модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии / В. В. Кузнецов, А. В. Николенко, В. П. Иващенко // Электротехника и компьютерные системы. – Одесса, 2014. – № 15(91). – С. 292-301.
52. 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.
53. Ляпунов А. М. Собрание сочинений / А. М. Ляпунов. – Т. 2. – Москва : Изд-во АН СССР, 1956. – 481 с.
54. 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.
55. Невретдинов Ю. М. Оптимизация схем грозозащиты подстанций высокого напряжения от набегающих по линиям грозовых волн в районах с высоким удельным сопротивлением грунта : дис. ... канд. техн. наук / Ю. М. Невретдинов. – Ленинград, 1980. – 272 с.

56. Макаров Е. Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс / Е. Г. Макаров. – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – 448 с.
57. 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.
58. Манаков А. Д. Защита ввода питания релейных шкафов устройств СЦБ от грозовых перенапряжений / А. Д. Манаков, А. В. Алексенко, Е. Н. Шатров // Тр. Всероссийской научно-практ. конф. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2001. – Т. 1. – С.75-81.
59. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / К. Г. Марквардт. - 4-е изд., перераб. и дополн. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с.
60. Мельников Н. А. Электрические сети и системы : учеб. пособие для вузов / Н. А. Мельников. – Москва : Энергия, 1975. – 464 с.
61. Меньшиков Н. Я. Надежность железнодорожных систем автоматики и телемеханики / Н. Я. Меньшиков, А. И. Королев, Р. Ш. Ягудин. – Москва : Транспорт, 1976. – 215 с.
62. Митропольский Ю. А. Метод усреднения в нелинейной механике / Ю. А. Митропольский. – Киев : Наук. думка, 1971. – 440 с.
63. Отраслевые нормы времени на техническое обслуживание устройств СЦБ. Утверждено Указанием МПС № Р-200у от 3.03.2003 г. – Изд. перераб. и дополн. – М.: Трансиздат, 2003. - 224 с.
64. Пат. 70601 Україна, МПК В61L 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 академіка В. Лазаряна. – № U 2011 11205; заявл. 20.09.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
65. Пат. 92628 Україна, МПК В61L 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.

66. Пат. 69209 Україна, МПК В61L 23/00 Параметричний генератор частоти з захистом навантаження від завад / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов, С. А. Разгонов, О. Ю. Лебедев; 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.

67. Пат. 77216 Україна, МПК В61L 23/00 Параметричний генератор з неколінеарними магнітними полями / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов, О. Ю. Лебедев; 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.

68. Пат. 80793 Україна, МПК В61L 23/00 Параметричний генератор з ефективним захистом навантаження від завад / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов, О. Ю. Лебедев; 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.

69. Пат. 87844 Україна, МПК В61L 23/00 Параметричний генератор з неколінеарними магнітними полями для живлення пристроїв автоматики і телемеханіки / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, А. Ю. Журавльов, О. Ю. Лебедев; 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.

70. Перельман Л. С. Уточнение теории распространения волн вдоль многопроводной линии в связи с некоторыми техническими задачами / Л. С. Перельман // Изв. НИИПТ. – 1963. – Вып. 10. – С. 10.

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

72. Пенкин Н. Ф. Рельсовые цепи переменного тока с дроссель-трансформаторами / Н. Ф. Пенкин. – Москва : Трансжелдориздат, 1953. – 139 с.
73. Правила тяговых расчётов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
74. Правила безпечної експлуатації пристроїв автоматики, телемеханіки та зв'язку на залізницях України. ЦШ 0030. – Київ, 2003. – 122 с.
75. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 444 с.
76. Правила устройств электроустановок : утверждены постановлением Правительства РК от 24.10.2012 №1355. – Москва, 2012. – 606 с.
77. Правила устройства электроустановок. Глава 1.7. Заземление и защитные меры электробезопасности. – Москва : НЦ ЭНАС, 2002. – 435 с.
78. Разгонов А. П. Вплив тягового струму асиметрії на роботу рейкових кіл / А. П. Разгонов, К. І. Ящук та ін. // Матеріали IV Міжнародної науково-практ. конф. «Електроманітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – С. 68.
79. Разгонов А. П. Генератор частоты на неколлинеарных магнитных полях как эффективное защитное средство от помех / А. П. Разгонов, Е. И. Ящук // Залізничний трансп. України. – 2011. – № 5. – С. 32–35.
80. Разгонов А. П. Діагностування електричних машин частотним методом / А. П. Разгонов, М. І. Капіца, К. І. Ящук // Матеріали IV Міжнародної науково-практ. конф. «Електроманітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011.– С.67.
81. Разгонов А. П. Дослідження систем автоблокування на перевальних ділянках з крутим профілем / А. П. Разгонов, К. І. Ящук // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Електроманітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – С. 43-44.

82. 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.

83. Разгонов А. П. Защита рельсовых цепей путем применения параметрического трансформатора / А. П. Разгонов, Б. С. Сергеев, Е. И. Ящук // Транспорт Урала. – 2011. – № 1(32). – С.28-32.

84. Разгонов А. П. Електроживлення та захист від перешкод апаратури тональних рейкових кіл / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, С. А. Разгонов // Матеріали III міжнародної науково-практ. конф. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті EMCS-R 2010». – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – С. 42-43.

85. Разгонов А. П. Исследование устойчивости периодических решений нелинейного дифференциального уравнения параметрического генератора частоты на неколлинеарных магнитных полях / А. П. Разгонов, Е. И. Ящук // Сучасні проблеми розвитку інтелектуальних систем транспорту : тези Міжнародної науково-практ. конф. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – С. 105.

86. Разгонов А. П. Исследование статических характеристик параметрического генератора с ортогональными магнитными полями в рабочем режиме / А. П. Разгонов, С. А. Разгонов, Е. И. Ящук // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – № 4. – С. 84-89.

87. 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.

88. Разгонов С. А. Новое защитное средство электронных схем от помех / С. А. Разгонов, Е. И. Ящук // Вісн. Академії митної служби України. Сер.: «Технічні науки» – 2012. – №2(48). – С. 100-107.

89. 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.

90. Разгонов А. П. О математическом описании петли гистерезиса ферромагнитных сердечников / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, Е. И. Ящук // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте». – Днепропетровск : ДИИТ, 2011. – С.66.

91. 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 : ДІТ, 2012. – С. 56-58.

92. 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 : ДІТ, 2012. – С. 58-59.

93. Разгонов А. П. Параметричний генератор частоти – для живлення та захисту навантаження від потужних завад / А. П. Разгонов, К. І. Ящук, С. А. Разгонов // Залізничний трансп. України. – 2014. – № 3. – С. 38-41.

94. 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 : ДІТ, 2012. – С. 59-60.

95. Разгонов А. П. Профилактическое обслуживание рельсовых цепей / А. П. Разгонов, Л. В. Оводков. – Москва : Транспорт, 1980. – 143 с.

96. Разгонов А. П. 100 %-я защита средств автоматики от воздействия мощных импульсных помех со стороны питающей сети / А. П. Разгонов, Е. И. Ящук, С. А. Разгонов // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : тези 74-ї Міжнародної науково-практ. конф. – Дніпропетровськ : ДІТ, 2014. – С. 237-238.

97. Руководящие указания по защите от перенапряжений устройств СЦБ. – Москва : Транспорт, 1990. – 321 с.
98. 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. – 98 с.
99. Сороко В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Сороко, Е. Н. Розенберг. – Москва : НПФ «ПЛАНЕТА», 2000. – 1008 с.
100. Сухоруков С. А. Вводно-защитные устройства для микропроцессорной автоблокировки / С. А. Сухоруков // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 9. – С. 15-18.
101. Талыков А. А. Фазочувствительные рельсовые цепи 25 Гц / А. А. Талыков, А. П. Разгонов. – Москва : Транспорт, 1972. – 96 с.
102. Федоров Н. Е. Современные системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями / Н. Е. Федоров // Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте. – 1996. – № 5. – 132 с.
103. Филиппов К. Нелинейная электротехника / К. Филиппов. – Москва : Энергия, 1976. – 502 с.
104. Хаяси Тихиро Нелинейные колебания в физических системах / Тихиро Хаяси. – Москва : Мир, 1968. – 300 с.
105. ЦЭ/4506. Правила техники безопасности при эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог и устройств электроснабжения автоблокировки. – Москва : Министерство путей сообщения СССР, 1987. – 244 с.
106. Щека В. І. Дослідження впливу зворотного тягового струму на режими роботи тональних рейкових кіл / В. І. Щека, І. О. Романцев, К. І. Ящук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – № 42. – С. 24-28.
107. Юман М. Молния / М. Юман. – Москва : Мир, 1972. – 327 с.
108. Ящук Е. И. Влияние больших тяговых токов на работу устройств железнодорожной автоматики / Е. И. Ящук, А. Ю. Лебедев // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 2. – С. 45-49.

109. Ящук К. І. Дослідження систем автоматичної локомотивної сигналізації / К. І. Ящук // Матеріали III міжнародної науково-практ. конф. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті EMCS-R 2010». – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2010. – С. 54.
110. Ящук К. І. Організація захисту навантаження параметричного генератора частоти від потужної імпульсної завади / К. І. Ящук // Матеріали молодих вчених та студентської конференції «Інформаційно-управляючі технології і системи на залізничному транспорті». – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2012. – С. 59-60.
111. Ящук К. І. Термічний вплив тягового струму на елементи зворотної тягової мережі / К. І. Ящук, С. С. Грущинський, І. В. Котляров // Інформаційно-управляючі технології і системи на залізничному транспорті : тези матеріалів молодих вчених та студентської конференції – Дніпропетровськ : ДІТ, 2012. – С. 68-69.
112. Ящук К. І. Дослідження впливу тягового струму на режими роботи рейкових кіл / К. І. Ящук, С. Ю. Жук, О. Є. Кополовець // Інформаційно-управляючі технології і системи на залізничному транспорті : тези матеріалів молодих вчених та студентської конференції. – Дніпропетровськ : ДІТ, 2012. – С. 60-61.
113. Anderson R. B. Lightning parameters for engineering application / R. B Anderson, A. J. Eriksson. – 1980. – Electra 69: 65-102.
114. Abetti P. A. Transformer Models for the determination of transient voltages / P. A Abetti // Trans. AIEE. 1953. – № 72. – P. 468-480.
115. Aguado S. Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements / S. Aguado / International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2012. – Т. 53. – № 1. – P. 160-169.
116. A study of lightning flashes attending periods of banded heavy snowfall / Amy, E. Becker, Dr. Patrick S. Market // Thesis Supervisor. – 2007. – 77 p.
117. Berger K. Parameters of lightning flashes / K. Berger, R. B Anderson, H. Kroninger. – 1975. – Electra 80. – 223 p.

118. Brasca E. Die Vertrauensgrenzen von Hochspannungs-Prüfsergebnissen / E. Brasca, M. Tellarini, L. Zaffanella // IEEE Trans. – PAS 86. – 1967. – № 8. – P.
119. IEC 62305-2, 3 Lightning protection. 2011. - 268 p.
120. Hedrick J. K. Stability of Nonlinear Systems: Theory and Applications / J. K. Hedrick, A. Girard. – Berkeley, 2005. – 132 p.
121. Kube K. Stiking Solutions Progressive Railroading / K. Kube. – 2000. – № 3. - P. 70-72.
122. Kuznetsov A. S. Parametric generator of hyperbolic chaos based on two coupled oscillators with nonlinear dissipation / A. S. Kuznetsov, S. P. Kuznetsov, I. R. Sataev // Technical Physics. – 2010. – T. 55. – №12. – C. 1707–1715.
123. Krause Paul C. Analysis of Electric Machinery / Paul C. Krause. – Portland : IEEE Press, 1995. – 680 p.
124. Malan D. J. Physics of Lightning / D. J. Malan. – London : The English Univ. Press Ltd, 1964. – 163 p.
125. Patent 8699124, USA, WO2011/157990 Parametric generator / M. H. Dunn; University Court of The University of St Andrews Filed. - PCT/GB2011/000899: June 16, 2011; PCT Pub. Date: December 22, 2011.
126. Rakov V. A. Lightning: physics and effects / V. A. Rakov, M. A Uman. – Cambridge University Press, 2003. – 679 p.
127. Sastry S. Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control / S. Sastry // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2000. – № 12. – P. 2438-2439.
128. Tzeng S. C. Parametric study of heat-transfer design on the thermoelectric generator system / S. C. Tzeng, T. M. Jeng, Y. L. Lin // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2014. – T. 52 – P. 97–105.
129. You C. Y. Reduced spin transfer torque switching current density with non-collinear polarizer layer magnetization in magnetic multilayer systems / C. Y. You // Applied Physics Letters. – 2012. – T. 100. – №25. – C. 252413.
130. 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.– C. 107–114.

Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ



Ректор Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту імені
академіка В. Лазаряна, професор

О. М. Пшінько

2015 р.

про впровадження результатів дисертаційної роботи асистента кафедри «Автоматика, телемеханіка та зв'язок» Ящук Катерини Іванівни на тему «Підвищення надійності системи автоблокування в умовах впливу високих рівнів тягових струмів та потужних імпульсних завад» у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Наукові положення дисертаційної роботи, вдосконалений пристрій параметричного генератору на неколінеарних магнітних полях використовується у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при підготовці спеціалістів та магістрів зі спеціальності 7(8).05020203 «Автоматика та автоматизація на транспорті». Отримані результати використовуються під час проведення занять з дисциплін «Електроніка та мікропроцесорна техніка», «Електроживлення систем автоматики», «Автоматизований електропривод», «Системи автоматики на перегоні», «Станційні системи автоматики», а також при виконанні дипломних магістерських робіт та дипломних проектів спеціалістів.

Використання результатів досліджень та вдосконалений пристрій параметричного генератору на неколінеарних магнітних полях дозволяють студентам отримати навички щодо підвищення надійності системи автоблокування як в умовах впливу високих рівнів тягових струмів, так і в умовах виникнення потужних імпульсних завад, створених комутаційними перенапругами контактної мережі.

Декан факультету
«Технічна кібернетика»,
д.т.н., професор

В. В. Скалозуб

Завідувач кафедри
«Автоматика, телемеханіка та зв'язок»
д.ф.-м.н., професор

В. І. Гаврилюк

Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник Дніпропетровської
шостої дистанції
сигналізації та зв'язку
Кердан В. Ю.
р.



АКТ

експлуатаційних досліджень в умовах РТД ШЧ-6 Придніпровської залізниці перетворювача частоти, виготовленого за результати дисертаційної роботи Ящук Катерини Іванівни на тему «Підвищення надійності системи автоблокування в умовах впливу високих рівнів тягових струмів та потужних імпульсних завад»

За результатами наукових досліджень дисертаційної роботи було розроблено пристрій параметричного генератора частоти, який досліджено в умовах РТД ШЧ-6 з метою визначення його параметрів та оцінки можливостей застосування на конкретних технічних уставках пристроїв автоматики та телемеханіки в якості джерела стабілізованої напруги, а також захисного засобу від імпульсних завад.

Встановлено: електричні параметри виробу відповідають його призначенню в якості джерела стабілізованої напруги та захисного засобу.

Рекомендовано: довести виріб до промислового зразку для проведення більш тривалих експлуатаційних випробувань в пристроях залізничної автоматики та телемеханіки.

Комісія:

Начальник лабораторії
Автоматики, телемеханіки та зв'язку
Придніпровської залізниці

Тирса В. І.

Начальник ділянки РТД ШЧ-6
Придніпровської залізниці

Зіненко Д. В.

Керівник науково-дослідної роботи,
Д.т.н., проф..

Разгонов А. П.

Додаток В

ПРОТОКОЛ

предварительных заводских испытаний опытного образца преобразователя частоты ПЧ 50/50.

г. Саратов

20 июля 2012 г.

Комиссия, в составе Главного инженера ООО ЭТЗ «ГЭКСАР» А.Ю. Грайфера, ведущего научного сотрудника ООО «СтройЖелДорпроект – СЦБ» В.С. Аркатова, д.т.н. профессора кафедры АТС ДИИТ А.П. Разгонова, зам. начальника отдела ООО ЭТЗ «ГЭКСАР» С.В. Федукина, мастера ООО ЭТЗ «ГЭКСАР» С.А. Жемчугова, аспиранта ДИИТ Е.И. Ящук провела испытания опытного образца параметрического преобразователя частоты ПЧ 50/50.

В результате испытаний установлено следующее:

1. Преобразователь содержит магнитопровод с двумя обмотками; реактор с индуктивностью 0,06 Гн, включенный последовательно в цепь входной обмотки; конденсатор ёмкостью 50мкФ, включенный параллельно выходной обмотке.
2. При подаче на входную обмотку напряжения в пределах 190 ÷ 240 В напряжение на выходной обмотке не изменяется и составляет 220 ± 3 В.
3. При холостом ходе потребляемый ток преобразователя не превышает 1,7 А, а при нагрузке 150 Вт – 2,7 А.

Комиссия считает:

1. ООО ЭТЗ «ГЭКСАР» изготовить два опытных образца преобразователя с учётом результатов проведенных испытаний:
 - магнитопровод должен состоять из 85 слоёв пластин, из которых 20 содержат воздушный зазор 1 мм. и магнитный шунт – 25 пластин;
 - входная обмотка должна содержать 300 витков провода $\varnothing 1,0$ мм. с тремя отводами по 25 витков;

- выходная обмотка должна содержать 300 витков провода \varnothing 1,6 мм. с тремя отводами по 25 витков.


2. Один экземпляр преобразователя передать ООО «СтройЖелДорпроект– СЦБ» для проведения испытаний и уточнения параметров преобразователя.

3. ООО ЭТЗ «ГЭКСАР» изготовить дополнительный опытный образец преобразователя с двумя воздушными зазорами 1 мм. согласно представленному рисунку.

Главный инженер ООО ЭТЗ «ГЭКСАР»  А.Ю. Грайфер

Ведущий научный сотрудник
ООО «СтройЖелДорпроект – СЦБ»  В.С. Аркатов,

Д.т.н. профессор кафедры АТС ДИИТ  А.П. Разгонов

Зам. начальника отдела ООО ЭТЗ «ГЭКСАР»  С.В. Федукин

Мастер ООО ЭТЗ «ГЭКСАР»  С.А. Жемчугова

Аспирант ДИИТ  Е.И. Ящук

