

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерних технологій і систем»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Пояснювальна записка

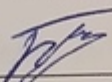
до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

на тему: Вдосконалення схеми параметричного генератора частоти на неколінеарних магнітних полях

(назва теми на українській мові з наказу про затвердження тем за магістрами)

за освітньою програмою «Автоматика та автоматизація на транспорті»
зі спеціальності: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

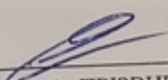
Виконав: студент групи АТ2321



(підпис студента) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

/ Дмитро БЄЛКІН /

Керівник: доцент кафедри АТ

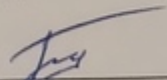


(підпис керівника) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

/ Катерина ЯЦУК /

Засвідчую, що у цій роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент



(підпис студента)

Дніпро – 2025 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies**

Faculty of Computer Technologies and Systems

Department of Automation and Telecommunication

Explanatory Note

to Master's Thesis

master

(higher education degree)

on the topic: Improvement of the scheme of the parametric frequency generator on non-collinear magnetic fields

(назва теми на англійській мові з наказу про затвердження тем за магістрами)

according to educational curriculum «Automatic machinery and automation in transport industry»

in the Specialty: 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics

Done by the student of the group AT2321

/ Dmytro BELKIN /

Scientific Supervisor: associate professor

/ Kateryna YASHCHUK /

Dnipro – 2025

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем
Кафедра: Автоматика та телекомунікації
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
Освітня програма: Автоматика та автоматизація на транспорті
Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри АТ

Володимир ГАВРИЛЮК

(підпис)

«_____» _____

202__ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу _____ магістр
(ступінь вищої освіти)

студенту _____ Белкін Дмитро Ігорович
(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема роботи: _____ Вдосконалення схеми параметричного генератора частоти на неколінеарних магнітних полях

Керівник роботи: _____ доцент Катерина ЯЦУК
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від _____ "05" жовтня 2023 _____ : 991ст
р.

2. Строк подання студентом роботи: 13 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: _____ Структурна та принципова схема параметричного генератора частоти зі зворотнім зв'язком
_____ довідкова література

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: _____
Огляд систем захисту обладнання систем автоматики і телемеханіки від високих тягових струмів і потужних завад

4.2 Основна частина: _____

Вдосконалення схеми параметричного генератора частоти як джерела вторинного живлення та пристрою захисту апаратури СЦБ від впливу потужних імпульсних завад

4.3 Охорона праці та захист навколишнього середовища: не передбачена

4.4 Економічна частина: не передбачена

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Вдосконалена схема параметричного генератора частоти та результати вимірювань

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів робо	Примітка
1	Огляд систем захисту обладнання систем автоматики і телемеханіки від високих тягових струмів і потужних завад	1.06.23	Вик.
2	Проблема захисту апаратури автоблокування від впливу тягового струму на ділянках заліниць	4.11.2024	Вик.
3	Вдосконалення схеми параметричного генератора частоти як джерела вторинного живлення та пристрою захисту апаратури СЦБ від впливу потужних імпульсних завад	9.12.2024	Вик.
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	13.01.2025	Вик.

5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії		
---	---	--	--

Студент

(підпис)

Дмитро БЄЛКІН

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Катерина ЯЦУК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

57 сторінок, 18 рисунків, 1 таблиця, 21 джерело літератури.

Об'єкт розробки – засоби захисту від завад та перенапруг, що застосовуються на залізничному транспорті.

Мета роботи – вдосконалення схеми параметричного генератору частоти на неколінеарних магнітних полях.

Методи дослідження – методи вимірювання напруги і струму в колах, методи оцінки, методи теорії надійності.

У першому розділі здійснюється Огляд систем захисту обладнання систем автоматики і телемеханіки від високих тягових струмів і потужних імпульсних завад.

Другий розділ присвячений розкриттю проблеми захисту апаратури автоблокування від впливу тягового струму на ділянках заліниць.

У третьому розділі досліджується схема параметричного генератора частоти як джерела вторинного живлення та пристрою захисту апаратури СЦБ від потужних імпульсних завад.

У четвертому розділі приведено результати експериментальних досліджень макетного зразку параметричного генератора частоти на неколінеарних магнітних полях.

Висновок. Результати роботи дозволяють забезпечити захист пристроїв автоблокування від дії потужних імпульсних завад.

Ключові слова: ЗАХИСТ ВІД ЗАВАД, ПЕРЕНАПРУГИ, ГЕНЕРАТОР ЧАСТОТИ, ІМПУЛЬСНІ ЗАВАДИ

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН.....	4
ЗМІСТ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СИСТЕМ ЗАХИСТУ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ І ТЕЛЕМЕХАНІКИ ВІД ВИСОКИХ ТЯГОВИХ СТРУМІВ І ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД.....	9
1.1 Аналіз статистики відмов систем автоматизації, телемеханіки та зв'язку.....	10
1.2 Параметри грозового імпульсу як джерела виникнення ПІЗ.....	12
1.3 Механізм впливу грозових розрядів на апаратуру електроживлення та захисту систем автоматики.....	14
1.3.1 Характеристики апаратури живлення та захисту систем СЦБ.....	15
1.4 Механізм впливу ПІЗ на функціонування пристроїв автоматичної блокування (АБ).....	23
2 ПРОБЛЕМА ЗАХИСТУ АПАРАТУРИ АВТОБЛОКУВАННЯ ВІД ВПЛИВУ ТЯГОВОГО СТРУМУ НА ДІЛЯНКАХ ЗАЛІЗНИЦЬ	27
3 ВДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМИ ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ЧАСТОТИ ЯК ДЖЕРЕЛА ВТОРИННОГО ЖИВЛЕННЯ ТА ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ АПАРАТУРИ СЦБ ВІД ВПЛИВУ ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД.....	31
3.1 Процес ініціювання параметричних коливань у генераторі.....	35
3.2 Вибір конструкції параметричного генератора та характеристик його компонентів.....	39
4 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МАКЕТНОГО ЗРАЗКУ ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРУ ЧАСТОТИ.....	46
4.1 Розробка експериментального зразка та схема для вивчення характеристик параметричного генератора частоти.....	46
4.2 Дослідження параметрів елементів схеми захисту вхідного кола генератора.....	48
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	55

ВСТУП

Згідно з Постановою Кабінету Міністрів України «Про затвердження технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту» від 11.07.2013 р. № 494, основним напрямком у забезпеченні перевезень пасажирів та вантажів є підвищення безпеки усіх компонентів залізничного транспорту. Важливу роль у цьому процесі відіграють системи залізничної автоматики та телемеханіки (ЗАТ), зокрема їхня надійність, яка є комплексною та вимагає впровадження різних рішень і заходів для її забезпечення.

Проблеми підвищення експлуатаційної надійності існуючих систем сигналізації, централізації, блокування (СЦБ) та рейкових кіл (РК) залишаються актуальними на багатьох ділянках залізниць. Особливу увагу слід звернути на високі рівні тягових струмів, які виникають, наприклад, на гірських ділянках через значні підйоми, що впливають на роботу апаратури РК, а також на потужні імпульсні завади (ПІЗ), спричинені комутаційними перенапругами (ПН) та атмосферними явищами.

Отже, завданням є підвищення надійності роботи системи автоблокування в умовах високих тягових струмів та потужних імпульсних завад, що сприятиме більш ефективній і безпечній організації технологічного процесу перевезень і руху поїздів.

1 ОГЛЯД СИСТЕМ ЗАХИСТУ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ І ТЕЛЕМЕХАНІКИ ВІД ВИСОКИХ ТЯГОВИХ СТРУМІВ І ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД

Сучасні умови функціонування залізниць, збільшення швидкостей і інтенсивності руху поїздів вимагають впровадження автоматизованих систем управління процесом перевезень. Для цього необхідно підвищити стійкість електропостачання систем залізничної автоматики (ЗАТ), що залежить від надійності живлення пунктів та ліній автоблокування (АБ), а також їх окремих елементів. Сучасні залізничні системи, які використовуються на практиці, передбачають застосування електронного обладнання, що потребує забезпечення відповідного захисту від високих рівнів тягових струмів і перевищених імпульсних перенапружень (ПІЗ), що можуть виникнути через блискавки, грозові розряди або комутаційні перенапруження та короткі замикання в тяговій мережі.

Проте сучасні засоби захисту не забезпечують достатньої ефективності, а економічні збитки від ушкоджень, спричинених ПІЗ та високими тяговими струмами, можуть бути значними. Високі рівні струмів і напруги в електричних ланцюгах технічних засобів призводять не лише до пошкодження ізоляції, теплового чи динамічного руйнування, але й можуть спричинити ураження електричним струмом обслуговуючого персоналу, що є недопустимим.

Кожен технічний засіб має певну стійкість до електромагнітних впливів, що означає його здатність витримувати перевантаження напругою та струмом. Це вимагає застосування спеціальних методів і технічних засобів захисту від електромагнітних випромінювань, що перевищують рівні робочих сигналів. Така енергія може діяти на технічні засоби при прямих ударах блискавки або при віддалених грозових розрядах, коли руйнівна енергія передається через високовольтні лінії електропередачі, кабельні або повітряні лінії зв'язку, а також через рейки.

1.1 Аналіз статистики відмов систем автоматизації, телемеханіки та зв'язку

Найбільші збитки для господарства СЦБ і зв'язку спричиняють відмови, що виникають влітку через імпульсні перенапруги, які утворюються грозовими розрядами. Внаслідок термічної дії тягових струмів на елементи апаратури РК на перевальних ділянках з крутим профілем доріг часто спостерігаються значні затримки поїздів. У випадках прояву таких відмов електротехнічне обладнання АБ працює в умовах, наближених до гранично допустимих, що призводить до відмов.

На лінії електропостачання АБ фіксується 10-12 прямих ударів блискавки на кожні 100 км при 30 грозових годинах. Згідно з дослідженнями [4], відключення ненавантажених або мало навантажених трансформаторів спричиняє імпульсну напругу, яка в 3-5 разів перевищує номінальну напругу лінії. Грозові розряди становлять близько 40% від пошкоджень, пов'язаних з лініями електропостачання СЦБ [8].

Статистика відмов Служби сигналізації та зв'язку показує, що на вплив грозових та комутаційних перенапруг припадає 13,36% від загальної кількості, що є суттєвим показником. На деяких ділянках доріг фіксуються випадки [126], коли виявляються 95 уражень пристроїв СЦБ, з яких 12 випадків призвели до відмови наступних пристроїв: 50 блоків БС-ДА, 8 трансмітерних реле Т, 25 аварійних реле АСШ-220, а також великої кількості розрядників та інших елементів. Проблема захисту від гроз є актуальною у всьому світі: наприклад, у штаті Флорида, США, за грозовий період на кожну квадратну милю припадає більше 12 ударів блискавки.

Таким чином, проблема захисту від гроз є надзвичайно важливою, особливо з урахуванням швидкого впровадження мікроелектронних систем ЗАТ. Хоча ці системи покращують управлінські функції, вони є більш чутливими до перехідних процесів атмосферної електрики (ПЗ), що може призводити до скидання інформації або пошкоджень. Тому ряд країн, зокрема США, Канада, Китай, Україна та інші, активно досліджують способи вдосконалення конструкцій засобів захисту (кремній-оксидні розрядники, пристрої заземлення, такі як «решітки» Фарадея тощо). При дво- або

трирівневою захисті об'єкта, який дозволяє гасити до 30% енергії завади, цей захист вважається цілком ефективним.

Для подальшої оцінки ефективності роботи системи АБ та оптимізації параметрів профілактичних заходів ми використовуємо отриману статистику відмов і часу відновлення. Щільність розподілу часу відновлення відмов телевізійної сигнальної установки можна представити за допомогою закону Ерланга другого порядку:

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

де m – математичне очікування часу відновлення для ділянок системи автоматики та телемеханіки (А і Т), які досліджуються, складає 1-2 години. Важливо зазначити, що час безвідмовної роботи пристроїв АБ та ЕЦ підпорядковується Пуассонівському потоку (стаціонарному, без наслідків) з відповідною щільністю розподілу

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

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.

Необхідно виділити пристрої, які частіше за все виходять з ладу під час грозових ударів [12], серед яких аварійні реле АСШ-220, блоки БС-ДА, трансмітери КПТШ, діодні схеми та інші.

Згідно з досвідом експлуатації систем ЗАТ, можна зазначити, що наслідки поодиноких відмов, що призводять до затримок у русі поїздів після відновлення системи, зазвичай не перевищують 2-3 години. Тобто, порушення графіку руху поїздів через окремі відмови сигнальних установок під час гроз усуваються не пізніше, ніж через 3 години. З урахуванням цього, а також статистики, що описує параметри закону розподілу часу безвідмовної роботи системи і часу відновлення (експоненційної),

ймовірність відмови двох або більше сигнальних установок за добу на певному відрізку лінії є дуже низькою.

Цю ймовірність для звичайних умов експлуатації можна визначити за допомогою наступного співвідношення:

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

де $q(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \approx \lambda t$ - вірогідність відмови апаратури сигнальної установки з 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 $m = 59$, 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.

У той же час, аналізуючи відмови реле НР, спричинені грозовими розрядами, можна зазначити, що на їх частку припадає 18 % від загальної кількості відмов, тоді як відмови реле типів НШ та НМШ складають не більше 5 % від загальної кількості відмов.

Сумарні інтенсивності відмов пристроїв, що виходять з ладу при грозах, складають $\lambda_{\text{відм}} \approx 16,1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{гроз.год}}$ тоді як за звичайних умов експлуатації дають величину $\lambda_{\text{відм}} \approx 5,9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{гроз.год}}$.

1.2 Параметри грозового імпульсу як джерела виникнення ПЗ

Ризик пошкодження апаратури та її кіл залежить від низки факторів, зокрема від характеристик грозового імпульсу [3]. У цьому контексті необхідно визначити, які саме параметри грозового імпульсу (переважно амплітуда і крутизна фронту) мають

бути враховані. Однак у документації можливість варіювання параметрів грозового імпульсу часто або не згадується, або розглядається недостатньо детально. Наприклад, у [15] наводяться лише три можливі набори параметрів грозового імпульсу (струми 200, 150 і 100 кА), що відповідають міжнародним стандартам [14], де також наводяться ймовірності виникнення блискавки, але для вибору представлені лише ці три набори струмів. Це означає, що для об'єктів електроенергетики використовується лише один профіль з струмом 100 кА. Для промислових об'єктів ймовірність ураження блискавкою значно вища (кілька ударів на рік), і за весь період експлуатації такого об'єкта може статися хоча б один розряд блискавки зі струмом 135 кА.

Основними характеристиками струму блискавки є максимальне значення імпульсу струму, крутизна фронту струму, тривалість фронту імпульсу і тривалість повного імпульсу, яка дорівнює часу, за який струм зменшується до половини свого максимального значення [10]. 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 складає 1,5-10 мкс. Середня тривалість імпульсу струму блискавки вибирається до 50 мкс (рис. 1.1), що визначає вибір стандартного повного грозового імпульсу напруги для випробувань електричної міцності ізоляції обладнання [7]. Ізоляція енергетичного об'єкта повинна витримувати такий імпульс напруги при ударі блискавки.

Щодо захисту вторинних кіл і апаратури від вторинних наслідків грозових розрядів, важливими параметрами є лише струм блискавки та тривалість фронту. Важливо зазначити, що середня крутизна фронту безпосередньо пов'язана з його тривалістю, тому можна розглядати або крутизну фронту, або його тривалість.

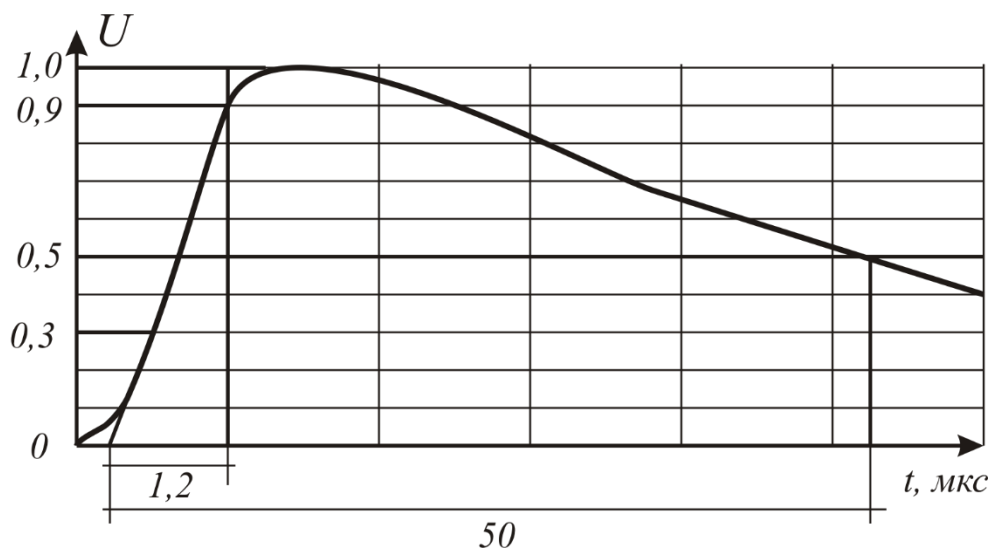


Рисунок 1.1 - Форма стандартного грозового імпульсу напруги

У гірських районах амплітудні значення струмів блискавки зменшуються приблизно вдвічі порівняно з рівнинними місцевостями [2]. Це зумовлено скороченням відстані від землі до хмар, що призводить до виникнення блискавок при менших скупченнях зарядів на хмарах, що, в свою чергу, знижує амплітуду струмів блискавки [6]. У гірській місцевості висхідні блискавки мають більш тривалі струми та більші заряди, які вони переносять, порівняно з рівнинними територіями [6].

Як показує ситуація, грозовий імпульс є дуже потужним і здатен вивести з ладу апаратуру залізничної автоматики та електропостачання. Цей вплив може пошкодити не лише апаратуру, а й створити загрозу для обслуговуючого персоналу, що є неприпустимим. Тому актуальним є питання, чи здатні існуючі засоби захисту витримати такі високі рівні струмів, особливо у гірських місцевостях, де спостерігається підвищена грозова активність.

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

Найбільш небезпечним є прямий удар блискавки, коли канал розряду проходить безпосередньо через об'єкт на поверхні землі. У таких випадках струм блискавки може досягати 200 кА, напруга — 150 МВ, а температура каналу сягає 6000–30000 °С.

Непрямий удар блискавки проявляється у виникненні індукованих напруг у металевих частинах обладнання [5]. Наприклад, під час розряду блискавки на відстані 1000 м від високовольтної сигнальної лінії автоблокування (ВЛ АБ) у проводах можуть індукуватися напруги до 21 кВ.

Аналіз впливу ударів блискавки свідчить, що індуковані перенапруги (ПН) та струми становлять найбільшу загрозу для пристроїв СЦБ, адже вони виникають значно частіше за прямі удари блискавки та містять достатньо високу енергію [6]. Це підкреслює необхідність використання надійних засобів захисту від атмосферної електрики.

Лінії автоблокування є особливо вразливими до атмосферних явищ. У їхніх проводах з'являються короткочасні електромагнітні хвилі, амплітуда яких може у десятки або сотні разів перевищувати робочу напругу лінії. Це створює серйозну небезпеку для лінійного обладнання сигнальних установок та силових трансформаторів.

Електротехнічний комплекс, до якого входять ВЛ АБ, трансформатори ОМ, захисна апаратура та система основного живлення (10 кВ), працює в умовах складної електромагнітної обстановки. На нього впливають електростатичні та електромагнітні поля контактної мережі, високовольтних ліній електропередач і атмосферної електрики.

Короткочасні імпульси напруги, спричинені комутаційними процесами або грозовими розрядами, часто перевищують номінальні значення у кілька разів [5]. Вони поширюються по ВЛ електропередачі зі швидкістю, близькою до швидкості світла, і досягають підстанцій, релейних шаф (РШ), а також постів електричної централізації (ЕЦ) із встановленим на них обладнанням [21].

1.3.1 Характеристики апаратури живлення та захисту систем СЦБ

Експлуатаційний досвід свідчить, що відмови автоматичних вимикачів багаторазової дії (АВМ) при короткому замиканні становлять 8,62% від загальної

кількості відмов; через вплив тягового струму — 16,38%; а через дії грози — 12,93% [61].

Найбільш уразливими до грозових та комутаційних перенапружень (ПН) є напівпровідникові пристрої, такі як блоки дешифрації БС-ДА, аварійні реле тощо. Відмови дешифраторних блоків БС-ДА становлять 26% усіх відмов у грозовий період (травень–серпень). Надходження перенапруги через трансформатор типу ОМ до низьковольтних кіл основного й резервного живлення пристроїв АБ, а також передача енергії ПН із рейкових кіл через колійний трансформатор типу ПОБС-3 призводить до пошкоджень діодів Д242А. Пробій таких діодів може спричинити перегорання обмотки трансформатора СОБС-2А, в результаті чого світлофор не працюватиме, що створює суттєву загрозу безпеці руху [91, 92].

Практика показує, що амплітуда ПН у колах постійного струму може сягати 400–800 В, чого достатньо для пошкодження напівпровідникових елементів у блоках БС-ДА. Для захисту діодів і ліній живлення від перенапруг застосовують вирівнювачі. Водночас статистика експлуатації свідчить, що 52% відмов діодів сталися за відсутності вирівнювачів, але 48% — навіть за їх наявності. Це вказує на недоліки існуючих захисних пристроїв [6].

Відмови аварійних і трансмітерних реле становлять понад 28% від загальної кількості відмов, пов'язаних із ПН у грозовий період.

Серед найбільш поширених засобів захисту пристроїв сигнальних установок від ПН є вентиляльні розрядники типу РВНШ-250(500). Вони забезпечують захист електричних кіл з робочою напругою до 360 В, чого недостатньо для їх ефективної роботи [9, 10].

Більш сучасними розробками засобів захисту пристроїв СЦБ є розрядники РКН-600, які замінюють розрядники типу РВНШ-250 у колах захисту введів живлення та колах вводу-виводу. Розрядники РКН забезпечують захист ізоляції апаратури від змінного струму з напругою ПН до 250 В і постійного струму з напругою до 120 В, які виникають внаслідок грозових розрядів і комутаційних процесів у лініях електроживлення.

З кінця 90-х років почали випускати тиристорні пристрої типів ЗТ-1(2), які призначені для захисту апаратури в рейкових колах змінного струму з частотою до 75 Гц і робочою напругою до 220 В (тип УЗТ-1) або до 60 В (тип УЗТ-2) від комутаційних перенапружень, що виникають при аварійних режимах тягової мережі. З 1996 року замість розрядника РВНШ-250 почав випускатися керамічний розрядник РКВН.

Керамічні вирівнювачі типу ВК-10 випускаються з 1973 року як заміна вирівнювачам ЗНО та ВНД. Нелінійні дводискові вирівнювачі типу ВНД і однодискові вирівнювачі типу ЗНО використовуються для захисту колійних приладів автоблокування на неелектрифікованих ділянках залізниць. Вирівнювач ВНД встановлюється на живильному кінці рейкового кола (РК) АБ, а ЗНО – на приймальному [9, 10].

На ділянках з електротягою змінного струму апаратура автоблокування і автоматичної локомотивної сигналізації захищаються від перенапружень у силових колах з напругою 110/220 В за допомогою розрядників і вирівнювачів. Колійні прилади РК захищаються від комутаційних перенапружень, спричинених короткими замиканнями контактної мережі змінного струму. На живильному кінці РК паралельно обмоткам ізолюючих трансформаторів встановлюють вирівнювачі типу ВС-220, а на приймальному кінці — вирівнювачі типу ВС-90.

На ділянках з автономною тягою лінійні кола захищаються з обох кінців кабельного вводу за допомогою вентилях або газонаповнених розрядників типу Р-35 або Р-350.

Для захисту напівпровідникової апаратури СЦБ від перенапружень використовуються вирівнювачі різних типів. Зокрема, вирівнювачі ВОЦШ-220 і ВОЦШ-110 забезпечують захист апаратури СЦБ та зв'язку в електричних колах із номінальною напругою 220 і 110 В змінного струму частотою 50 Гц.

Однак досвід експлуатації систем автоблокування і телемеханіки показує, що всі перераховані вище засоби захисту від перенапружень за тепловими характеристиками не відповідають вимогам щодо термічної стійкості, встановленим проектними

нормативами [20]. Тому проблема захисту апаратури РК від дії перенапружень залишається актуальною.

Одним із сучасних та ефективних засобів захисту є параметричний генератор (ПГ) частоти, заснований на використанні неколінеарних магнітних полів. ПГ забезпечує стабільну роботу пристроїв СЦБ навіть за складних експлуатаційних умов, таких як потужні імпульсні електромагнітні завади в колах первинних джерел живлення, вплив грозових розрядів, значні температурні перепади, вібрації тощо. У якості проектно-конструктивного параметра [5, 6] прийнято значення інтеграла

$$\int_0^{\infty} i^2 dt \text{ розмірністю } A^2c.$$

Проведені дослідження показали, що для існуючих пристроїв ЗАТ цей інтеграл становить лише 2,5–8 кДж.

До найважливіших вимог, що пред'являються до вторинних джерел живлення (ВДЖ), належать забезпечення високої стабільності вихідної напруги (в межах 1–3%) при значних коливаннях напруги первинних джерел, відсутність пульсацій напруги, ефективна фільтрація гармонік, захист від температурних змін, перенапруг та коротких замикань.

Ключовим і технічно складним елементом ВДЖ є стабілізатори напруги. Вони поділяються на два основних типи: параметричні та компенсаційні. Параметричні стабілізатори включають ферорезонансні стабілізатори напруги та струму, пристрої з термооперами, стабілітронами тощо. Компенсаційні стабілізатори є системами автоматичного регулювання, які компенсують усі дестабілізуючі впливи через негативний зворотний зв'язок. У таких стабілізаторах як джерело опорної напруги використовується стабілітрон, а регулюючим елементом зазвичай виступає транзистор.

Крім трансформатора (дроселя) та стабілізатора, ВДЖ включає фільтр, випрямляч, пристрої захисту від перенапруг і перевантажень тощо. Це робить ВДЖ багатокомпонентною електромагнітною системою, складною в налаштуванні та

експлуатації. При цьому вона поступається за надійністю параметричним індуктивним стабілізаторам, особливо у пристроях залізничної автоматики. Аналіз відмов напівпровідникових ВДЖ демонструє, що вони не повністю відповідають вищезазначеним вимогам.

Серед параметричних пристроїв ВДЖ, виготовлених на основі феромагнітних елементів [9], найбільш відомими є індуктивні параметрони з виходом на другу субгармоніку. Завдяки простоті конструкції, високій надійності, значному рівню стабілізації та стійкості до впливу імпульсних завад, такі параметрони ПЧ50:25 з частотою 25 Гц набули широкого застосування в системах ЗАТ з 1963 року [2].

Досвід тривалої експлуатації параметричних перетворювачів частоти 50/25 Гц на залізницях країн СНД підтвердив їх численні переваги. Вони демонструють високу надійність, ефективний захист колійних приймачів від потужних перешкод тягового струму та є оптимальним вибором для живлення рейкових кіл (РК) систем ЗАТ. Особливо цінною є властивість цих перетворювачів – практично повна відсутність гармонік у спектрі вихідної напруги, що збігаються з гармоніками тягового струму. Це робить такі вторинні джерела живлення (ВДЖ) особливо придатними для схем живлення рейкових кіл і тональних колійних приймачів.

Разом із тим, широко впроваджені на залізницях України та країн СНД тональні рейкові кола (ТРК) характеризуються низьким коефіцієнтом повернення приймачів (КПП), що знижує їхню ефективність. Це проявляється у зменшенні граничної довжини кола та ступеня контролю основних режимів, що забезпечують безпеку руху. До того ж напівпровідникова апаратура ТРК недостатньо захищена від перешкод тягового струму та грозових розрядів. Сучасні засоби захисту (ЗЗ) часто не відповідають вимогам щодо граничної потужності гасіння енергії перешкод, зокрема від блискавок і коротких замикань у контактній мережі.

У цьому контексті особливо актуальною є розробка параметричного індуктивного ВДЖ для живлення ТРК. Таке джерело мало б вирішити дві ключові проблеми: підвищення коефіцієнта повернення приймача і забезпечення захисту апаратури від імпульсних завад (ПЗ) через мережу живлення.

Важливо також розглянути умови експлуатації та заходи захисту для понижувальних трансформаторів ОМ, які підключаються до повітряних ліній (ВЛ) СЦБ. Пристрої ЗАТ на перегонах і невеликих станціях живляться від ВЛ автоблокування (АБ) з напругою 10 кВ та резервних ліній електропостачання напругою 10, 27,5 або 35 кВ через однофазні понижувальні трансформатори типу ОМ. Ці трансформатори, як пристрої з розподіленими параметрами, складно взаємодіють із грозовими та комутаційними перенапруженнями, що часто призводить до їх відмови [10].

Для обмеження наслідків прямих ударів блискавки верхній провід ВЛ АБ використовується як захисний. Додатково на опорах встановлюються два високовольтні розрядники типу РВП для захисту трансформаторів від поздовжніх перенапружень між проводом і землею. Практика експлуатації трансформаторів ОМ [8] показує, що найбільше число їх ушкоджень припадає на літній грозовий період, коли середня кількість відмов зростає втричі.

При застосуванні іскрових проміжків (дугозахисних "рогів") спостерігається їх інтенсивне обгорання під час відведення дуги. Однак існує ще одна технічна проблема, яка ставить під сумнів ефективність цього грозозахисного обладнання навіть у запроектованій формі. Зокрема, дугові замикання можуть супроводжуватися струмами різної величини, але можливість перенаправлення дуги на "роги" залежить від електродинамічних властивостей та конструктивних параметрів системи, і така можливість з'являється лише за струмів понад 1–2 кА.

При менших струмах дуга не переноситься на "роги", що створює ризик перепалу дроту. Така аварійна ситуація може виникати, наприклад, при короткому замиканні (КЗ), викликаному одночасним перекриттям ізоляторів декількох фаз на одній опорі внаслідок прямого удару блискавки в лінію на відстані кількох кілометрів від живильної підстанції. У разі індукованих перенапруг виникнення КЗ є ще менш імовірним, оскільки зазвичай перекриття фаз відбувається не на одній, а на різних опорах. Це означає, що струми дугових замикань при індукованих перенапругах

обмежуються опорами заземлення опор і зазвичай не перевищують 500 А. За таких умов дуга не може вийти на "роги", і система не здатна захистити дроти від перепаалу.

Іскрові проміжки (ІП) мають низку істотних недоліків:

- їх спрацювання призводить до короткого замикання;
- під час перехідного процесу можуть виникати перенапруги на поздовжній ізоляції трансформаторів, реакторів і електричних машин;
- значний статистичний розкид пробивних напруг ускладнює координацію ізоляції та створює додаткові технічні проблеми.

Для захисту вимірювальних трансформаторів напруги використовуються запобіжники типу ПКН. Запобіжники ПКН 001-10 УЗ з кварцовим наповнювачем є струмообмежувальними пристроями. 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 підходять для захисту силових трансформаторів потужністю 4 кВА з номінальною напругою 27,5 кВ та трансформаторів потужністю 10 кВА з номінальною напругою 35 кВ.

- Запобіжники, встановлені на високовольтній стороні трансформатора, повинні вибиратися з урахуванням селективності із запобіжниками на низьковольтній стороні, враховуючи ймовірні струмові перевантаження та струми відключення. Якщо струми перевантаження трансформатора, які можуть розплавити плавкий елемент запобіжника, менші за мінімальний струм відключення запобіжника, слід передбачити додаткову апаратуру для їх відключення. Запобіжники ПКН є вібростійкими, витримують одиничні удари з прискоренням до 3g тривалістю не більше 20 мс, а також вібрацію в частотному діапазоні від 0,5 до 100 Гц з амплітудою прискорення до 1g.

- Відключення струму короткого замикання в запобіжниках з кварцовим піском відбувається завдяки інтенсивній деіонізації дуги, що виникає в процесі плавлення вставки, в вузьких щілинах між піщинками наповнювача. Спрацювання запобіжників ПКН 001-10 УЗ визначається відсутністю показників на приладах, підключених до кола трансформатора напруги. Запобіжники ПКН відрізняються від

ПКТ наявністю константаної плавкої вставки, намотаної на керамічне осердя, що забезпечує високу питомий опір і струмообмежувальний ефект через малий перетин вставки.

- Запобіжники ПКН можуть бути використані в мережах з великою потужністю короткого замикання (до 1000 МВ×А), а потужність, що відключається посиленими запобіжниками ПКНУ, взагалі не обмежується. У порівнянні з ПКТ, запобіжники ПКН мають компактніші розміри і не оснащені індикатором спрацьовування (перегорання плавкої вставки можна визначити за показниками приладів, підключених до вторинної обмотки трансформатора напруги).

Згідно з нормативами, які передбачають використання захищених проводів на ВЛ 6-10 кВ, технічні вимоги до блискавкозахисту повинні враховувати обов'язкове застосування грозозахисних засобів на лініях, що проходять через відкриті та високі місцевості, а також у районах з понад 40 грозовими годинами на рік. Для ВЛ 6-10 кВ, що проходять через населені пункти з грозовою активністю більше 20 годин на рік, необхідно передбачити установки для захисту від грозових перенапруг.

Незважаючи на багаторічний досвід використання, згадані засоби грозозахисту не є достатньо надійними та ефективними. Вони потребують регулярної перевірки [9] і можуть стати причиною пошкодження напівпровідникових елементів, пробоїв ізоляції трансформаторів [4], пошкодження штепсельних плат реле тощо. Іноді спрацьовування вирівнювачів і розрядників може призвести до відмови кабелю живлення, плавлення монтажу або навіть загоряння релейних шаф, що погіршує ситуацію та збільшує тривалість відмов.

Досвід застосування захисних засобів від ПЗ, зокрема для захисту від грозових перенапруг на ВЛ, показує, що цей захист не може повністю задовольнити технічні вимоги [43, 44, 47] щодо роботи на повітряних лініях при впливі грозових розрядів.

1.4 Механізм впливу ПЗ на функціонування пристроїв автоматичної блокування (АБ)

Імпульсні перекриття, пошкодження ізоляторів та дугові замикання, як правило, виникають внаслідок дії ПЗ, зокрема через грозові перенапруження (ПН) на повітряних лініях (ПЛ). За статистикою, до 40% всіх аварійних відключень на ВЛ 6, 10 кВ обумовлені саме грозовими ПН. Як було зазначено раніше, виникнення ПЗ на ВЛ СЦБ безпосередньо пов'язане з апаратурою автоматичного блокування (АБ), що підкреслює актуальність проблеми грозозахисту, особливо в районах з високою грозовою активністю.

При розряді блискавки в об'єкт, струм викликає теплові, механічні та електромагнітні впливи. Струм блискавки призводить до нагрівання провідників до температури плавлення і навіть до їх випаровування. У зв'язку з цим, для апаратури автоматики, телемеханіки та зв'язку важливо вибирати перетин проводів, що виключає перегрів, чого на практиці часто не враховують.

ПЗ можуть потрапляти в апаратуру СЦБ через короткі замикання, комутаційні перенапруження в тяговій мережі або удари блискавки в контактну мережу. Одним із можливих випадків пошкодження ЗЗ струмами блискавок є ситуація, коли понижуючі трансформатори працюють у режимі короткого замикання через шунтування струмами блискавки. У такому випадку можливий кілька варіантів розвитку подій. Найбільш сприятливим є варіант, коли трансформатор автоматично відключається і повторно включається завдяки тепловому вимикачеві типу АВМ-1 (2), проте це може створювати загрозу електробезпеки. Це пов'язано з можливим утворенням контуру для короткого замикання через трансформатор типу ОМ та пробивний запобіжник ПП, який підключений до розрядника РВНШ-250. ПЗ проходить через заземлення опор і може потрапити в РЩ, створюючи смертельно небезпечні умови для обслуговуючого персоналу, особливо якщо опори заземлення високі.

імовірнісного нормативу та на їх основі визначати проектно-конструкторський норматив у вигляді Джоулевого інтегралу для межі теплової характеристики жили

кабелю $\int_0^{\infty} i^2 dt$ розмірністю A^2c .

Згідно з практичними даними, жила кабелю марки СПБУ діаметром 1 мм витримує струм 16,5 кА при тривалості імпульсу 210 мкс, що відповідає Джоулевому інтегралу 57200 A^2c , в той час як вибух жили відбувається при значенні 65050 A^2c . Пропонується встановити значення Джоулевого інтегралу як проектний норматив.

Розрядник має Джоулевий інтеграл 2500 A^2c , а варистор, який застосовується в приладах ВОЦШ-220, має теплову характеристику близько 2600 A^2c . Тому можна стверджувати, що наявні захисні засоби (ЗЗ), що використовуються на залізничному транспорті, не є ефективними, оскільки вони не забезпечують належного захисту пристроїв СЦБ.

Огляд вітчизняних та зарубіжних джерел показав, що найкращі теплові характеристики мають металооксидні варистори і металокерамічні розрядники (наприклад, Р63, Р76), що мають Джоулевий інтеграл порядку $60 \cdot 10^3 A^2c$.

Як було зазначено раніше, тональні рейкові кола (ТРК), що активно впроваджуються в Україні та країнах СНД, мають низький коефіцієнт повернення колійних приймачів (КПП), що значно знижує їх ефективність. Це обмежує максимальну довжину кола та можливість контролю основних режимів, що відповідають за безпеку руху поїздів. Більше того, напівпровідникова апаратура ТРК має слабкий захист від високих рівнів тягових струмів та грозових розрядів, оскільки існуючі пристрої захисту (ПЗС) не відповідають вимогам щодо граничної потужності гасіння енергії перешкод, особливо від грозових розрядів та коротких замикань (КЗ) контактної мережі.

Значною відмінністю перетворювачів ПЧ50:50 від ПЧ50:25 є відсутність постійної складової струму мережі, що негативно впливає на роботу силових трансформаторів постів централізації через підмагнічування та нагрів

магнітопроводів. Однак найбільшим недоліком цих пристроїв є наявність обмотки зворотного зв'язку, через яку потужна імпульсна завада може миттєво проникнути в вихідну контурну обмотку. Тому виникає необхідність розробки нового пристрою захисту апаратури від впливу грозових розрядів та комутаційних перенапружень, який не мав би зазначених недоліків.

Згідно з проведеним статистичним аналізом відмов елементів апаратури РК через вплив ПЗ, конструкційних особливостей апаратури систем АБ та електроживлення пристроїв автоматики, а також з урахуванням схеми проникнення ПЗ у вигляді грозового імпульсу, можна зробити висновок, що проблема захисту апаратури СЦБ від ПЗ, зокрема від грозових імпульсів, залишається невирішеною та є надзвичайно актуальною. Це особливо стосується грозоактивних гірських регіонів, де часті незаплановані ремонти та заміни обладнання призводять до значних економічних і трудових витрат. Виникає необхідність розробки заходів щодо захисту рейок від ПЗ, таких як комутаційні перенапруження та короткі замикання, а також захисту ВЛ СЦБ від грозових розрядів. Особливу увагу слід приділити гірським районам, де комутаційні перенапруження можуть виникати через великі підйоми, що потребують великих тягових струмів, а також враховуючи високий рівень грозової активності в горах. Це вимагає додаткового захисту апаратури РК. Тому необхідно: здійснити аналіз впливу високих рівнів тягових струмів асиметрії на апаратуру систем АБ, проаналізувати конструкцію засобу захисту апаратури РК від впливу ПЗ у вигляді грозових розрядів і блискавок від перенапруг, параметричного генератора частоти (ПЧ), провести експериментальні дослідження макетного зразка ПГ, а також провести оцінку підвищення надійності роботи системи АБ і провести економічний розрахунок ефективності впровадження ПГ на залізницях України.

2 ПРОБЛЕМА ЗАХИСТУ АПАРАТУРИ АВТОБЛОКУВАННЯ ВІД ВПЛИВУ ТЯГОВОГО СТРУМУ НА ДІЛЯНКАХ ЗАЛІЗНИЦЬ

На сьогоднішній день в Україні активно проводиться модернізація залізничного транспорту, що обумовлено розвитком економіки, збільшенням вантажообігу, ростом швидкостей і підвищенням пропускної здатності. Це створює необхідність у підвищених вимогах до безпеки руху. Модернізація є ключовим напрямом для забезпечення ефективного функціонування залізничного транспорту в цілому.

Проте, в деяких випадках на цьому шляху виникають труднощі, пов'язані з проблемами електромагнітної сумісності (ЕМС) пристроїв систем централізації та блокування (СЦБ) і зв'язку, особливо у взаємодії з пристроями тягового електропостачання на ділянках з крутим профілем.

Основною причиною нестабільності в забезпеченні ЕМС є наявність деяких дестабілізуючих чинників, зокрема, вплив перешкод, що виникають від грозових розрядів (ПІЗ). Як було зазначено раніше, такі розряди можуть потрапляти в системи СЦБ через електроживлення автоматичної блокувальної апаратури. Також ПІЗ у вигляді комутаційних перенапружень та коротких замикань у силових ланцюгах електровозів і тягових мережах можуть проникати до апаратури АБ через рейки. Особливо вразливими до впливу обох типів ПІЗ є гірські ділянки з крутим профілем, оскільки ці регіони характеризуються не лише підвищеною грозовою активністю, а й великими підйомами, що вимагають споживання високих рівнів тягових струмів. Це, в свою чергу, впливає на апаратуру СЦБ та безпеку руху поїздів.

Використання рейок для пропуску зворотного тягового струму вимагає забезпечення безвідмовної роботи залізничної автоматики. Основними факторами, які впливають на роботу рейкових кіл, є термічні, заважаючі, пошкоджуючі та параметричні. Рейкові кола є одними з найбільш уразливих елементів залізничної автоматики, хоча їхня надійна робота має критичне значення для забезпечення безперебійного перевезення вантажів і пасажирів.

На гірських ділянках з крутим профілем, таких як перевальні ділянки, робота рейкових кіл стає значно складнішою. Для забезпечення необхідного тягового зусилля для руху поїздів часто використовують кілька локомотивів, що, в свою чергу, призводить до споживання великих тягових струмів. Ці струми викликають термічний вплив на апаратуру системи автоматичного блокування (СЦБ) та на режими роботи рейкових кіл.

Вплив тягового струму на роботу рейкових кіл був вивчений ще в 70-х роках минулого століття, коли була розроблена методика розрахунку дросель-трансформаторів (ДТ). Однак ці розрахунки стосувалися застарілих трансформаторів, які на сьогоднішній день не застосовуються. Тому виникає потреба в дослідженні теплових режимів роботи нових ДТ, які зараз використовуються на залізниці, а також в оцінці впливу цих режимів на ефективність роботи системи.

Необхідно провести дослідження термічного впливу на елементи рейкових кіл, зокрема на дросель-трансформатори, дросельні перемички та стикові з'єднувачі, які мають високу електропровідність і термічну стійкість для забезпечення належної роботи системи.

Для прикладу було розглянуто перевальну ділянку Лавочне – Бескид – Скотарське в Карпатах, де на підйомі 30,4 % використовуються чотири локомотиви типу ВЛ-11. Під час проведення тягових розрахунків сила, необхідна для одного електровоза на розрахунковому підйомі, була визначена за відповідною формулою.

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

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 роликових підшипниках;

P – вага електровозу ВЛ-11.



Рисунок 2.1 - Перегін «Бескид - Скотарське»

В результаті тягового розрахунку [21] було визначено, що сила тяги одного електровоза становить $F_{\text{кел}} = 374200 \text{ Н}$, а величина тягових струмів досягає 7200 А . Це значення є дуже високим, оскільки на звичайних ділянках з електричною тягою постійного струму при нормальному режимі роботи РК такі струми не спостерігаються. Відтак, виникає питання термічного впливу на елементи РК, зокрема на дросельні перемички (ДП), стикові з'єднувачі (СЗ) та дросель-трансформатори (ДТ).

Основною функцією ДТ є пропуск зворотного тягового струму через ізолюючі стики та узгодження низькоомного опору рейкової лінії з високим опором живлячого та релейного кінців [4, 5]. На розглянутій ділянці встановлені ДТ типів ДТ-0,6-1000 на живлячому кінці та ДТ-0,2-1000 на релейному кінці. Ці трансформатори здатні пропускати струм до 1000 А по кожній з напівобмоток [8]. Приварні мідні стикові з'єднувачі можуть пропускати від 70 до 90% струму при ослабленні затяжки болтів, а максимальний струм, який може пройти через мідний стиковий з'єднувач при постійному струмі, становить 1100 А ; для сталевих з'єднувачів цей показник дорівнює 800 А . Для мідних та сталевих перемичок допустимі струми складають відповідно 1100 А та 1400 А .

У процесі руху електровоза струм розподіляється в обох напрямках, і, згідно з результатами тягових розрахунків, по кожній з рейок буде протікати максимальний

струм близько 1800 А. При наближенні до підстанції цей струм буде ще більшим. Порівнюючи ці значення з допустимими нормами струмів, можна стверджувати, що робота дросель-трансформаторів, дросельних перемичок та стикових з'єднувачів може бути порушена.

3 ВДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМИ ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ЧАСТОТИ ЯК ДЖЕРЕЛА ВТОРИННОГО ЖИВЛЕННЯ ТА ПРИСТРОЮ ЗАХИСТУ АПАРАТУРИ СЦБ ВІД ВПЛИВУ ПОТУЖНИХ ІМПУЛЬСНИХ ЗАВАД

Як зазначалося раніше, електронна апаратура систем ЗАТ перебуває у досить складній електромагнітній обстановці, адже на неї здійснюють вплив ПІЗ, 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 перегін 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 ПІЗ 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.

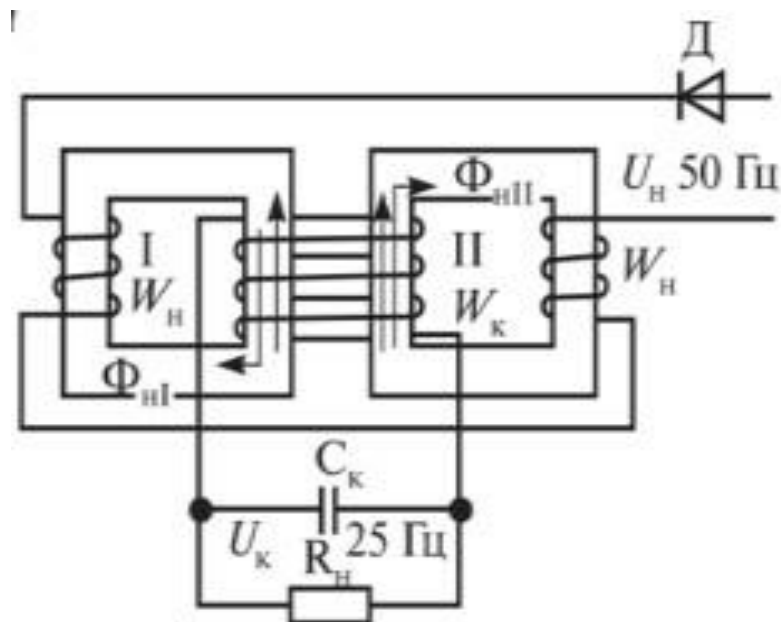


Рисунок 3.1 - Принципова схема ПЧ 50:25

Перетворювач частоти ПЧ50:25 використовується як джерело живлення для кодових рейкових кіл змінного струму частотою 25 Гц на перегонах з числовим кодовим автоблокуванням. Статичний електромагнітний перетворювач складається з двох основних блоків: електромагнітного та конденсаторного (рис. 3.1). Схема підключення представлена на рис. 3.2.

Електромагнітний блок включає два магнітопроводи, виготовлені з трансформаторної сталі, на яких розміщені три обмотки. Дві з них з'єднані послідовно та підключені до джерела живлення частотою 50 Гц через діод. Третя обмотка, резонансна, охоплює обидва магнітопроводи і з'єднана з конденсатором. Резонансний контур налаштований на частоту 25 Гц.

Принцип роботи базується на параметричному перетворенні частоти. Зміна параметрів контуру (індуктивності або ємності) з частотою, удвічі більшою за власну, викликає в ньому коливання із частотою, рівною половині. У цьому випадку індуктивність змінюється за рахунок підмагнічування сердечників постійною складовою магнітного потоку, створюваною котушками W_H завдяки однонапівперіодному випрямленню струму 50 Гц діодом.

Коливання підтримуються завдяки періодичній зміні індуктивності, що забезпечує їх незатухаючий характер у контурній обмотці W_K . Пряма передача струму в контур виключена завдяки зустрічному включенню обмоток W_H , що забезпечує взаємне компенсаційне спрямування магнітних потоків.

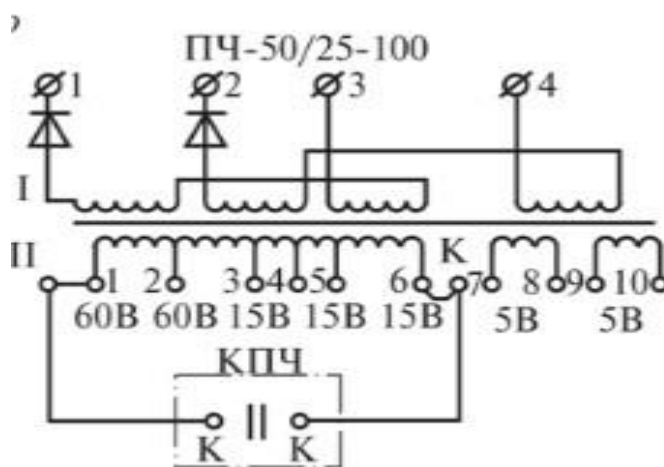


Рисунок 3.2 - Схема підключення ПЧ 50:25

Існують такі модифікації перетворювачів: ПЧ50/25-100УЗ, ПЧ50/25-150УЗ, ПЧ50/25-300УЗ. Числа у назвах (100, 150, 300) вказують на потужність пристрою у ВА.

- ПЧ50/25-100УЗ застосовується для живлення рейкових ланцюгів числового кодового автоблокування (ЧКАБ).

- ПЧ50/25-150УЗ використовується в станційних рейкових ланцюгах при електротязі змінного струму.

- ПЧ50/25-300УЗ живить станційні рейкові ланцюги з реле типу ДСШ-13 та ДСШ-13А.

Всі типи працюють від однофазної мережі змінного струму частотою 50 Гц при напрузі 220 або 110 В.

Переваги перетворювачів включають простоту конструкції, надійність, стабільність вихідних параметрів і захист від перевантажень (стійкість до коротких замикань). Серед недоліків: великі розміри, низький ККД (близько 40%) та однакове енергоспоживання як у режимі холостого ходу, так і під навантаженням.

На основі ПЧ 50:25 був розроблений ПЧ 50/50-300, який відрізняється від попередньої моделі відсутністю постійної складової струму мережі. Це має негативний вплив на роботу силових трансформаторів посту централізації, оскільки спричиняє підмагнічування та перегрів магнітопроводів. Однак головною особливістю та недоліком цього пристрою є наявність обмотки зворотного зв'язку, через яку ПІЗ може негайно потрапити в вихідну контурну обмотку.

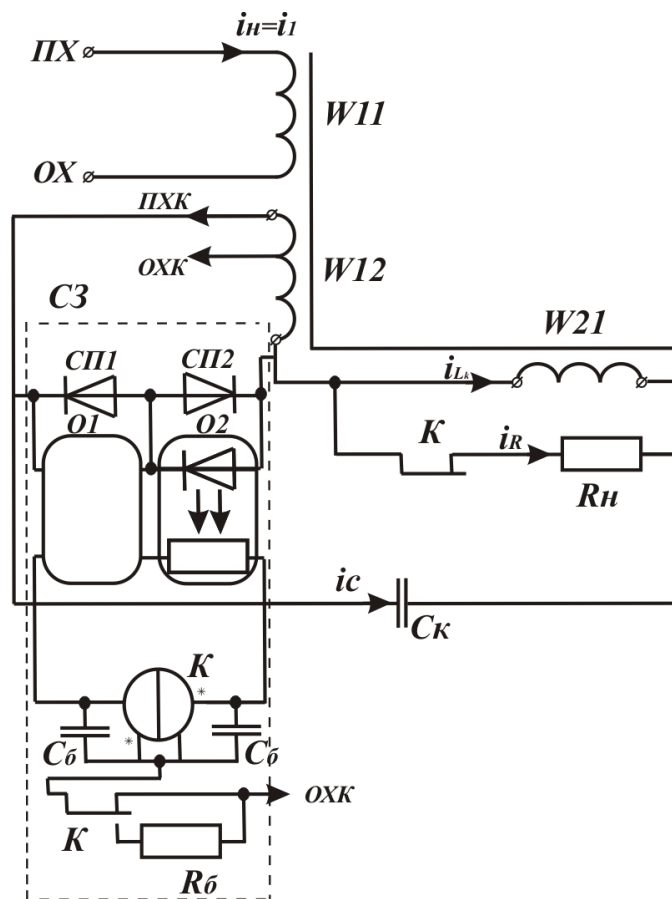


Рисунок 3.3 - Принципова схема ПЧ 50:50-300

Тому виникає потреба у створенні такого пристрою захисту апаратури від впливу грозових розрядів та комутаційних перенапружень, який би не мав вищезгаданих серйозних недоліків.

У параметричних генераторах електромагнітні коливання збуджуються через явище параметричного резонансу. Це явище в техніці відоме ще з 19 століття, коли французькі вчені Мельде і Релей досліджували його в механічних системах. Важливий внесок у розвиток теорії цих явищ зробили академіки Л. І. Мандельштам і Н. Д. Папалексі в 30-х роках минулого століття, вивчаючи параметричний резонанс та вплив коливань в електричних колах. У 1954 році параметричні генератори (параметрони) почали використовувати в обчислювальних машинах, а також розвивалися параметричні підсилювачі (ПП), які значно підвищили чутливість радіоприймальних пристроїв.

Структура пристроїв вторинного живлення (ВДЖ) електронних систем, незважаючи на використання більш надійних елементів, залишається схожою на попередні, хоча має зменшений обсяг та вагу. Однак, ці джерела живлення іноді мають недостатньо високу стабільність вихідної напруги, фільтрацію та захист від коротких замикань, блискавичних розрядів і комутаційних перешкод тягової мережі. Це призводить до того, що схеми захисту від перешкод ВДЖ не завжди відповідають тепловим вимогам, часто будуються за принципом 2...5-східчастих захистів на трансформаторних напівпровідниках, що ускладнює схему і знижує її надійність.

Параметричні генератори мають широке застосування в системах захисту електричних мереж, реле частоти, датчиках, джерелах імпульсів частотою 25 Гц, пристроях телевимірювання та зв'язку, а також у магнітних модуляторах і системах зсуву фаз у промисловій автоматизації. Вони можуть бути побудовані на магнітопроводах двох типів: з паралельними та неколінеарними полями. У паралельному полі складові векторів магнітної індукції складаються алгебраїчно в кожній точці, а в неколінеарному полі їх індукції утворюють геометричну суму.

3.1 Процес ініціювання параметричних коливань у генераторі

Як відомо, електричні коливання можуть бути збуджені в контурі, де енергетичний параметр (індуктивність або ємність) змінюється періодично. Параметричне наростання коливань відбувається, коли зміни в L (або C) призводять до збільшення енергії коливань, які спочатку виникають в контурі, через асиметрію магнітних характеристик осердь або завдяки незначним флуктуаціям земного магнетизму. Ці слабкі коливання струму створюють змінювану напругу на ємності контуру, що змінюється синусоїдально.

Припустимо, що індуктивність контуру, в якому працює дільник частоти, змінюється згідно з певним законом: коли струм в контурі досягає максимального значення ($i_k = \pm i_{\text{макс}}$), індуктивність швидко зменшується від значення L_2 до L_1 , а коли струм проходить через нуль, індуктивність повертається до початкового значення. Під час зменшення індуктивності (у моменти $t_0, t_2 \dots$) зовнішнє джерело енергії працює

проти сил магнітного поля, і енергія, що витрачається джерелом, дорівнює приросту електромагнітної енергії контуру. Якщо вважати, що магнітний потік залишається сталим при зміні індуктивності, збільшення енергії в контурі супроводжується стрибкоподібним зростанням струму на величину $\Delta i_1 = I_{kt} L \Delta \sigma L$.

Після того, як контур отримує приріст енергії, струм в індуктивності зменшується, а накопичена електромагнітна енергія переходить у електростатичну енергію конденсатора. Якщо індуктивність повертається до початкового значення через чверть періоду, то змінення індуктивності не викликає змін у запасі енергії, оскільки в ці моменти струм і електромагнітна енергія контуру дорівнюють нулю. При цьому зміна індуктивності не потребує витрат енергії. У наступній чверті періоду, коли через індуктивність проходить струм протилежного напрямку, знову зменшення індуктивності збільшує енергію в контурі на величину $\Delta A_2 > \Delta A_1$, оскільки струм контуром за першу половину періоду зріс на Δi_1 .

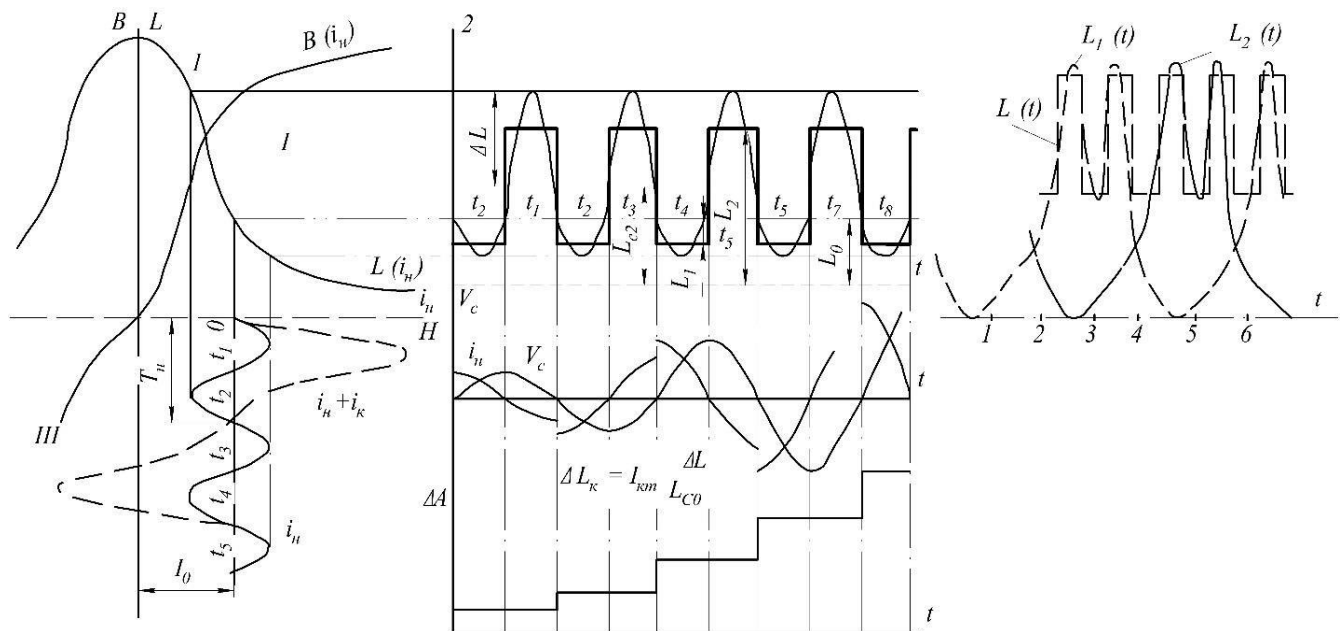


Рисунок 3.4 - Графіки зміни параметрів ПГ у процесі параметричного збудження

Конденсатор у коливальному контурі виконує функцію накопичувача енергії на етапах переходу електромагнітної енергії в електричну. Кожного півперіоду він віддає накопичену енергію індуктивності назад в контур. В кожному наступному циклі зміни

індуктивності в контур вноситься нова частина енергії, що призводить до збільшення струму в контурі та напруги на конденсаторі. Енергія, накопичена в контурі за час зміни струму, розсіюється на активному опорі. Таким чином, енергія контуру не буде зменшуватися, а струм не буде згасати, якщо виконується наступне співвідношення:

$$0,5(L_1 - L_2)I_{км}^2 \geq 0,5RI_{км}^2 T_H$$

$$m \geq \frac{R}{2L_{cp}} T_H \geq \delta T_H, \text{ глибину}$$

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

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

Отже, коливання в контурі з індуктивністю, що змінюється в описаний спосіб, не буде затухати, якщо глибина модуляції не менша за логарифмічний декремент загасання контуру. Таким чином, енергія в контурі накопичується завдяки періодичній зміні енергоємного параметра, що в реальному перетворювачі частоти здійснюється зовнішнім джерелом накачування. Під терміном "накачування" мається на увазі компенсація втрат енергії в системі завдяки роботі, що виконується при модуляції індуктивності джерелом накачування (енергія "накачується" в систему). У зв'язку з цим, замість терміну "напруга мережі" ми використовуватимемо поняття "струм накачки" та "напруга накачки".

Аналіз графіків зміни параметрів (рис. 3.4) дозволяє виділити такі основні характеристики параметричного збудження коливань:

1. Найефективнішим режимом є той, коли зміна параметра відбувається з частотою накачки, яка вдвічі більша за частоту збуджених коливань (рис. 3.4).
2. Важливими є фазові співвідношення між зміною індуктивності та струму. Якщо зміщувати моменти зміни індуктивності на Δt по часу або на $2\omega\Delta t$ по фазі, то зменшення індуктивності відбудеться, коли $i < I_{КТ}$, що призведе до зменшення енергії, що вноситься в контур; збільшення індуктивності відбудеться, коли $U \neq 0$, що спричинить витрату енергії. Якщо ж моменти зміни індуктивності зміщувати на Δt ,

індуктивність зменшуватиметься ($i \approx 0$) і збільшуватиметься ($iK = IKT$), при цьому енергія в контур взагалі не надходить, і її витрата буде максимальною. Така зміна індуктивності збільшить загасання контуру.

Приклад трансформації енергії в параметричному генераторі можна порівняти з розгойдуванням гойдалок. Нехай маса M , що розгойдується, знаходиться на відстані R від центру маси. При відхиленні маси від нижньої точки вертикалі потенціальна енергія буде дорівнювати $W_P = M \cdot \Delta h$.

У міру обертання гойдалок ця енергія переходить у кінетичну енергію, де

$$W_k = \frac{mV^2}{2} = \frac{J\omega^2}{2}, \text{ де } J = MR^2 \text{ момент інерції, } \omega = \frac{V}{R}, V - \text{ лінійна швидкість обертання маси.}$$

Припустимо, що до моменту досягнення вертикального положення розгойдувані гойдалки опускаються, при цьому радіус до центру маси збільшується на ΔR . Якщо частота ω залишається незмінною, то за цикл коливань швидкість проходження гойдалок через нижню точку збільшиться на величину $V_1 - 0 = \omega \Delta R$, а кінетична енергія зросте на $2 \cdot W_{\Delta K} = 2m\omega^2(R + \Delta R)$. З балансу енергій між кінетичною та потенційною енергією випливає, що з кожним циклом потенціальна енергія буде зростати, оскільки висота підйому маси збільшується. Таким чином, за кожен цикл коливань гойдалок в систему двічі вноситься енергія, причому в наступні цикли ця енергія і коливання зростають за експоненціальним законом. Цей процес називається параметричним збудженням коливань, при якому параметр (маса) здійснює коливання з частотою, що вдвічі менша за частоту зміни радіуса до центру маси.

Завдяки розташуванню обмоток під кутом 90° , змінний струм в обмотці накачки створює магнітний потік, який не перетинає контурну обмотку. Це виключає можливість трансформації струму накачування в контур дільника, навіть при частковому замиканні витків обмотки накачки. Це є важливим для запобігання неправильній роботі фазочутливого колійного реле. Принцип роботи цього генератора частоти також ґрунтується на явищі параметричного резонансу.

Отже, всі вищеописані властивості, особливості та характеристики будуть використані для розробки генератора, який може служити як джерело вторинного живлення, так і пристроєм захисту від грозових розрядів.

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

Параметричний генератор з ортогональними (колінеарними) полями є як дільником частоти з паралельними полями, так і значно нелінійним пристроєм, що має електричні властивості, які дозволяють ефективно застосовувати його для різних завдань. Він складається з магнітопроводу у формі прямокутного паралелепіпеда, в якому є чотири наскрізні вікна, розміщені на діагоналях його граней.

3.2 Вибір конструкції параметричного генератора та характеристик його компонентів

З впровадженням швидкісного руху на залізницях України виникає необхідність підвищення вимог до захисних пристроїв апаратури СЦБ. Комутаційні перенапруги, грозові розряди та блискавки створюють серйозні проблеми для роботи пристроїв ЗАТ, безперебійне функціонування яких є критично важливим для забезпечення безпеки руху залізничного транспорту. Відповідно, постала потреба у розробці пристрою захисту від ПІЗ, який би мав високий коефіцієнт корисної дії (ККД), стабільну вихідну напругу та повністю задовольняв теплові режими роботи пристроїв СЦБ. Таким пристроєм є параметричний генератор на неколінеарних магнітних полях, який можна використовувати як для живлення, так і для захисту навантаження від завад.

В основі цього пристрою лежить параметричний генератор, конструкційною особливістю якого є наявність зворотного зв'язку між вхідною обмоткою накачки та вихідною обмоткою контуру. Цей індуктивний параметричний генератор містить феромагнітне осердя з неколінеарними магнітними полями та три обмотки: вхідну, вихідну і зворотного зв'язку.

Як зазначалося раніше, наявність зворотного зв'язку у конструкції ПГ є суттєвим недоліком, оскільки через нього ПЗ може проникати у вихідну обмотку. Іншим важливим недоліком є недостатня стабільність вихідної напруги при підвищенні вхідної напруги. Тому, щоб усунути ці проблеми, було розроблено новий ПГ, основною метою якого є підвищення надійності, покращення енергетичних характеристик та стабільності вихідної напруги шляхом удосконалення схеми накачки. Це досягається спрощенням схеми вхідного кола і введенням конденсатора, ємність якого утворює резонансний контур з індуктивністю обмотки накачки. Також пропонується розділення обмотки накачки на дві секції з різною кількістю витків, з'єднаних зустрічно.

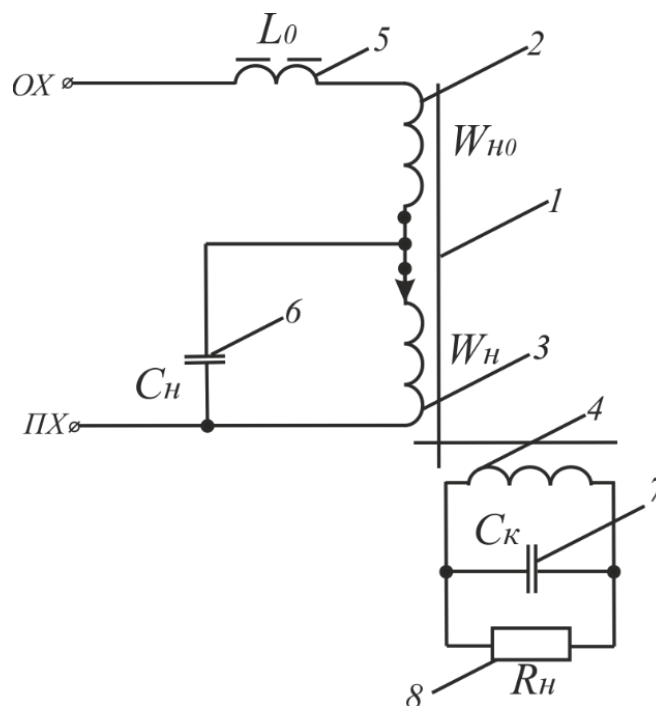


Рисунок 3.5 - Двоконтурний параметричний генератор для захисту навантаження від завад

Параметричний генератор (ПГ) складається з феромагнітного осердя 1, обмотки накачки, що включає секції $W_{n0} 2$ і $W_n 3$, контурної обмотки 4, лінійної індуктивності 5, яка підключена послідовно до секції $W_{n0} 2$ вхідної обмотки $W_n 2, 3$, а також конденсатора 6, паралельно підключеного до секції $W_n 3$ обмотки накачки. Вихідний контур містить конденсатор 7 та навантаження 8, які паралельно підключені до контурної обмотки W_k .

Принцип роботи цього пристрою базується на явищі параметричного резонансу. Коли вхідна напруга подається на коло накачки генератора, індукція в магнітному осерді впливає на нелінійну індуктивність контуру з частотою, яка вдвічі більша за частоту живлячої мережі. Коли струм 50 Гц проходить через контур, взаємодія з індуктивністю забезпечує передачу енергії від джерела живлення в контур.

Додавання вхідного LC-контуру, що складається з додаткового конденсатора та індуктивності обмотки накачки, дозволяє суттєво покращити енергетичні характеристики параметричного генератора. Також допомагає підключення двох секцій обмотки накачки W_n і W_{n0} , які увімкнені зустрічно. Одна з цих секцій (W_{n0}) разом з лінійною індуктивністю L_0 обмежує індукцію в обмотці накачки при зростанні напруги джерела живлення або при ферорезонансі струмів в LC-контурі.

Зі збільшенням напруги на обмотці накачки посилюється насичення сталі, що веде до зниження індуктивності обмотки накачки. При цьому реактивні опори конденсатора та індуктивності наближаються до межі ферорезонансу, що призводить до зростання струму в контурі і зниження струму в мережі живлення, що, у свою чергу, покращує коефіцієнт корисної дії генератора. З досліджень виявлено, що за певних параметрів ємності, кількості витків секції та лінійної індуктивності ферорезонанс струмів виникає лише при виході за межі певних рівнів напруги мережі. Введення LC-контуру в вхідне коло генератора дозволяє покращити його енергетичні характеристики, знижуючи струм на вході і підвищуючи струм всередині контуру.

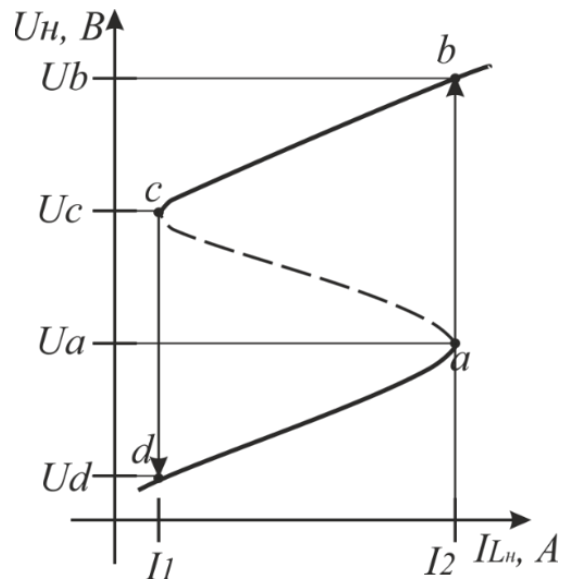


Рисунок 3.6 - Амплітудно-частотна вольт-амперна характеристика ферорезонансних струмів

Для побудови математичної моделі, яка описує роботу параметричного генератора (ПГ), необхідно визначити вихідні параметри схеми, що найбільш ефективно відображають характеристики ПГ та коефіцієнт корисної дії. Для цього слід розрахувати потужність навантаження, кількість витків обмоток накачки та контуру, ємність параметричного контуру та інші параметри. У будь-якому випадку ці розрахунки потребуватимуть подальшого уточнення за допомогою експериментальних досліджень.

Найбільш оптимальним для стабільної роботи ПГ і досягнення максимального коефіцієнта корисної дії є вибір лінійної індуктивності L_0 в межах від 0,3 до 0,5 Гн. У цьому випадку досягаються мінімальні значення струму в обмотці накачки та оптимальна вихідна потужність

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

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

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

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

Число витків обмотки накачки

$$W_n = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot b_n \cdot S \cdot 10^{-4}} = 350,$$

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:

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

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

Струм в обмотці контуру

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

У деякому діапазоні зміни індукції (напруги) в обмотці накачки W_n , у колі $(L_0 + L_{W_n}) - C_k$ 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

$E(\Sigma(U_L - U_C) + U_R)$, 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 $\alpha = 2,06 \frac{A}{м}$, $\beta = 4,8 \frac{1}{Тл}$. Ця формула має переваги. По ній будується залежність перетворювача. Далі методом вольтметра-амперметра будується ВАХ $E(I)$ обмотки, а по $E = 4,44 \cdot f \cdot b \cdot S \cdot W_n$ формулам (формула добре працює до B_s , за «другим» коліном) або $h = \alpha sh\beta b$ перевіряється точність побудови ВАХ $E(I)$ (рис. 3.7).

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 $E = 150 В$ проводим дотичну (лінія А рис. 3.4) до кривої U_L . Торкання відбулося в точці a ВАХ індуктивності кола при струмі $I_2 = 0,35 А$. Потім проводимо ВАХ ємності (лінія В) U_C , яка повинна пройти з початку координат паралельно дотичній.

Тангенс кута нахилу

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

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

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

Ферорезонанс напруг вивчається для визначення його впливу на початкову стадію генерації коливань, оскільки він спричиняє різке збільшення напруги U_L в колі накачки. Згодом, явище ферорезонансу напруг зникає, оскільки індуктивність $L_{обм}$ обмотки накачки зменшується, але виникає ферорезонанс струмів, який продовжує діяти в області стаціонарних коливань контуру. У даному випадку ферорезонанс напруг

сприяє швидшому запуску генерації через різке зростання напруги на L_n , що є його корисною властивістю. З іншого боку, ферорезонанс струмів продовжує працювати, забезпечуючи мінімальний вхідний струм, стабілізацію індукції щодо вхідної напруги і струму з мережі, а також підвищення коефіцієнта корисної дії.

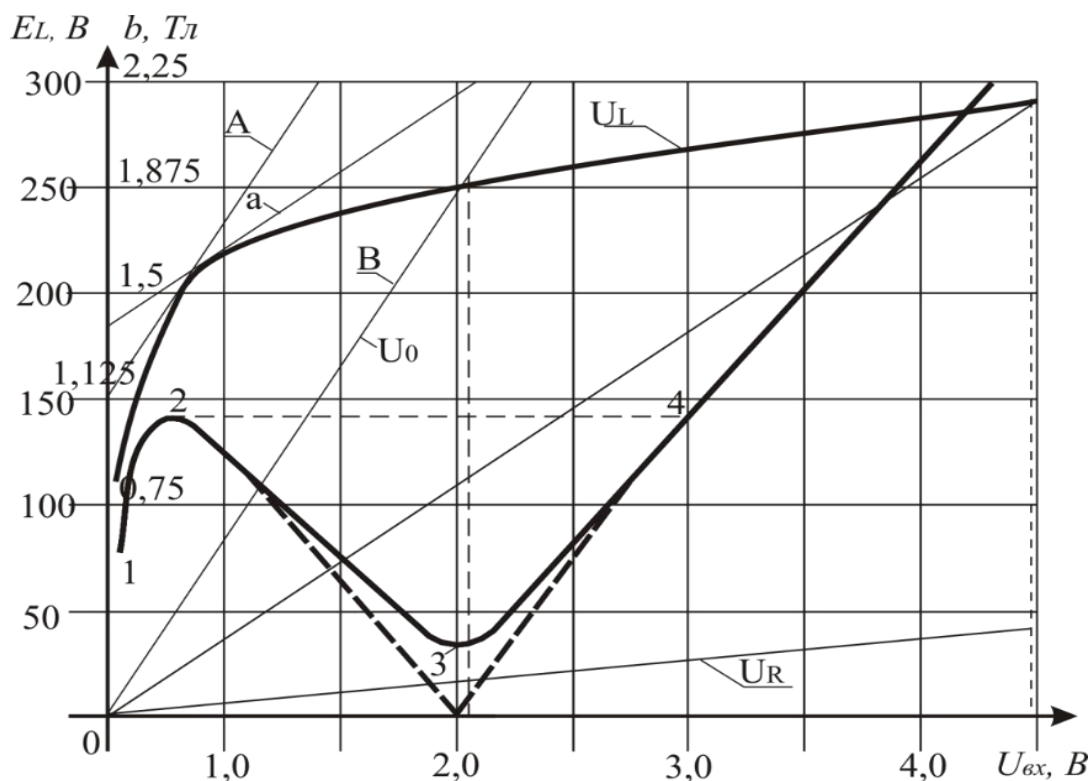


Рисунок 3.7 - Вольт-амперна характеристика паралельного резонансного кола. Оскільки при ферорезонансі напруг перша гармоніка струму збігається по фазі з напругою джерела ЕРС (це точка перетину прямої U_c і кривої U_L , як показано на рис. 3.7), явище ферорезонансу можна спостерігати, змінюючи напругу джерела живлення та параметри обмотки індуктивності-накачки або осердя магнітопроводу.

Таким чином, на основі проведених розрахунків були визначені конструктивні параметри ПГ, зокрема W_n , W_k , R_n , L_0 , C_n , які будуть використані при складанні математичної моделі та виготовленні макетного зразка для подальших досліджень

4 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МАКЕТНОГО ЗРАЗКУ ПАРАМЕТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРУ ЧАСТОТИ

4.1 Розробка експериментального зразка та схема для вивчення характеристик параметричного генератора частоти

Для виготовлення макетного зразка були використані попередньо приведені параметри. Однак вони потребуватимуть подальшого уточнення на основі експериментальних даних. Осердя ПГ виготовлене з електротехнічної сталі 2412, яка є холоднокатаною тонколистною ізотропною та має відмінні магнітні властивості [8].

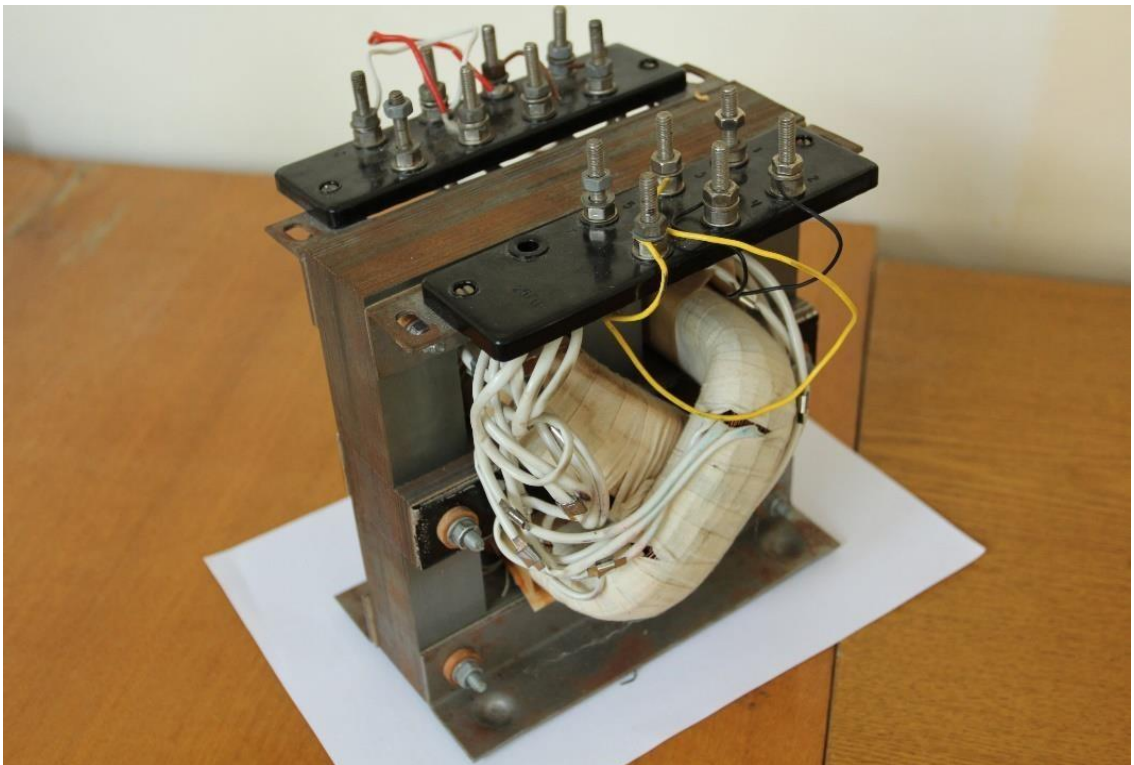


Рисунок 4.1 - Макетний зразок ПГ 50:50

Як показано на рис. 4.1, обмотки ПГ розташовані ортогонально, що забезпечує фазовий зсув 90° між вхідною та вихідною напругами. Дослідний зразок генератора, розроблений на неколінеарних магнітних полях та потужністю 150 Вт, має наступні характеристики: об'єм сталі магнітопроводу $V = 1,3 \times 10^{-6} \text{ м}^3$; середня довжина $l = 0,34 \text{ м}$; штамп сталі Ш-33-50-198; ємність кола накачки $C_H = 40 \text{ мкФ}$, ємність контуру $C_k =$

40 мкФ; кількість витків обмотки накачки $W_{H1} = 300$, $W_{H2} = 50$, кількість витків контурної обмотки $W_K = 300$ [6]. Також була зібрана схема, показана на рис. 4.2 [8, 9, 10].

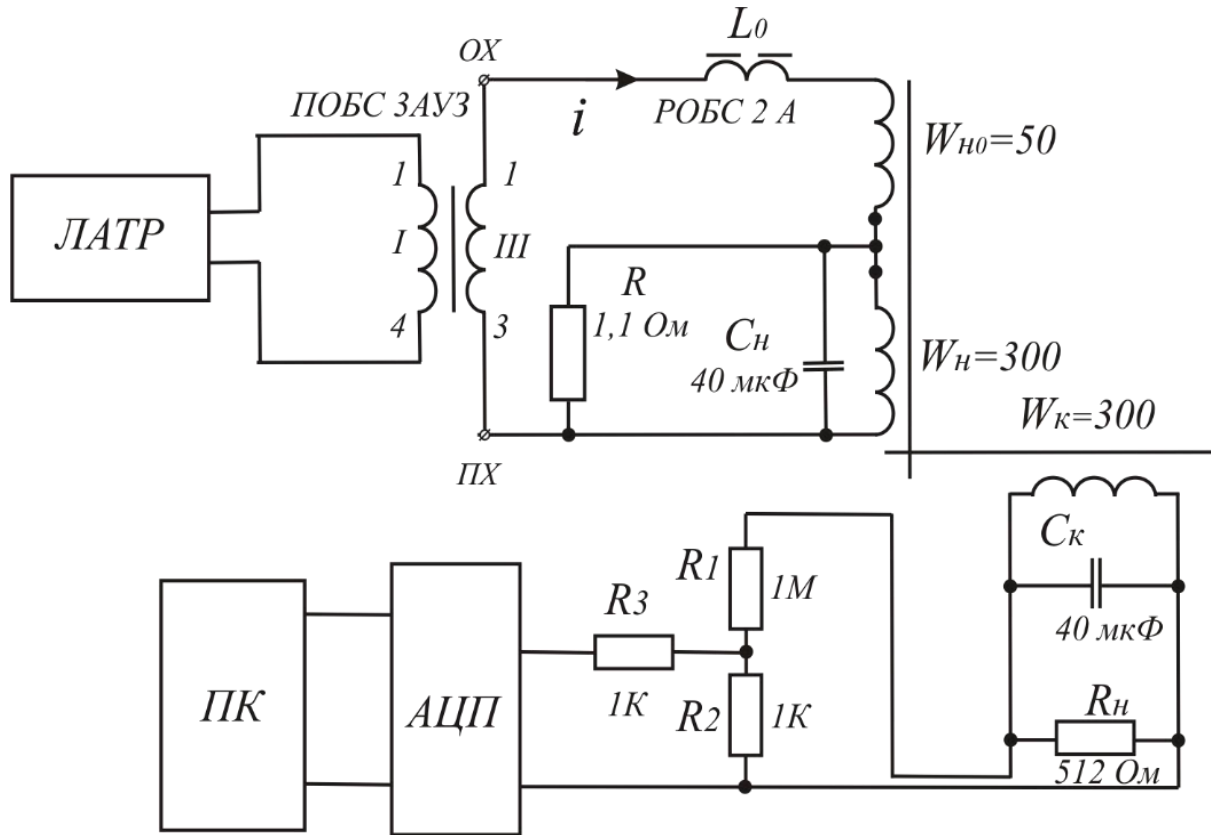


Рисунок 4.2 - Схема для дослідження характеристик параметричного генератора частоти

У результаті проведених експериментальних досліджень було встановлено, що для поліпшення енергетичних характеристик генератора (ККД η та вихідної потужності P) можна застосувати елементи, які створюють резонанси, що вводяться до вхідної схеми [8, 9]. Наприклад, елементи кола L_0 - C_n , підключені послідовно, можуть призвести до лінійного резонансу напруги; в паралельному колі L_n - C_n з нелінійною індуктивністю обмотки накачки можливий ферорезонанс струмів [13]. Вхідне коло генератора включає два резонансних контури, в яких можуть виникати як лінійний резонанс напруги, так і ферорезонанс струмів.

Було взято характеристики елементів вхідного кола, що забезпечують індукцію в обмотці накачки, створюючи умови для коливань у вихідному параметричному контурі

без перенасичення сталі магнітопроводу генератора. Виявилося, що необхідна ємність для цього при заданих параметрах генератора становить 30-40 мкФ, що відповідає струму в колі L_0 -Сн не більше 2,5 А. Варто зазначити, що це максимальна ємність, при якій проявляється ферорезонанс струму, що супроводжується стрибками струму [7]. Однак для практичної роботи генератора величина ємності була обрана меншою, оскільки режим повного резонансу струму небажаний через обмеження струму намагнічування обмотки накачки.

У схемі на рис. 4.2 елементи $(L_0 + L_{n0})$ -Сн, що підключені послідовно, створюють умови для виникнення лінійного резонансу напруги (де індуктивність L_{n0} менша за L_0). При резонансі напруги струм у колі збігається з фазою ЕРС. У такому випадку вхідний опір схеми є чисто активним, а струм на вході досягає максимального значення. Напруга на індуктивності обмотки накачки W_n досягне величини $U = I Q U_L$, де $Q = \omega_0 (L_0 + L_{n0})$ — добротність резонансного контуру; $U_{вх}$ — напруга джерела живлення; ω_0 — власна частота контуру, що може відрізнятись від частоти живлячої мережі до 40% [18]. Тому при обраних параметрах елементів вхідної схеми дослідного зразка резонанс напруги може розвиватися лише на 20-30% від максимальної добротності контуру.

4.2 Дослідження параметрів елементів схеми захисту вхідного кола генератора

Було проведено розрахунок оптимальних параметрів кола накачки та контуру ПГ, при яких забезпечуються необхідна потужність та найбільш ефективні енергетичні характеристики [17, 20]. Як було зазначено раніше, витки обмотки накачки підключені зустрічно. Залишається уточнити кількість зустрічно підключених витків і величину ємності накачки.

Спочатку експериментально перевіримо доцільність використання L_0 . Для цього була підключена схема, наведена на рис. 4.2. При повному виключенні L_0 з кола накачки генерація не починається навіть при вхідній напрузі 220 В. Це свідчить про те,

що наявність додаткової лінійної індуктивності L_0 має позитивний вплив на добротність вхідної схеми.

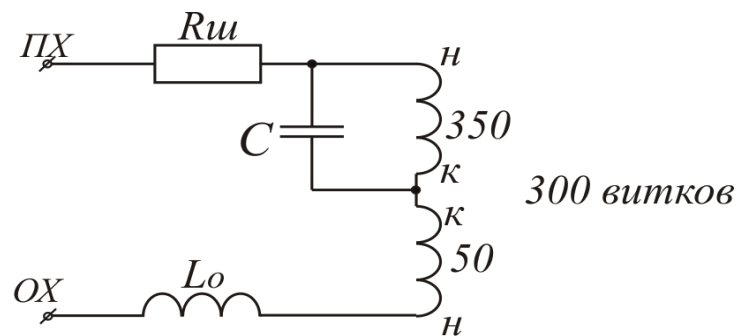


Рисунок 4.3 - Схема вхідного кола ПГ з зустрічним включенням витків обмотки накачки 350 та 50

Результати вимірювань зведені у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати експериментальних досліджень

U , мережі, B	U_n , B	U_k , B	i_R , A ш	$C_{нак}$, $мкФ$	C_k , $мкФ$	$R_{навант}$, $Ом$	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

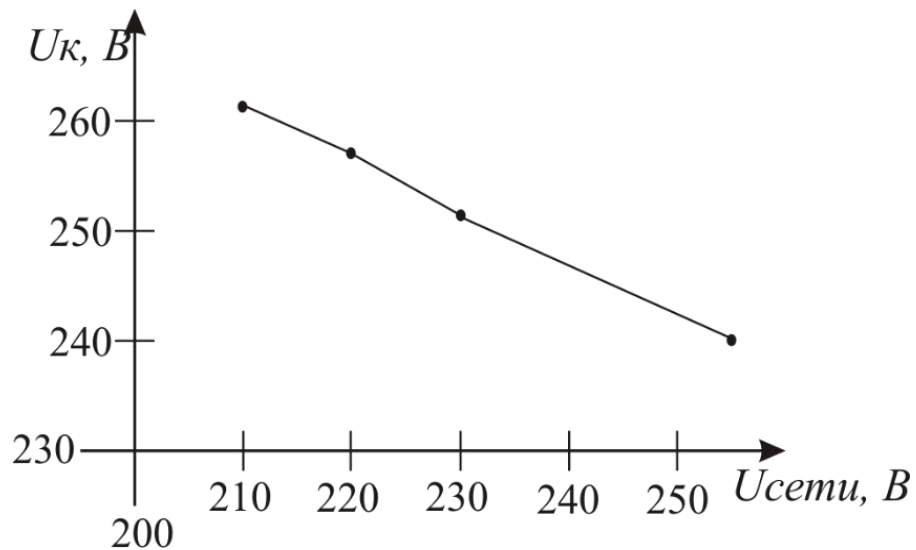


Рисунок 4.4 - Залежність вихідної напруги контуру від напруги живлячої мережі при $C_{\text{нак}} = 40 \text{ мкФ}$ та різних кількостях витків обмотки накачки (350 та 75 витків)

У ході експериментальних досліджень було протестовано багато варіантів підключення витків обмоток накачки (зустрічне, узгоджене) та різних значень ємностей. На основі отриманих даних були проведені розрахунки вихідної потужності та ККД. Результати досліджень показали, що оптимальним варіантом є схема з зустрічно увімкненими витками та кількістю витків: $W_{\text{н0}} = 50$ та $W_{\text{н}} = 350$, а також ємністю в колі накачки 40 мкФ (рис. 4.3).

Як видно з рис. 4.4, вихідна напруга залишалася стабільною, зниження її не перевищувало 8% , що є допустимим за вимогами ТУ. Для цієї схеми коефіцієнт корисної дії (ККД) становить $0,7$.

4.3 Дослідження вхідних та вихідних характеристик параметричного генератора частоти

За наведеною схемою було досліджено залежність вхідного струму від вхідної напруги при $L_0 = 0.26 \text{ Гн}$.

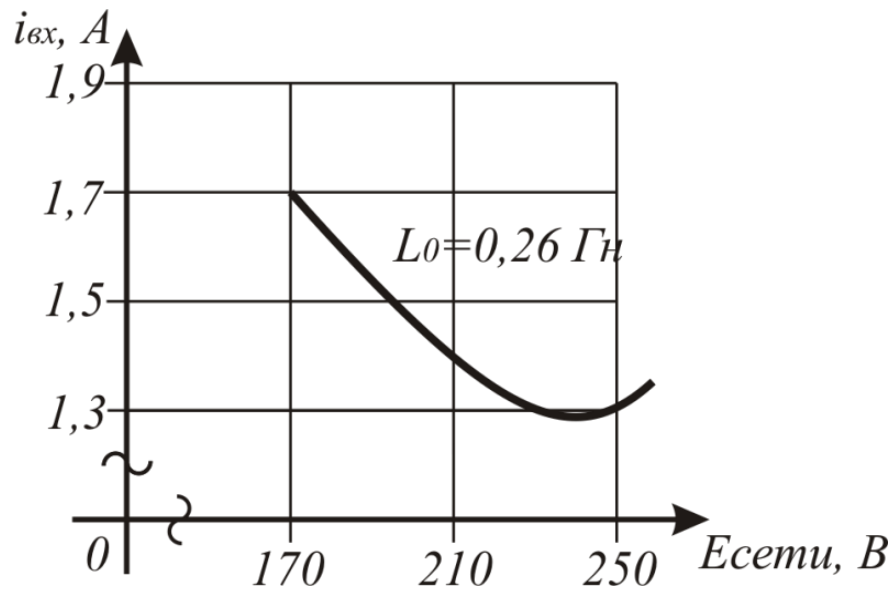


Рисунок 4.5 - Залежність вхідного струму від вхідної напруги

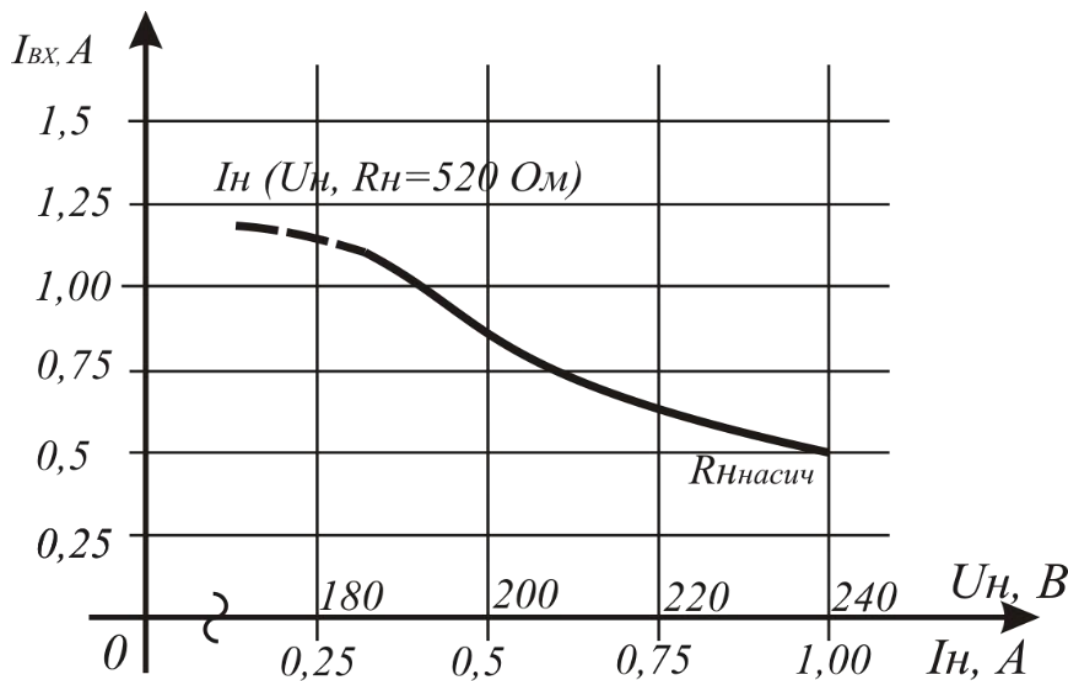


Рисунок 4.6 - Навантажувальна характеристика генератора ПГ 50:50-150 у режимі навантаження

З отриманої залежності видно, що зменшення вхідного струму спостерігається в діапазоні напруги мережі від 220 до 245 В. Зі збільшенням вхідної напруги спостерігається зниження струму мережі, що можна пояснити впливом ферорезонансу

паралельного контуру. При цьому коефіцієнт корисної дії (ККД) може досягати 0,75. Крім того, індуктивність сприяє стабілізації індукції в осерді магнітопроводу, що зменшує вхідний струм при зростанні напруги та струму на навантаженні, що суттєво покращує ККД, який перевищує 0,7.

Також наводимо зовнішню характеристику параметричного генератора, яка покращує форму вихідної напруги.

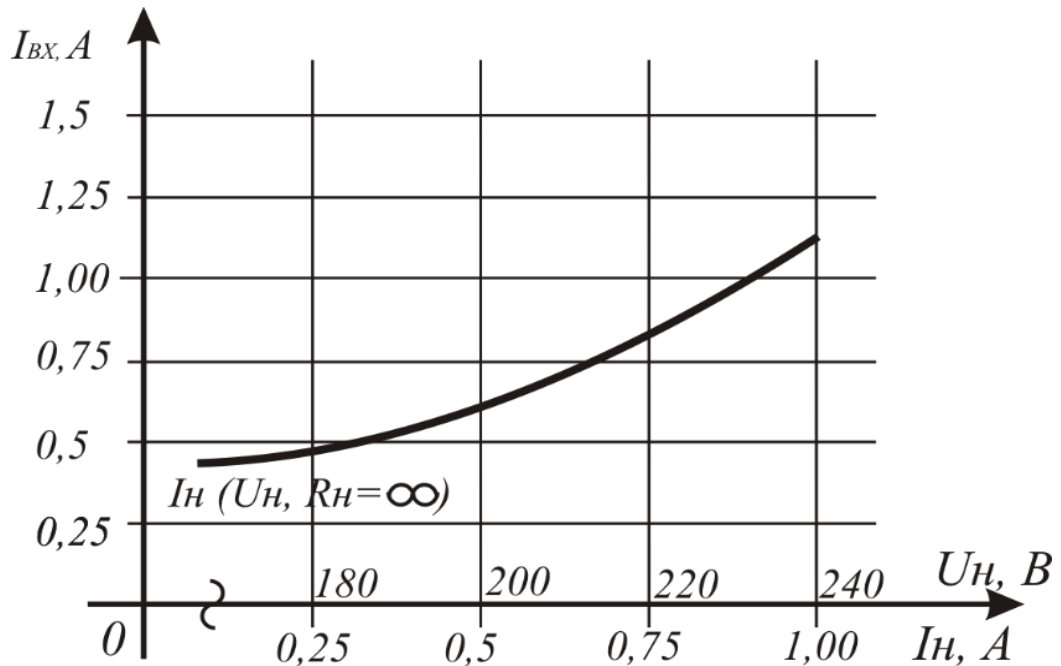


Рисунок 4.7 - Характеристика генератору ПГ 50:50-150 в режимі холостого ходу

До контурної обмотки паралельно ємності підключаємо навантаження, $U=180\text{ В}$, досліджуємо вхідний струм в обмотці накачки при різних значеннях gen напруги та струму навантаження [8].

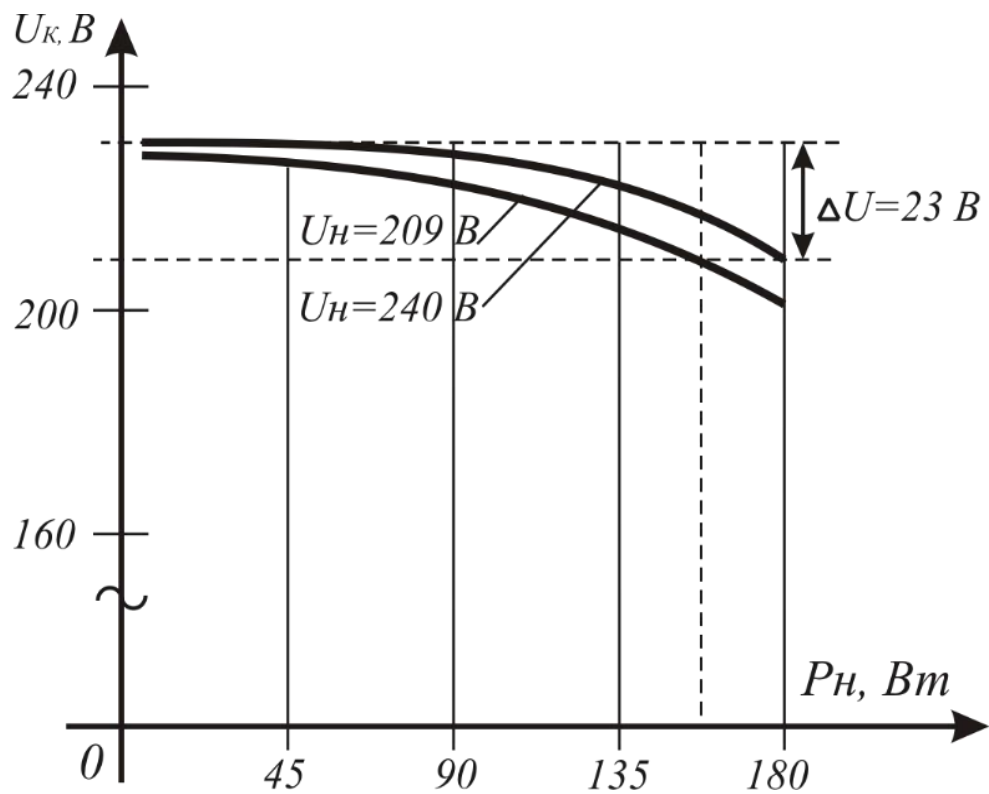


Рисунок 4.8 - Зовнішні характеристики генератора ПГ 50:50-150

Як показують результати, коефіцієнт зниження напруги в колі накачки U_n не перевищує 10% (рис. 4.8). На основі отриманих вимірювань можна зробити висновок про доцільність використання параметричного генератора як стабільного джерела живлення для апаратури в системах автоматики, телемеханіки та зв'язку.

ВИСНОВКИ

1. Досліджено роботу рейкових кіл (РК) при протіканні високих рівнів тягових струмів. Аналіз статистики відмов пристроїв СЦБ показав, що 13,36 % відмов систем АБ спричинені грозовими розрядами та комутаційними перенапругами, а на ділянках із крутим гірським профілем цей показник досягає 16 %. Огляд характеристик існуючих засобів захисту апаратури показав їхню недостатню термічну стійкість відповідно до вимог.

2. На основі досліджень макетного зразка параметричного генератора (ПГ) уточнено електричні параметри струмів і напруг у колах накачки та контуру. Побудовано залежності величини вихідної напруги контуру від напруги живлячої мережі, вхідного струму від вхідної напруги, побудована навантажувальна характеристика, характеристика генератору в режимі холостого ходу та зовнішня характеристика генератора на неколінеарних магнітних полях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бабаєв М. М. Аналіз впливу зовнішніх факторів на роботу рейкового кола / М. М. Бабаєв, А. А. Прилипко // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – 2007. – Вип. 80. – С. 102-113.
2. Бойнік А. Б. Системи інтервального регулювання рухом поїздів на перегонах / А. Б. Бойнік. – Харків : УкрГАЖТ, 2005. – 256 с.
3. Векслер Г. С. Подавлення електромагнітних перешкод у ланцюгах електроживлення / Г. С. Векслер, В. С. Недочетов, В. В. Пилинський. – Київ : Техніка, 1990. – С. 26-36.
4. 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.
5. Жуковицький І. В. Про вплив електрообладнання пасажирських вагонів на рейкові ланцюги пристроїв безпеки / І. В. Жуковицький, С. А. Разгонов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2005. № 5. – С. 112-113.
6. Задерей Г. П. Параметричний трансформатор з ортогональними полями / Г. П. Задерей, В. И. Пунтус // Електронна техніка. – 1972. – № 2. – С. 34-37.
7. Кадомська К. П. Аналіз струмових навантажень обмежувачів перенапруг, що встановлюються на опорах повітряних ліній / К. П. Кадомська, А. А. Рейхердт // Електрика – 2000. – № 1. – С. 2-6.
8. Кузнецов В. В. Розробка та перевірка адекватності динамічної електромагнітної моделі асинхронного двигуна, що працює в умовах неякісної електроенергії / В. В. Кузнецов, А. В. Николенко, В. П. Иващенко // Електротехника и компьютерные системы. – Одесса, 2014. – № 15(91). – С. 292301.
9. Кулик П. Д. Тональні рейкові ланцюги в системах ЖАТ: побудова, регулювання, обслуговування, пошук та усунення несправностей, підвищення

експлуатаційної надійності / П. Д. Кулик, Н. С. Івакин, А. А. Удовіков. – Київ : Вид. дім «Мануфактура», 2004. – 288 с.

10. Митропольський Ю. А. Метод усереднення в нелінійній механіці / Ю. А. Митропольський. – Київ : Наук. думка, 1971. – 440 с.

11. 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. Лебедев, 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

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

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

18. 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. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – С. 68.

19. Anderson R. B. Lightning parameters for engineering application / R. B. Anderson, A. J. Eriksson. – 1980. – Electra 69: 65-102.

20. Abetti P. A. Transformer Models for the determination of transient voltages / P. A. Abetti // Trans. AIEE. 1953. – № 72. – P. 468-480.

21. 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. 160169.