

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Удосконалення методу зниження високочастотних перенапруг для підвищення рівня енергетичної безпеки електричних мереж
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕА-ЕБ23мг-2
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Владислав ВОЙТОВИЧ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Костянтин БРОВКО
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Геннадій КАНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія

Кафедра електротехніки та електроенергетики

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

К.Т.Н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Владислав ВОЙТОВИЧ

1. Тема «Удосконалення методу зниження високочастотних перенапруг для підвищення рівня енергетичної безпеки електричних мереж»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Дані, щодо кількості технологічних порушень через «атмосферні перенапруги» на ПЛ та ПС 35-110 кВ; Дані, щодо причин технологічних порушень при атмосферних перенапругах.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

ВСТУП; РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПЕРЕНАПРУГ; РОЗДІЛ 2 НИЗКОВОЛЬТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ; ВИСНОВКИ; ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ;

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2024р.

Керівник _____ Костянтин БРОВКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Владислав ВОЙТОВИЧ
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка) _____
(підпис)

Владислав ВОЙТОВИЧ
(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль _____
(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – ____ ; рисунків – ____ ; таблиць – ____ ;

літературних джерел – ____ .

Повітряні лінії електропередач є найбільш уразливими до грозових впливів через їхню значну протяжність, особливо в регіонах з високим опором ґрунту. Такі умови підвищують складність та витрати на обслуговування електромереж через важкодоступність енергетичних об'єктів для ремонтних та профілактичних робіт.

Грозові удари по лініях можуть викликати небезпечні імпульси перенапруги, які становлять загрозу для ізоляції трансформаторів, спричиняючи раптовий стрибок напруги. В Україні найбільш поширеним методом захисту від таких перенапруг є використання нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН), особливо в мережах з напругою 110 кВ і вище. Ці пристрої допомагають знижувати амплітуди імпульсів, що набігають, забезпечуючи захист від грозових впливів.

Однак, ОПН мають певні недоліки: для ефективної роботи необхідна їхня установка на всіх фазних проводах і опорах, що ускладнює їхнє використання. Також ці пристрої можуть пропускати струми витoku при робочій напрузі, що призводить до можливого перегріву і виходу з ладу. ОПН не впливають на крутість фронту грозових перенапруг, а в деяких випадках можуть навіть підвищувати крутість хвилі, що набігає, створюючи додаткові ризики для трансформаторів.

Перспективним напрямком захисту від перенапруг є застосування частотнозалежних пристроїв (ЧЗП), які базуються на використанні композитних матеріалів. Вони здатні ефективно пригнічувати високочастотні перенапруги, залишаючись компактними та не залежачи від опору ґрунту. Однак для їхнього широкого застосування ще необхідно вирішити низку технічних питань, таких як оптимізація габаритів, забезпечення надійності контактів провідників та дослідження можливостей використання на підстанціях з іншими класами напруг.

Таким чином, дослідження і розробка частотнозалежних пристроїв є важливими для підвищення надійності захисту енергетичних мереж від грозових перенапруг, особливо в умовах високого опору ґрунту.

Об'єкт дослідження – процес заглушування високочастотних перенапруг.

Предмет дослідження – спосіб заглушування високочастотних перенапряжень за допомогою частотнозалежного пристрої.

ABSTRACT

Pages of text – ____ ; pictures – ____ ; tables – ____ ;
literary sources – ____ .

Overhead power lines are the most vulnerable to lightning effects due to their considerable length, especially in regions with high ground resistance. Such conditions increase the complexity and costs of power grid maintenance due to the difficult accessibility of energy facilities for repair and preventive works.

Lightning strikes on lines can cause dangerous surge impulses that threaten the insulation of transformers by causing a sudden surge in voltage. In Ukraine, the most common method of protection against such surges is the use of non-linear surge protectors (SPDs), especially in networks with a voltage of 110 kV and above. These devices help to reduce the amplitudes of incoming impulses, providing protection against lightning effects.

However, OPDs have certain disadvantages: for effective operation, their installation on all phase wires and resistances is necessary, which complicates their use. Also, these devices can pass leakage currents at operating voltage, which leads to possible overheating and failure. Surge arresters do not affect the steepness of the lightning surge front, and in some cases can even increase the steepness of the oncoming wave, creating additional risks for transformers.

A promising direction of protection against overvoltages is the use of frequency-dependent devices (FDs), which are based on the use of composite materials. They are capable of effectively suppressing high-frequency overvoltages, remaining compact and independent of soil resistance. However, for their widespread use, it is still necessary to solve a number of technical issues, such as optimizing dimensions, ensuring the reliability of conductor contacts, and researching the possibilities of use at substations with other voltage classes.

Thus, the research and development of frequency-dependent devices is important for increasing the reliability of protection of power networks against lightning surges, especially in conditions of high soil resistance.

The object of research is the process of suppressing high-frequency overvoltages.

The subject of research is a method of suppressing high-frequency overvoltages with the help of a frequency-dependent device.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	
ВСТУП.....	
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПЕРЕНАПРУГ.....	
1.1 Вплив грозових перенапруг на об'єкти електроенергетики	
1.2 Аналіз аварійності у мережах	
1.3 Типи грозових перенапруг	
1.4 Вплив високочастотних комутаційних перенапруг	
1.5 Захист від перенапруг.....	
1.5.1 Класичні засоби захисту.....	
1.5.2 Розроблювані, перспективні та інноваційні засоби захисту від високочастотних перенапруг.....	
1.5.3 Застосування скін-ефекту у захисті від високочастотних перенапруг.....	
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	
РОЗДІЛ 2. НИЗКОВОЛЬТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	
2.1 Випробування на змінній напрузі	
2.1.1 Експериментальна установка та методика вимірювань.....	
2.1.2 Експерименти зі зміною конфігурації провідників.....	
2.1.3 Експерименти з круглим та плоским багат шаровим зразком..	
2.1.4 Експерименти із зміною числа шарів провідника.....	
2.1.5 Розрахунок впливу параметрів «Товщина/ширина провідника/кількість шарів провідника».....	
2.1.6 Експерименти з різною орієнтацією провідника у макеті.....	
2.2 Випробування на імпульсній напрузі.....	
2.2.1 Експериментальна установка.....	
2.2.2 Методика вимірювання.....	
2.2.3 Результати вимірювань.....	

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	
ВИСНОВКИ.....	
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕЕ – електрична енергія;

ЕП – електропередача;

ЛЕП – лінія електропередачі;

ПС – підстанція;

ТМО – територіальна мережева організація

ПЛ – повітряна лінія;

ТП – трансформаторна підстанція;

СК – синхронний компенсатор;

ТН – трансформатор напруги;

ПКРП – пристрої компенсації реактивної потужності;

ППВЧ – пристрої приєднання високочастотного зв'язку;

ІДЧП – інтегральний дисконтований чистий прибуток.

ВСТУП

Актуальність. Повітряні лінії електропередач є найчастішим об'єктом грозових впливів через свою протяжність, особливо в районах з високим опором ґрунту. У цих районах істотним фактором, що підвищує витрати на обслуговування електроустаткування, є важкодоступність об'єктів енергетики для здійснення ремонтних та профілактичних робіт на повітряних лініях [1]. Залежно від місця удару блискавки можуть утворюватися зрізані імпульси та імпульси зворотного перекриття, що мають велику крутість, які становлять найбільшу небезпеку для поздовжньої ізоляції трансформаторів за рахунок миттєвого стрибка напруги на витках обмоток [2]. В Україні її найбільш поширеним методом захисту підстанцій від грозових перенапруг є застосування нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН) [3]. ОПН встановлюються в основному в мережах 110 кВ і вище дозволяють обмежувати амплітуди імпульсів, що набігають, і забезпечувати захист від перенапруг [4 – 6]. Однак ОПН мають ряд істотних недоліків. В першу чергу, ефективна робота ОПН забезпечується лише при встановленні одночасно на всіх фазних проводах ланцюга, що захищається на кожній опорі ділянки траси, що захищається [7, 8] і за наявності відповідних параметрів заземлення [9]. Відсутність іскрових проміжків зумовлює протікання через ОПН витоку під дією робочої напруги частотою 50 Гц. При великих значеннях цих струмів може статися перегрів варистора і вихід ОПН з ладу. Найважливіше, це те, що ОПН не можуть вплинути на крутість фронту грозових перенапруг, що впливають. Причому в деяких випадках спрацювання ОПН може спричинити підвищення крутості хвилі, що набігає, за рахунок перетворення хвилі на хвилю з крутим фронтом [10]. Таким чином, якщо, наприклад, розглядати силові трансформатори, то ОПН знижують рівень грозових перенапруг, що впливають на головну ізоляцію (між обмоткою високої напруги та заземленим баком), але не знижують градієнтні перенапруги, що впливають на поздовжню ізоляцію (між

витками). При цьому ситуація багаторазово погіршується в умовах низького опору ґрунту, за яких стандартні за правилами влаштування електроустановок (ПУЕ) заходи захисту вже не ефективні і не перекривають недоліків ОПН [11]. Найбільш перспективним з погляду простоти експлуатації та застосування бачиться використання захисних пристроїв заснованих на застосуванні композитних матеріалів (провідник-діелектрик, провідник-феромагнетик тощо) [12 – 17]. За рахунок роботи аномального скін-ефекту ці частотнозалежні пристрої можуть ефективно пригнічувати високочастотні перенапруги, при цьому бути досить компактними і їх параметри, а також ефективність роботи не залежать від опору ґрунту. Незважаючи на високу ефективність цих пристроїв, слід відзначити і ряд моментів, які вимагають свого рішення для виходу в широку експлуатацію цих пристроїв: невисокий омичний опір на високих частотах, великі габарити пристрою, не досліджено можливості застосування на підстанціях інших класів напруг (наприклад 35 кВ), немає інформації про оптимальні габарити пристроїв для забезпечення максимальних експлуатаційних параметрів (для пристроїв для ПЛ 35 кВ), відкрито питання щодо забезпечення надійності багаторазових контактів провідників. Отже, дослідження частотнозалежних пристроїв (ЧЗП), створені задля вирішення зазначених проблем, є актуальними.

Об'єкт дослідження – процес заглушування високочастотних перенапруг.

Предмет дослідження – спосіб заглушування високочастотних перенапруг за допомогою частотнозалежного пристрої.

Мета роботи: підвищення ефективності заглушення високочастотних перенапруг пристроями ОПН на основі скін-ефекту для захисту підстанцій 35 – 110 кВ.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз небезпеки грозових впливів для обладнання підстанцій та способів підвищення ефективності скін-ефекту.

2. Провести низьковольтні випробування макетів частотнозалежного пристрою для оцінки зростання опору зі зростанням частоти.

3. Виконати розрахунки та експерименти щодо зміни конструкції частотнозалежного пристрою, та оцінку можливості управління індуктивністю частотнозалежного пристрою.

Методи дослідження.

Вирішення поставлених завдань здійснювалося на основі теоретичного та експериментального методів дослідження.

Теоретичний метод включає: аналіз існуючих методів захисту від високочастотних перенапруг; оцінка впливу форми провідника на скін-ефект, аналіз даних щодо ефективності використання ЧЗП, комп'ютерне моделювання ЧЗП при подавленні високочастотних імпульсів.

Експериментальний метод включає: вимірювання частотних залежностей параметрів макетів ЧЗП на змінній та імпульсній напрузі; розробку конструкції макетів ЧЗП; проведення сильноточних вимірів макетів ЧЗП.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПЕРЕНАПРУГ

1.1 Вплив грозових перенапруг на об'єкти електроенергетики

Повітряні лінії, з усіх об'єктів електроенергетики, мають найбільшу довжину, у зв'язку з чим вони найбільш схильні до ударів блискавок. При цьому велика довжина повітряних ліній накладає труднощі на забезпечення надійної грозостійкості повітряних ліній. Особливо актуально для регіонів з високим опором ґрунту. У цих районах крім великої довжини та високого опору ґрунту, також є фактор важкодоступності для здійснення ремонтних та профілактичних робіт на повітряних лініях, який збільшує затримку відновлення подачі електроенергії, спричинену неполадками на повітряних лініях (ПЛ) та підстанціях (ПС) [1]. На це накладається тривалий термін експлуатації існуючих повітряних ліній, що становить щонайменше 30 – 50 років, що ще більшою мірою знижує ефективність засобів захисту. Удари блискавок супроводжуються утворенням та приходом на підстанції грозових хвиль. Проведені дослідження показують, що перенапруги можуть бути однією з причин ранкових відключень ПЛ. Передбачається, що перенапруги викликають перекриття забрудненої або зволоженої ізоляції лінії, і при цьому не фіксуються реєструвальною та вимірювальною апаратурою, через високу частоту і коротку тривалість сигналу [18]. Можна також відзначити і актуальність розвитку грозозахисту для сонячних та вітрових електростанцій. Наразі триває активний перехід та розвиток технологій використання відновлюваних джерел енергії. При цьому специфіка застосування сонячних електростанцій така, що потрібні великі площі, які займають сонячні панелі. Це, у свою чергу, підвищує ймовірність влучення блискавок у панелі. При цьому використовуються такі станції часто на відстані від розвиненої інфраструктури, ці фактори значно ускладнюють заходи щодо ремонту,

заміни складових, а також підвищують значущість безперебійного живлення [19].

1.2 Аналіз аварійності у мережах

Актуальність проблеми захисту від грозових впливів підтверджується великою кількістю вимкнень та пошкоджень обладнання під дією грозових перенапруг. Як приклад представлені дані щодо технологічних порушень та пошкоджень, отриманих від енергомереж. Так, наприклад, за даними Харківобленерго за 2014-2020 роки (рисунок 1.1), видно велику кількість різних технологічних порушень через «атмосферні перенапруги» на повітряних лініях та підстанціях (ПС) 35-110 кВ.

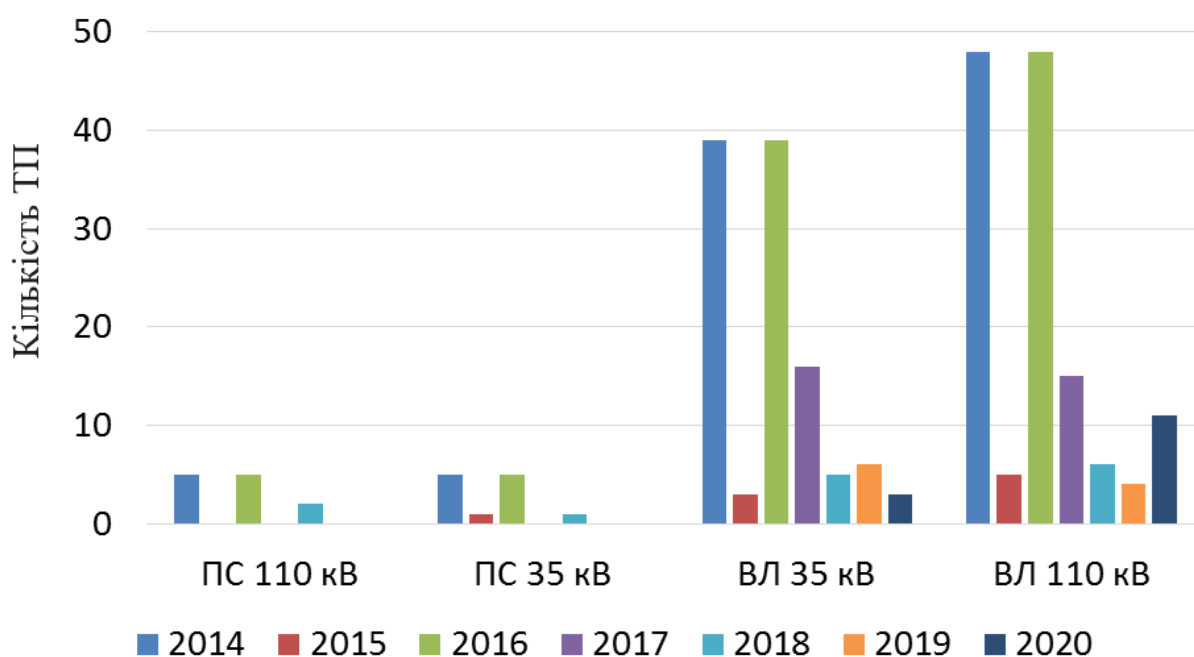


Рисунок 1.1 – Кількість технологічних порушень через «атмосферні перенапруги» на ПЛ та ПС 35-110 кВ за 2014 – 2020 р.

На рис. 1.2 та рис. 1.3 показано основні причини технологічних порушень (ТП при атмосферних перенапругах за 2014-2020 роки). Через велику кількість поодиноких та рідкісних порушень на рис. 1.4 для

повітряних ліній (ПЛ) 35 – 110 кВ показані лише причини, що повторюються протягом мінімум 3 років, або які були виявлені більше 3 разів.

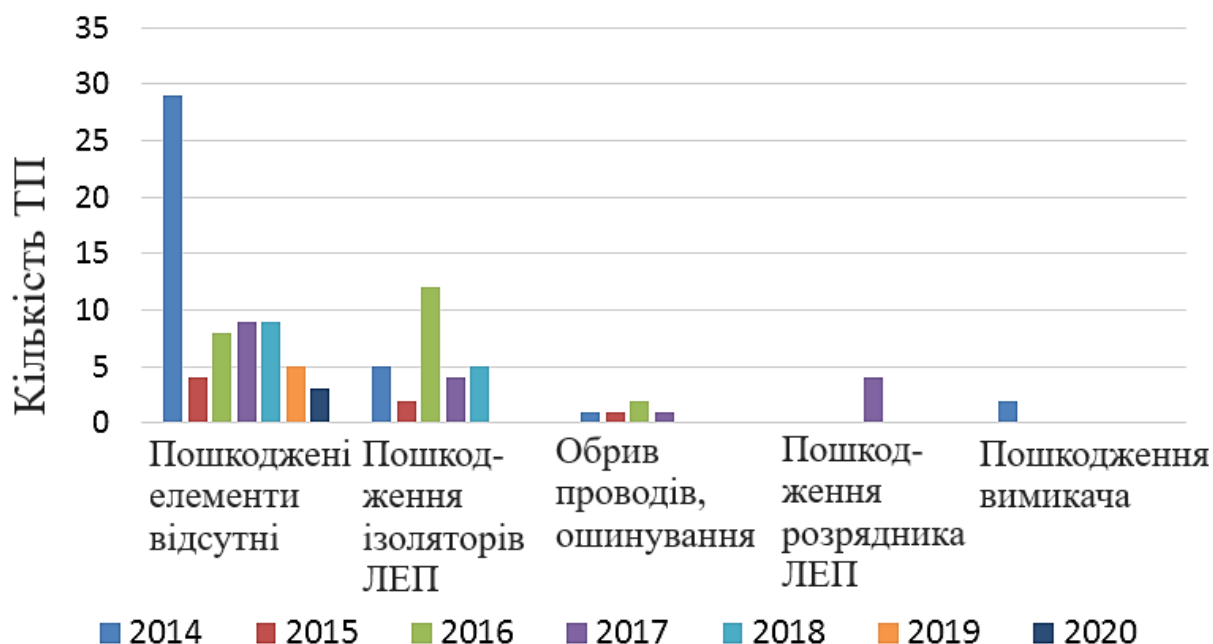


Рисунок 1.2 – Причини технологічних порушень при атмосферних перенапругах на ПЛ 35 кВ

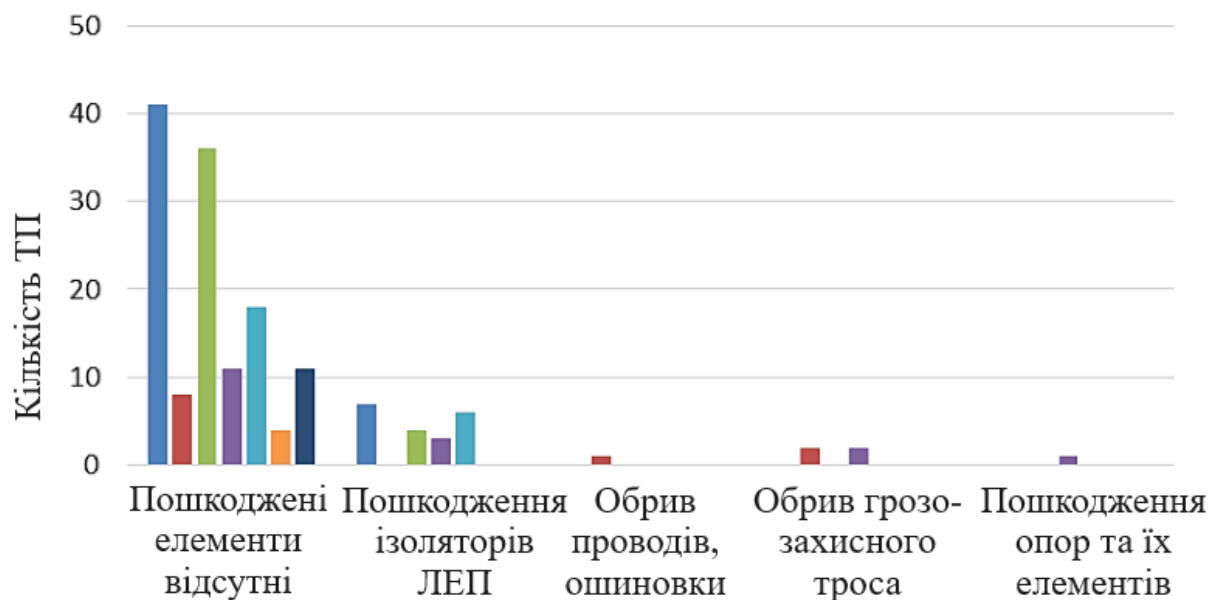


Рисунок 1.3 – Причини технологічних порушень при атмосферних перенапругах на ПЛ 110 кВ

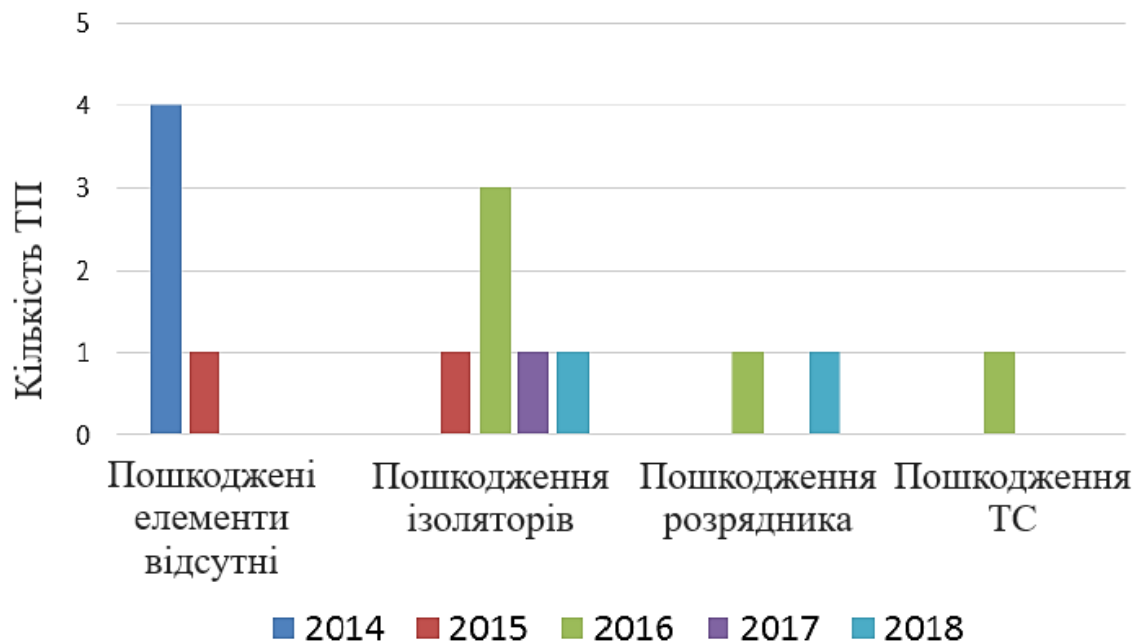


Рисунок 1.4 – Причини технологічних порушень при атмосферних перенапругах на ПС 35-110 кВ

Видно, що атмосферні перенапруги спричиняють різні види ушкоджень. Слід зазначити, що відсутність виявлених пошкоджених елементів не означає, що вплив пройшов без сліду, оскільки можливі різні дрібні дефекти і порушення, наприклад, замикання декількох витків трансформатора, які не призводять відразу до руйнування, але мають накопичувальний ефект і можуть проявити себе в ході подальшої експлуатації. Слід зазначити малу вивченість ефектів, які надають високочастотні перенапруги малої амплітуди на міжвиткову ізоляцію трансформаторів. Це пов'язано, у тому числі і зі складністю виявлення ушкоджуваності витків та їхньої ізоляції.

Схожа картина спостерігається і в магістральних електричних мережах (МЕМ). На рис. 1.5 показані причини пошкоджень повітряних ліній 10 – 110 кВ за період 2014-2020 рік. На рисунку представлена інформація лише з причин, виявлених більше 10 разів за 7 років контролю.

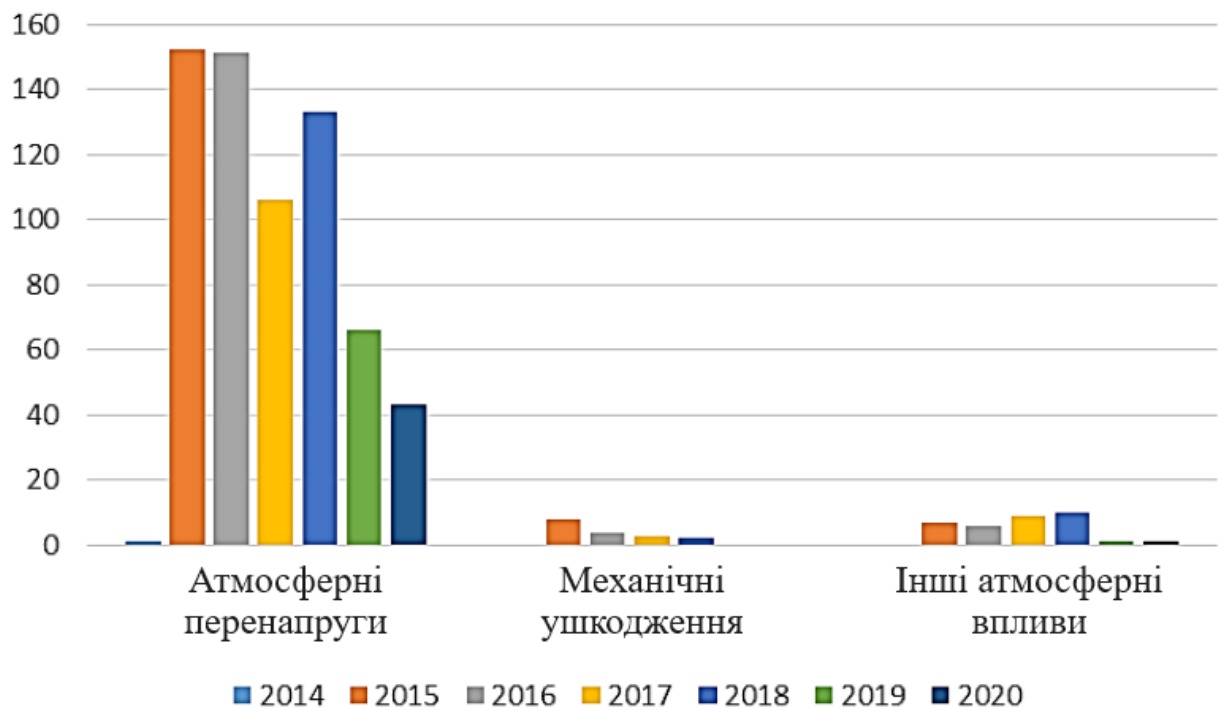


Рисунок 1.5 – Основні причини ушкоджень ПЛ 10-110 кВ, за 2014-2020 роки

На рис. 1.6 показані причини ушкоджень розрядників 10 – 110 кВ за період 2014-2020 рік.

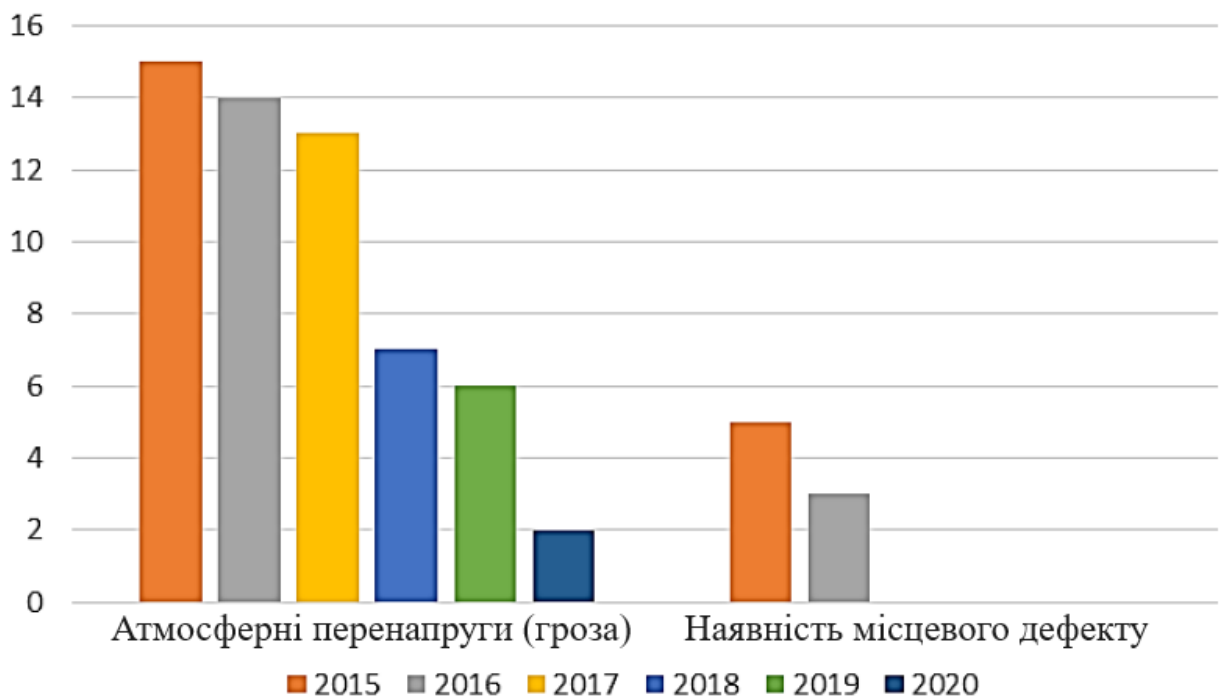


Рисунок 1.6 – Основні причини пошкоджень розрядників 10-110 кВ за 2014-2020 роки

На рис. 1.7 наведено розподіл кількості відмов силових трансформаторів та автотрансформаторів з різних причин за 2014-2020 роки загальну кількість відмов 36 разів.

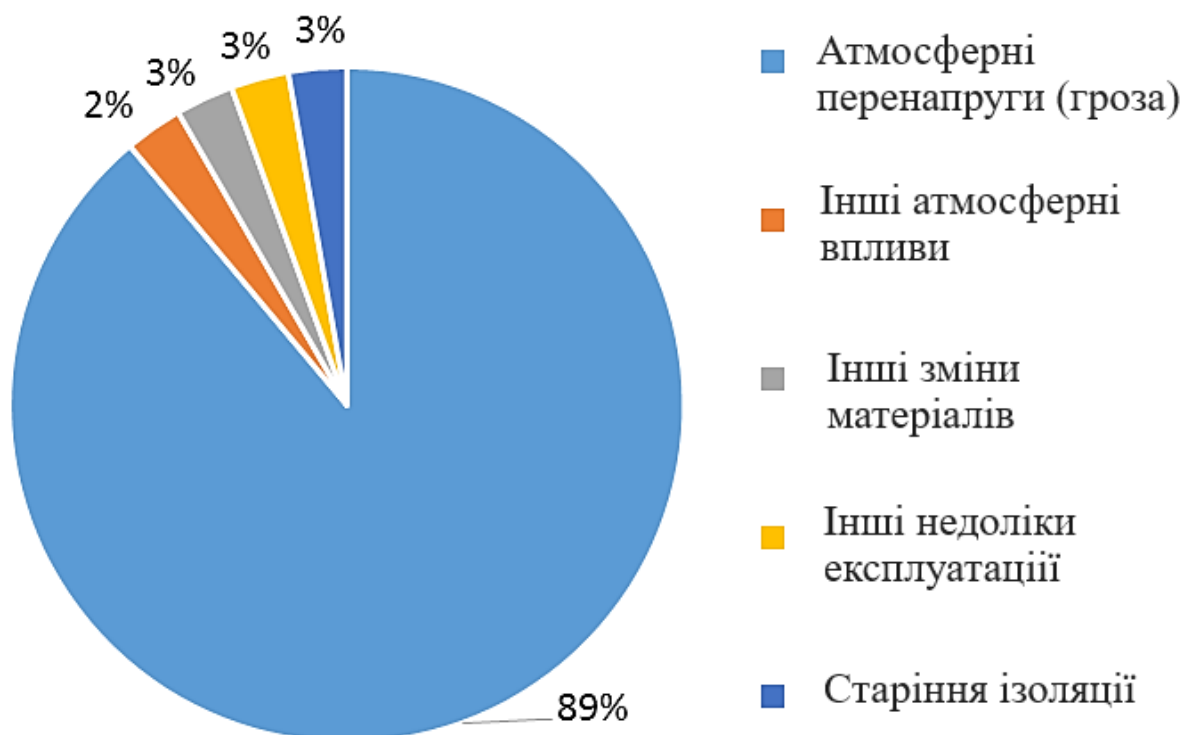


Рисунок 1.7 – Основні причини пошкоджень силових трансформаторів та автотрансформаторів у мережах 6-110 кВ за 2014-2020 роки

На представлених рисунках показано лише основне обладнання, що ушкоджується грозовими впливами. Загалом, в енергомережах за 2014-2020 роки було зафіксовано понад 965 випадків виходу з ладу обладнання через «атмосферну перенапругу (гроза)» з 2018 року, що становить майже 95 % від загальної кількості пошкоджень. Важливо відзначити, що вище показано статистику по регіонах з розвиненою транспортною системою та з малим питомим опором ґрунту (від 10 – 1000 Ом). У регіонах з високим опором ґрунту (понад 10 000 Ом) та слаборозвиненою логістикою ситуація набагато гірша [19, 20]. Досвід експлуатації підстанцій 35-220 кВ представлений у роботах Халілова Ф. Х. (таблиця 1.1) показує, що грозові хвилі, що

набігають, є істотним фактором, що викликає пошкодження обладнання на підстанціях [12], що також підтверджується роботою з оцінки основних причин скорочення терміну служби трансформаторів [13].

Таблиця 1.1 – Число пошкоджень обладнання ПС за даними досвіду експлуатації та показник надійності безаварійної роботи одиниці обладнання підстанцій через грозові перенапруги, що виникають при ударах блискавки в лінії електропередачі на підходах до підстанцій

Клас напруги, кВ	Число пошкоджень обладнання ПС за даними досвіду експлуатації		
	I група	II група	Загальне
35	57	37	94
110	44	25	69
220	6	4	10

У таблиці підстанції поділено на 2 групи: – група I – ПС із нормальною ізоляцією електрообладнання; – група II – ПС з ослабленою (у ряді випадків з дефектами) ізоляції електроустаткування. Важливо відзначити, що значна кількість пошкоджень обладнання підстанцій не пов'язана з грозовими впливами, а є наслідком недоліків профілактики та ремонтів та впливом людського фактору. При цьому кількістю таких пошкоджень можна керувати організаційно-технічними заходами. Однак грозові пошкодження можуть відбуватися навіть за дотримання всіх правил грозозахисту та повної відповідності їх ПУЕ. Це пов'язано в основному з недостатньою вивченістю розвитку грозових перенапруг, впливу на ці процеси різних параметрів (наприклад, характеристики заземлювальних пристроїв підстанцій та опор ПЛ за малих часів та великих імпульсних струмів) та складністю оцінки,

прогнозування впливу перенапруг на елементи енергосистем. Таким чином, можна вважати, що атмосферні (грозові) перенапруги є одним з основних факторів, які негативно впливають на силові трансформатори.

Важливо, що проблема грозових перенапруг гостро стоїть як для України, так і для багатьох інших країнах, таких як США, Бразилія, Китай, Японія, Індія, Греція, Азербайджан тощо. У цих країнах ведуться активні дослідження, спрямовані на моніторинг грозових впливів на об'єкти енергетики [4 – 12], розробку моделей грозових впливів для досліджень та розробок захисних засобів та заходів [13] та безпосередня розробка засобів та способів захисту від впливу грозових перенапруг.

1.3 Типи грозових перенапруг

Приватним виглядом зовнішніх перенапруг є перенапруги, що виникають при грозових розрядах. Відповідно до [14], на рисунку 1.8 представлені основні випадки прямих ударів блискавки у приєднанні до підстанцій ПЛ:

- удари блискавки у фазні дроти (точка 1);
- удари блискавки в опори (точка 2);
- удари блискавки в трос (точка 3).

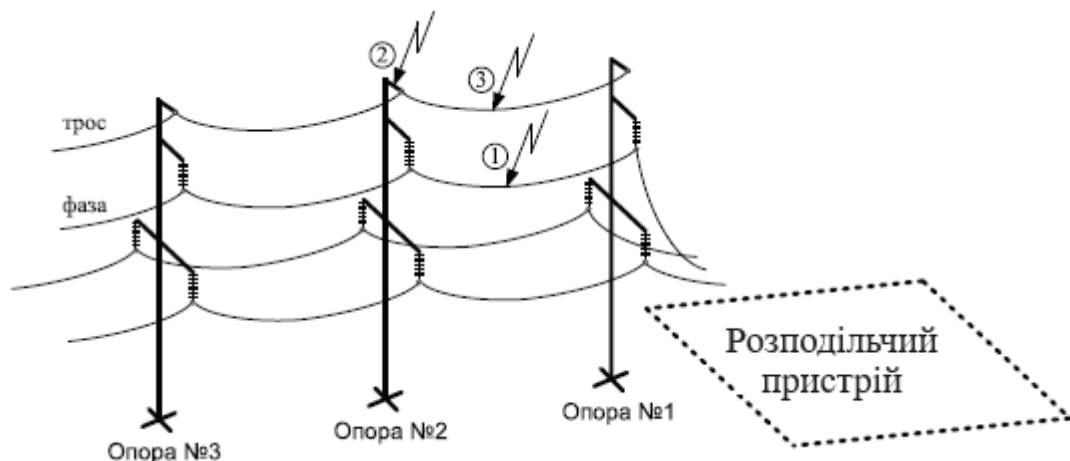
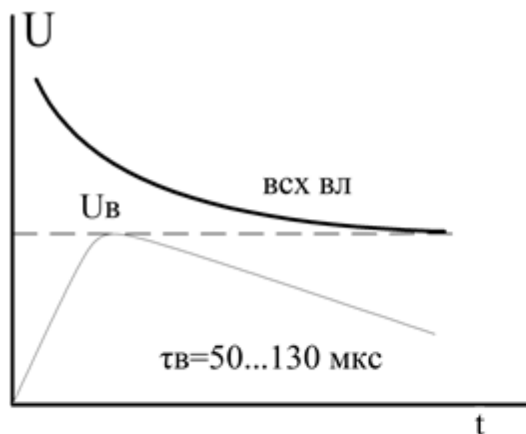


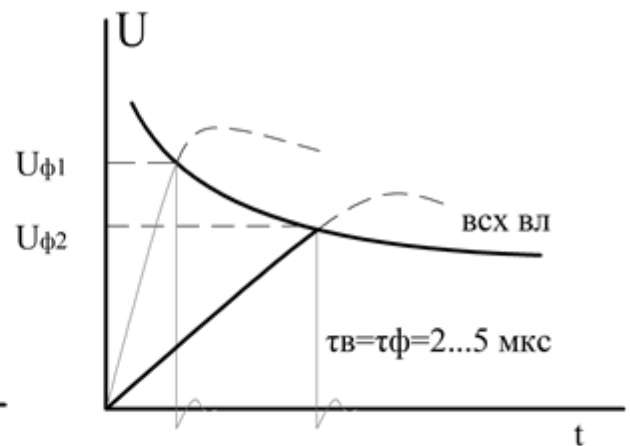
Рисунок 1.8 – Можливі місця ударів блискавки в повітряну лінію

Умовно грозові хвилі перенапруги, представлені на рис. 1.9, в залежності від їх енергетичного потенціалу і крутості можна розділити на три групи:

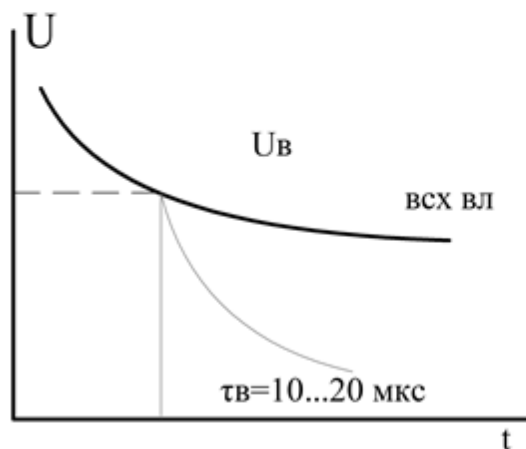
- повні хвилі, утворені в результаті прориву блискавки крізь тросовий захист ПЛ і не привели до перекриття лінійної ізоляції з амплітудою, яка не перевищує 50 %-ву імпульсну розрядну напругу лінійної ізоляції ПЛ (а);
- зрізані хвилі, утворені внаслідок прориву блискавки крізь тросовий захист з подальшим перекриттям лінійної ізоляції ПЛ (б);
- короткі хвилі, утворені під час зворотного перекриття з тіла опори на провід при ударах блискавки в опору або грозозахисний трос (в).



а)



б)



в)

Рисунок 1.9 – Стилiзованi кривi форм грозових хвиль, що набiгають на ПС при ударi блискавки у провiд (а, б) та опору або грозозахисний трос (в)

Найбiльшу небезпеку для поздовжньої iзоляцiї трансформаторiв становлять зрiзанi хвилi великої крутостi за рахунок миттєвого стрибка напруги на витках обмоток [2], при цьому вплив можуть чинити хвилi як з великою амплiтудою, так i з малою. Типовi форми зрiзаних iмпульсiв представленi рис. 1.10.

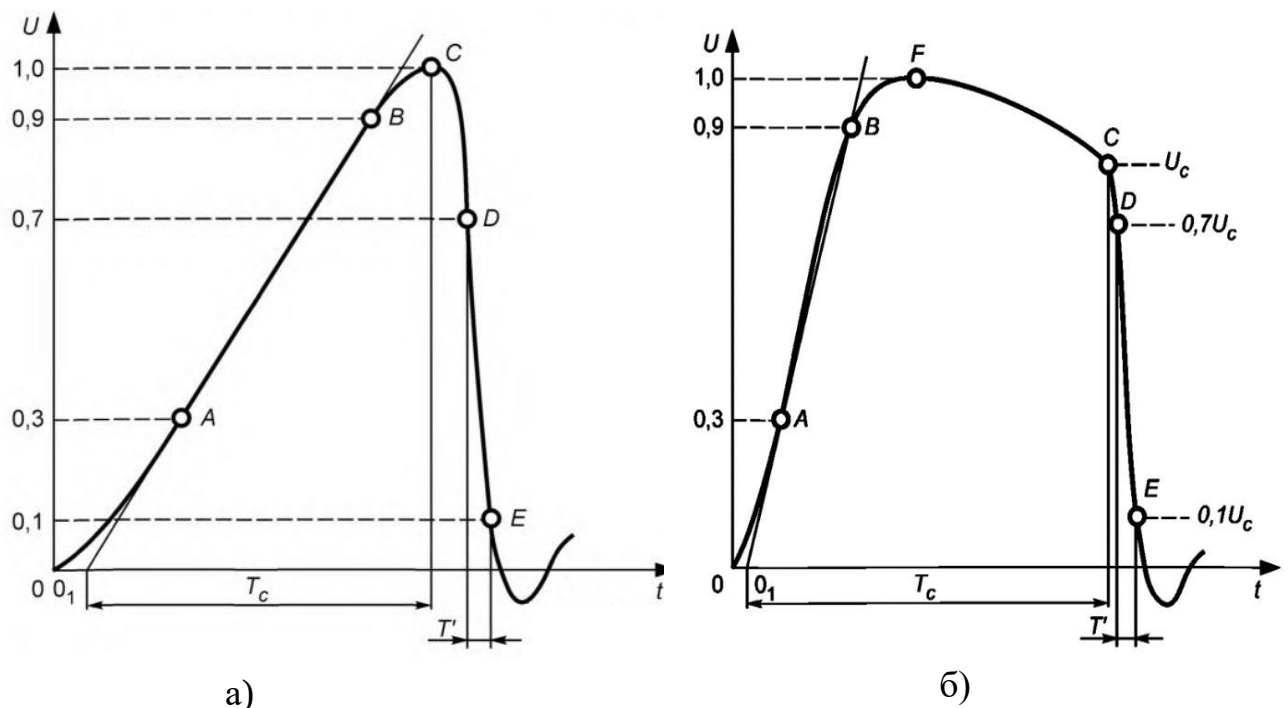


Рисунок 1.10 – Грозові iмпульси: а) iмпульс, зрiзаний на фронтi; б) iмпульс, зрiзаний на спадi iмпульсу

Момент зрiзу iмпульсу – момент початку рiзкої змiни форми iмпульсу внаслiдок швидкого зниження напруги (точка С рис. 1.10) [15]. Передрозрядний час iмпульсу T_c визначають як iнтервал часу мiж умовним початком iмпульсу O_1 та моментом зрiзу. Тривалiсть зрiзу iмпульсу $T_{д.с.}$ визначають, як час, що перевищує в 1,67 рази iнтервал часу T' мiж моментами, коли напруга на зрiзi становить 70% i 10% значення напруги в момент зрiзу (точки D та E на рис. 1.10). У нормативних документах робиться примiтка, що при використаннi стандартних засобiв вимiру

тривалість зрізу та її крутість неможливо знайти визначено з достатньою мірою точності. Незважаючи на це, можна спробувати оцінити частоту одержуваного імпульсу при різних значеннях часу T' . Однак навіть приблизні оцінки крутості, за формами сигналів, дають крутість на порядок більше, ніж очікувана нормативними документами [20], що зайвий раз говорить про високу небезпеку крутих і зрізаних хвиль. Утворені імпульси перенапруги можуть суттєво впливати на трансформаторне обладнання різних класів напруг (10-220 кВ) [16, 17]. При цьому за відсутності захисних пристроїв найбільшому впливу піддаються силові трансформатори, а саме кінцеві витки обмотки трансформаторів. Через високу крутість імпульсу, що набігає, в початкові моменти часу вся напруга концентрується на декількох перших витках, що показано на рис. 1.11 [18] і знайшло відображення в роботі [19].

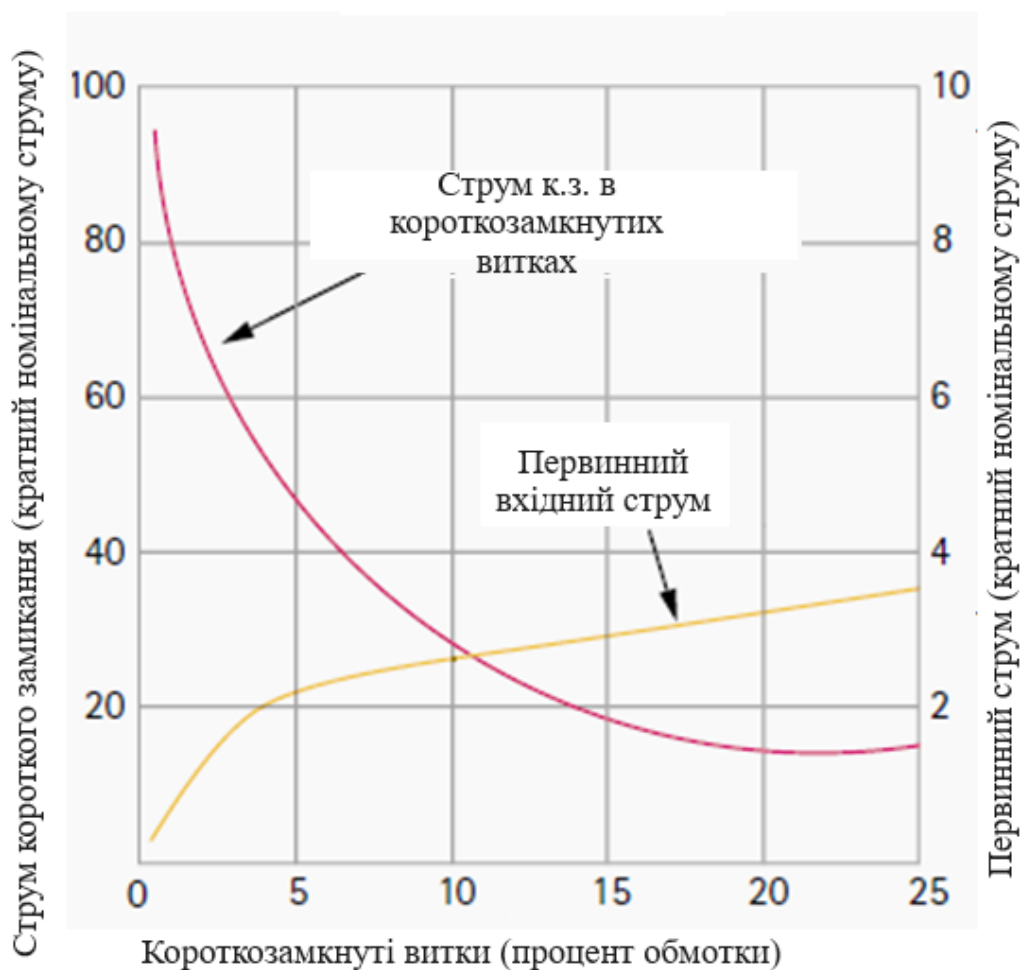


Рисунок 1.11 – Струм міжвиткового короткого замикання в залежності від кількості короткозамкнених витків [18]

Незважаючи на те, що міжвиткова ізоляція кінцевих витків посилена, вона не може бути значно більшою за ізоляцію щодо корпусу (землі). Тому можуть відбуватися часткові пробої ізоляції обмоток. Подальший вплив імпульсів сприяє розвитку дефекту і навіть, якщо він виявляється у початковій стадії, надалі визначення причини може бути утруднено. Важливо відзначити, що крім грозових перенапруг, такі наслідки для трансформаторів можуть бути ініційовані також комутаційними перенапругами, наприклад, при роботі вимикачів на підстанціях. При цьому частотний діапазон підвищується до 1-2 МГц, на відміну від 200-300 кГц, при грозових перенапругах. Крім того, вони можуть викликати різні резонансні ефекти, що зачіпають як первинні, так і вторинні обмотки трансформаторів [10 – 12]. Слід зазначити, що небезпеку можуть становити не лише прямі удари в повітряні лінії та підстанції, а й наведені перенапруги від ударів блискавок поряд з об'єктами енергетики [13, 14]. Ще однією важливою деталлю є вплив повторних ударів блискавок [15].

1.4 Вплив високочастотних комутаційних перенапруг

Як уже зазначалося раніше важливим джерелом високочастотних перенапруг є комутаційні перенапруги, які можуть виникати при раптових змінах у схемі або параметрах мережі, роботі вимикачів (особливо вакуумних) замикань на землю і між фазами, комутації кабельних і повітряних ліній і т.д. [16-19]. При цьому коливальні процеси, що виникають, характеризуються частотами, що значно перевищують діапазон грозових перенапруг і можуть досягати 1-2 МГц. Особливо актуально це стає при спрацьовуванні вакуумних вимикачів на підстанціях, так, наприклад, ця проблема знайшла відображення в роботі [10] у таблиці 1.2 наведено приклади випадків та параметри виходу з ладу трансформаторів через вплив комутаційних перенапруг.

Таблиця 1.2 – Історія відмов трансформаторів, пов'язаних із перемиканням первинного вакуумного вимикача [10]

№	Об'єкт	Напруга, кВ	Трансформатор			Вакуумний вимикач
			Тип	Розрядник	Виток, що вийшов	Положення
1	ГЕС	13,80	Сухий	Ні	Перший виток	Закритий
2	Лікарня	13,80	Сухий	Ні	Перший виток	Закритий
3	Залізниця	26,40	Масло наповнений	Ні	Середній виток	Відкритий
4	Дата-центр	26,40	Литий	Так	Перший виток не виявлено	Закритий/ відкритий
			Литий	Так		Закритий
5	Нафтове родовище	33,00	Сухий	Ні	Перший виток	Закритий
6	Нафтова бурова вежа	11,00	Литий	Так	Перший виток	Закритий

На рис 1.12 показані типові наслідки комутаційних перенапруг напружених вихід трансформаторів з ладу.

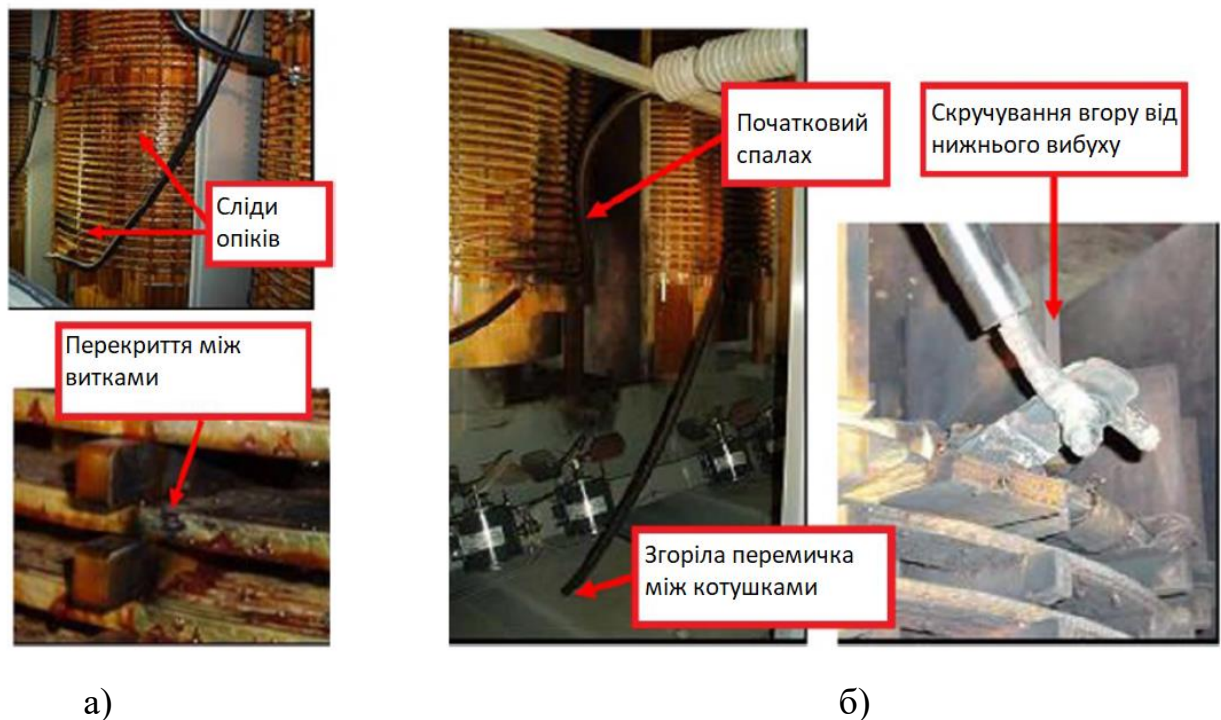


Рисунок 1.12 – Наслідки впливу комутаційних перенапруг при спрацьовуванні вакуумних вимикачів: а) при відключенні; б) при включенні

Такі перенапруги можуть виникати в мережах з різною конфігурацією і можуть бути небезпечними не тільки для трансформаторного, але і іншого обладнання (двигуна, генератора і т.д.) [11, 12]. При цьому основними засобами захисту від них пропонується використовувати ГНН, які мають ряд недоліків, які не дозволяють надійно захищати обладнання від комутаційних перенапруг.

1.5 Захист від перенапруг

1.5.1 Класичні засоби захисту

Для захисту повітряних ліній та підстанцій від пошкоджень при розрядах блискавок, служать спеціальні пристрої грозозахисту, до яких відносяться грозозахисні троси, стрижневі блискавководводи, трубчасті розрядники, вентильні розрядники, нелінійні обмежувачі перенапруг,

пристрої заземлення і т. д. Істотну роль має значення опору заземлення опор [13, 14]. Строго кажучи, заземлення опор повітряних ліній не є безпосередньо заходом захисту від грозових перенапруг. Однак, незважаючи на це, воно істотно впливає на захист від грозових перенапруг. Воно істотно впливає на ймовірність зворотних перекриттів з опори/троса грозозахисту на фазний дріт [15]. При зворотному перекритті виникають імпульси високочастотних перенапруг, які можуть придушуватися захисними пристроями. Відповідно, вони істотно впливають на обладнання підстанцій, наприклад, трансформатори, і можуть впливати на інше обладнання (це поліетиленові кабелі, високовольні вводи з RIP-ізоляцією, підвісні ізолятори і т. д.) [16]. Часто реальний опір заземлення опор, набагато більше за нормативну документацію [17-19]. Це особливо актуально для районів з високим питомим опором ґрунту [20]. У роботі [11] зазначено, що проблема якісного заземлення виникає за наявності значних перепадів висот, що вимагає застосування нових та не апробованих ще методик розрахунку заземлення. У цих районах дуже складно забезпечити необхідні значення опору заземлення опор повітряних ліній. У зв'язку з цим сильно зростає ймовірність виникнення зворотних перекриттів [12], що негативно позначається на загальному показнику грозостійкості.

При цьому важливою характеристикою стає не тільки активний опір заземлення, а й індуктивні характеристики заземлення, які за несприятливих умов (складність конструкції, висока напруженість електричного поля та інші) можуть значно (на 40 %) збільшити напруженість електричного поля на елементах [13-17]. Дослідження показують, що при грозових та імпульсних впливах опору заземлення опор відрізняються від опорів, виміряних на робочій частоті 50 Гц [5, 8]. На характеристики заземлення опор починають впливати і реактивні елементи як заземлювача, і опори, що у сумі з індуктивністю опор істотно змінює форму простого аперіодичного імпульсу напруги, що впливає ізоляцію ПЛ. При досить крутому імпульсі його амплітуда практично не залежатиме від опору заземлення, і визначатиметься

індуктивністю опори [9]. Це значно впливає на ймовірність зворотних перекриттів при ударах блискавки в опори або трос грозозахисту для класів напруги 35-330 кВ. Варто зазначити, що й інші показники, що опосередковано впливають на опір ґрунту, наприклад, діелектрична проникність, також можуть істотно впливати на характеристики заземлення [3, 7]. Або, наприклад, наявність перепадів висот у межах заземлювального пристрою [11]. Ці показники мало вивчені, однак їх облік необхідний для забезпечення надійних систем заземлення, що дозволяють захищати обладнання підстанцій від грозових перенапруг.

Грозозахисний трос підвішується на лініях напругою 110 кВ та вище, споруджених на металевих та залізобетонних опорах. На лініях 110 – 220 кВ з дерев'яними опорами та лініях 35 кВ трос підвішується зазвичай лише на підходах до підстанцій [11]. Незважаючи на широке застосування тросів як засіб захисту, часто мають місце випадки ударів блискавки у фазні дроти, минаючи трос грозозахисту, що знижує його надійність як засобу захисту, крім того, без хорошого заземлення, існує велика ймовірність зворотного перекриття на фазний провід, що також є небезпечним фактором. При цьому і тросові блискавковідводи також не забезпечують декларовану надійність захисту від ураження блискавкою [12]. В Україні для захисту ПЛ 110-330 кВ від грозових найбільш поширеним методом захисту є застосування лінійних захисних апаратів. Найбільш поширеними захисними апаратами є підвісні нелінійні обмежувачі перенапруг та лінійні розрядники [3]. Варто зауважити, що в даний час немає розробленої та затвердженої універсальної методики застосування лінійних захисних апаратів для ПЛ різних класів напруги. Тому експлуатаційні організації, яким належать ПЛ, зазнають певних труднощів у розробці технічних заходів щодо захисту проблемних ПЛ [13, 14]. Обмежувачі перенапруг встановлюються в основному в мережах 110 кВ і вище, проте можуть застосовуватися в мережах 35 кВ [1]. ОПН дозволяє глибоко обмежувати амплітуди імпульсів, що набігають, і забезпечувати захисту від перенапруг [4-6, 15, 16]. Однак, ОПН мають ряд істотних

недоліків. В першу чергу, ефективна робота ОПН, забезпечується лише при установці одночасно у всі фази ланцюга, що захищається на кожній опорі ділянки траси, що захищається [7, 8]. Це дуже дорогий захід, і він застосовується лише для відносно коротких або особливо важливих повітряних ліній. В інших випадках або застосовується метод послідовної установки [7] або встановлюється на певних ділянках, особливо схильних до впливу ударів блискавок [8, 9]. Відсутність іскрових проміжків обумовлює протікання через ОПН струмів робочої напруги частотою 50 Гц. При великому значенні цих струмів може статися перегрів варистора і вихід ОПН з ладу. До того ж струм, що протікає через обмежувач у нормальному режимі, містить ємнісну та активну складові. При напругах до $0,7U$ переважає ємнісна складова струму. При великих напругах різко зростає нелінійна провідність і активна складова струму, що призводить до значного нагрівання варистора. Істотним недоліком ОПН є і залежність конструкції від класу напруги та характеристик мережі. Найбільші складнощі виникають розробки ОПН для розподільних мереж, мають велику протяжність. Це призводить до того, що для безаварійної експлуатації ОПН необхідний точний вибір параметрів. Основними факторами, які є необхідними при виборі ОПН, є [10, 11]:

- максимально допустима напруга з урахуванням тривалості її впливу;
- розрахунковий імпульсний струм;
- розрахунковий комутаційний струм;
- енергоємність (клас пропускної спроможності).

У ряді випадків останні два параметри замінюються здатністю поглинати електричну енергію, виражену в кДж на 1 кВ U_m . Важливо, що ОПН що неспроможні вплинути на крутість фронту впливають грозових перенапруг, вони обмежують лише амплітуду перенапруг, залежить від напруги на захисному апараті. Причому в деяких випадках спрацювання ОПН може спричинити підвищення крутості хвилі, що набігає, за рахунок перетворення хвилі на хвилю з крутим фронтом [10]. Якщо значення

перенапруги менші за розрахунковий рівень захисту, максимальні значення перенапруг, що набігають, не змінюються. Перенапруги з малими максимальними значеннями досягають трансформаторів практично без амплітудних спотворень і стають джерелами перенапруг з великими максимальними значеннями крутості, що виникають усередині обмоток внаслідок резонансних ефектів явищ [12]. Таким чином, якщо, наприклад, розглядати силові трансформатори, ОПН знижують рівень грозових перенапруг, що впливають на головну ізоляцію (між обмоткою високої напруги і заземленим баком), але не знижують градієнтні перенапруги, що впливають на міжвиткову ізоляцію трансформаторів. У цьому ситуація багаторазово погіршується за умов високого опору ґрунту. Також слід зазначити неефективність обмеження високочастотних (ВЧ) перенапруг за допомогою ОПН, яка обумовлена наявністю індуктивності власне захисного апарату та його приєднань. Обмежувач перенапруги слід розглядати як засіб обмеження ВЧ перенапруги, якщо частота останніх не перевищує 200 кГц. При більш високих частотах ОПН реагує на перший, як правило, максимальний пік ВЧ перенапруг, але обмежує наступні. Все це звужує область застосування ОПН для захисту обладнання підстанцій. Крім того, експлуатація ОПН показала малу ефективність у мережах середньої напруги при захисті від індукованих перенапруг [13]. У роботі [14] виявлено істотну залежність ефективності захисту трансформаторів у мережах 11 і 33 кВ, від довжини дроту приєднання ОПН, що також накладає деякі обмеження у використанні даних пристроїв, як засобів захисту. Можна також додати, деякі дослідження говорять про можливість зниження загальної надійності підстанції, поза грозового періоду, за наявності ОПН [2]. Це також змушує оцінювати ефективність та ризики використання ОПН, а також змушує проводити чисельні оцінки для уточнення необхідної кількості ОПН на підстанції. Крім того, у роботах [8, 9, 15-18] показано, що навіть при виконанні вимог ПУЕ [19] до розміщення захисних апаратів та застосування

ОПН можлива поява небезпечних грозових перенапруг від хвиль, що набігають по ПЛ.

1.5.2 Розроблювані, перспективні та інноваційні засоби захисту від високочастотних перенапруг

Крім поширених засобів захисту від перенапруг, активно ведуться розробки та впровадження нових пристроїв, що працюють на різних принципах: спільне застосування повітряного зазору та лінійних розрядників [10], застосування ОПН із комплексом резисторів та конденсаторів [11, 12]. Однак часто пристрої зберігають недоліки своїх прототипів, в основному це: необхідність великого числа пристроїв (від одного до трьох на кожному опорі в одноланцюжній повітряній лінії), залежність від заземлення ґрунту, складність в установці та експлуатації [13]. Інші методи придушення перенапруг не були перевірені, так як були проведені комп'ютерні симуляції, але в масове використання так і не пішли, наприклад, застосування феромагнітних кілець [14]. У патенті [13] пропонується використовувати одночасно ОПН із встановленим на нього розрядними проміжками. Передбачається використовувати одночасно захисні властивості як ОПН, так і розрядних проміжків для нівелювання недоліків. Однак у даній пропозиції є ряд недоліків, таких як необхідність точного налаштування розміру розрядного проміжку, обмеження мінімальної амплітуди спрацьовування. Існує рішення, які полягають у застосуванні нелінійних обмежувачів перенапруги вбудованих у корпуси ізоляторів. Дані рішення дозволяють значно скоротити трудовитрати на транспортування, встановлення та монтаж, оскільки замість двох пристроїв буде використовуватися одне. Однак це призводить до ускладнення конструкції самого пристрою, зниження його надійності, збільшення габаритів та ваги. Також залишається актуальною типова проблема пристроїв із варисторами: складність контролю його справності. У роботах [17, 18] Запропоновано концепцію захисних

пристроїв, параметри яких змінюються в залежності від частотної характеристики перенапруги, що набігає. Так пропонується застосування комбінація високочастотного магнітного матеріалу, розташована на основному провіднику, з паралельно підключеним опором. За представленими розрахунками та експериментами, така комбінація здатна пригнічувати та захищати від високочастотних перенапруг, даний пристрій призначається для придушення перенапруг з високими показниками dU/dt , тобто з високою крутістю. Однак, пристрій потребує налаштування під певний діапазон частот, в якому буде досягатися ефективного придушення. Слід зазначити, що у даних статтях є проблема захисту трансформаторів від високочастотних перенапруг, викликаних комутаційними операціями, а іменною роботою вакуумних вимикачів. Однією з останніх розробок є системи, які з мультикамерних розрядників. Вони показують високу ефективність, що підтверджує ряд робіт [19], особливо ефективно вони знижують кількість відключень ПЛ. Однак незважаючи на високу заявлену ефективність, ці пристрої також мають ряд істотних недоліків: для забезпечення надійного захисту від грозових перенапруг необхідна установка розрядників на кожній опорі на кожен ізолятор, необхідне точне налаштування іскрового проміжку (якщо пристрій використовується з ним), а також необхідність надійного заземлення задля забезпечення ефективної роботи [10]. Це важливо, тому що немає інформації про те, як на ефективність мультикамерних розрядників впливає великий опір заземлювальних пристроїв, а також вологість та льоду.

1.5.3 Застосування скін-ефекту у захисті від високочастотних перенапруг

Найбільш перспективним з погляду простоти експлуатації та застосування бачиться використання захисних пристроїв, заснованих на застосуванні композитних матеріалів (провідник-діелектрик, провідник-

феромагнетик тощо) [12-16]. Існують й інші поодинокі розробки захисних пристроїв за принципом скін-ефекту [17].

Ці пристрої можуть ефективно пригнічувати високочастотні перенапруги, при цьому бути досить компактними і на їхню роботу не впливає значення опору або заземлення опор. Принцип роботи полягає у підвищенні опору пристрою зі збільшенням частоти вхідного сигналу. На рис. 1.13 представлені важливі схеми підключення захисних пристроїв: нелінійного обмежувача перенапруг і частотнозавляжного пристрою (ЧЗП).

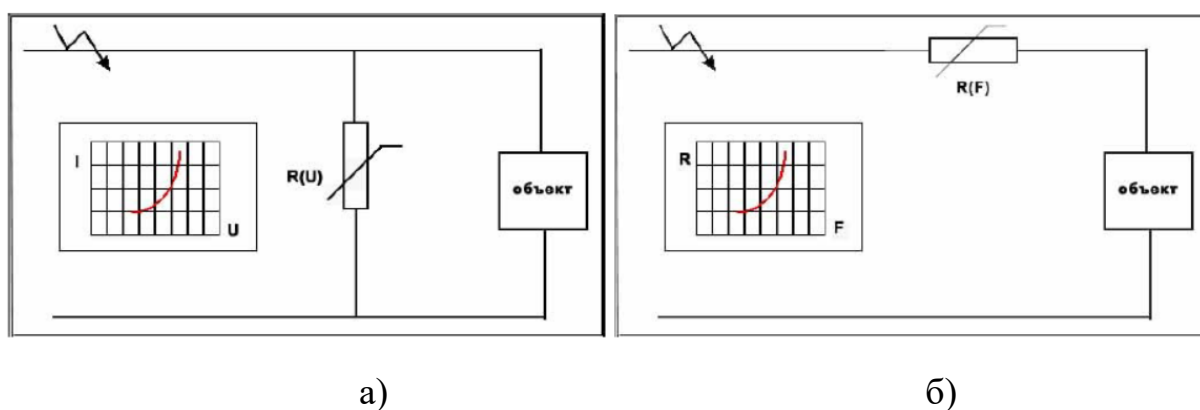


Рисунок 1.13 – Схеми захисту об'єкта за допомогою: а – ОПН; б – ЧЗП

Одним із перспективних феромагнітних матеріалів є стрічки 5БДСР. Цей матеріал має високий питомий опір у діапазоні грозових (200-300 кГц) та комутаційних частот (1-2 МГц) [10, 12]. Застосування цього матеріалу ефективно себе показало у ранніх дослідженнях [13]. На його основі було створено частотнозалежний пристрій (ЧЗП) для ПЛ 110 кВ, який показаний на рис. 1.14. Розроблений частотнозавісіимий пристрій, являє собою змотаний в котушку фазний алюмінієвий провід з нанесеним на нього феромагнітним матеріалом, який має високу магнітну проникність і високий питомий опір. У зв'язку з цим опір дроту набуває частотно-залежного характеру і при проходженні високочастотних сигналів по дроту його опір різко зростає.



Рисунок 1.14 – Фото ЧЗП у високовольтному залі

У нормальному режимі роботи, на частоті 50 Гц, частотнозалежний провід має опір рівний опору фазного дроту без покриттів, так як струм йде по алюмінієвому провіднику, що має низький питомий опір. При проходженні високочастотного сигналу (наприклад, грозового імпульсу перенапруги, що має частоту 200-300 кГц), опір дроту, і відповідно пристрою різко зростає в десятки тисяч разів, за рахунок дії скін-ефекту і виштовхування струму з алюмінієвого провідника у високоомний шар феромагніту що показано рис 1.15.

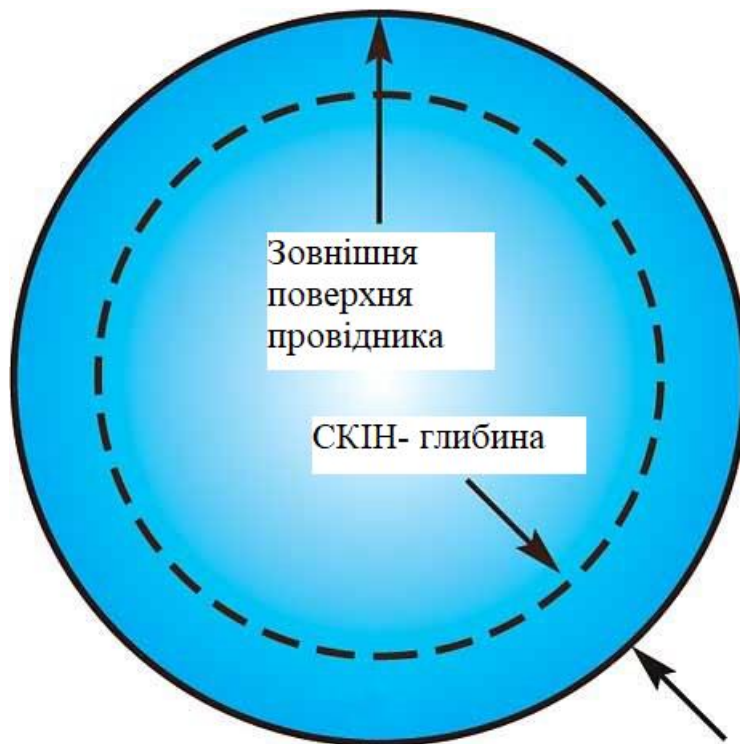


Рисунок 1.15 – Ілюстрація роботи скін-ефекту

При довжині проводу 120 метрів використовуваного в ЧЗП забезпечується опір 120 Ом на грозових частотах (для порівняння опір проводу без феромагнітної стрічки при тій же довжині становить близько 20 мОм), що дозволяє значно знижувати амплітуду імпульсів високочастотних перенапруг. У свою чергу форма пристрою у вигляді спіралі створює високий реактивний опір, який істотно знижує крутизну імпульсу, що набігає, зменшуючи тим самим небезпеку міжвиткових замикань в обладнанні, що захищається, в першу чергу в силових трансформаторах. Як результат, робота даного пристрою дозволяє суттєво збільшити грозостійкість ПЛ та підстанцій. Як феромагнітний матеріал використовувалася стрічка холоднокатаної аморфної кристалічної сталі 5БДСР, параметри якої представлені в таблиці 1.3 [10]:

Таблиця 1.3 – Основні характеристики стрічки 5БДСР

Властивості	Значення
Температура Кюрі T_k , °C	350
Температура початку кристалізації T_C , °C	530
Щільність, g/cm ³	7,6
Питомий електричний опір, $\mu\Omega \times m$	1,6
Константа магнітострикції, ppm	2,1
Максимальна температура постійного використання, °C	240
Індукція насичення B_s , T	1,3

Незважаючи на високу ефективність пристрою, показану в лабораторних умовах, слід зазначити і ряд моментів, що не дозволяють швидкому виходу в широку експлуатацію цих пристроїв: недостатня кількість інформації щодо ефективності придушення пристроєм високочастотних перенапруг (немає аналізу даних успішності дослідної експлуатації, не проводилися оцінки ефективності придушення імпульсів зворотного перекриття та зрізаних імпульсів високочастотних перенапруг), недостатньо високий омичний опір на високих частотах, великі габарити, а також відсутність пристроїв на інші класи напруги (наприклад, 35 кВ). У зв'язку з цим необхідно провести оцінку ефективності дослідної експлуатації ЧЗП, розглянути можливості підвищення активного опору ЧЗП та оцінити можливості оптимізації конструкцій ЧЗП.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

На підставі проведеного огляду джерел можна зробити такі висновки:

- 1) захист обладнання підстанцій від високочастотних перенапруг грозової та комутаційної природи є актуальною проблемою;
- 2) одним з важливих джерел небезпеки даних перенапруг є висока крутість імпульсу, що набігає, яка не залежить від амплітуди і може викликати пошкодження ізоляції обмоток трансформатора;
- 3) основний напрямок сучасних засобів захисту – зниження амплітуди набігаючого імпульсу та зниження кількості аварійних виключень ПЛ. При цьому мало уваги приділяється зменшенню крутості імпульсів.

РОЗДІЛ 2. НИЗКОВОЛЬТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Випробування на змінній напрузі

2.1.1 Експериментальна установка та методика вимірювань

Для проведення низьковольтних вимірів на змінній напрузі застосовувалася схема, показана рис 2.2а. Схема вимірювання складалася з генератора високочастотних сигналів, макету, що вимірюється, малоіндуктивного шунта (як шунтів застосовувалися одиночні резистори ТВО або спаяні набори опорів, кінцевим номіналом 3, 1, 0,5, 0,1 Ом) і осцилографа. Макети і шунт розташовувалися в заземленому металевому вимірювальному шафі, щоб уникнути впливу зовнішніх перешкод. Генератор сигналів та осцилограф знаходилися зовні, з'єднання з макетом проводилося з використанням роз'ємів, змонтованих на стінці шафи. Для вимірювань застосовувався двоканальний осцилограф DS1022С, а джерелом високочастотних сигналів застосовувався генератор SFG-2010. При вимірюваннях визначалися середньоквадратичні амплітуди сигналів, що проходять через шунт та макети (K1 і K2), а також зміщення фаз між амплітудами сигналів щодо один одного (рис. 2.1 та рис. 2.3).

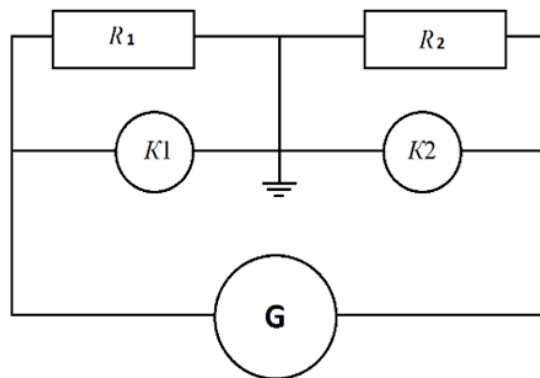
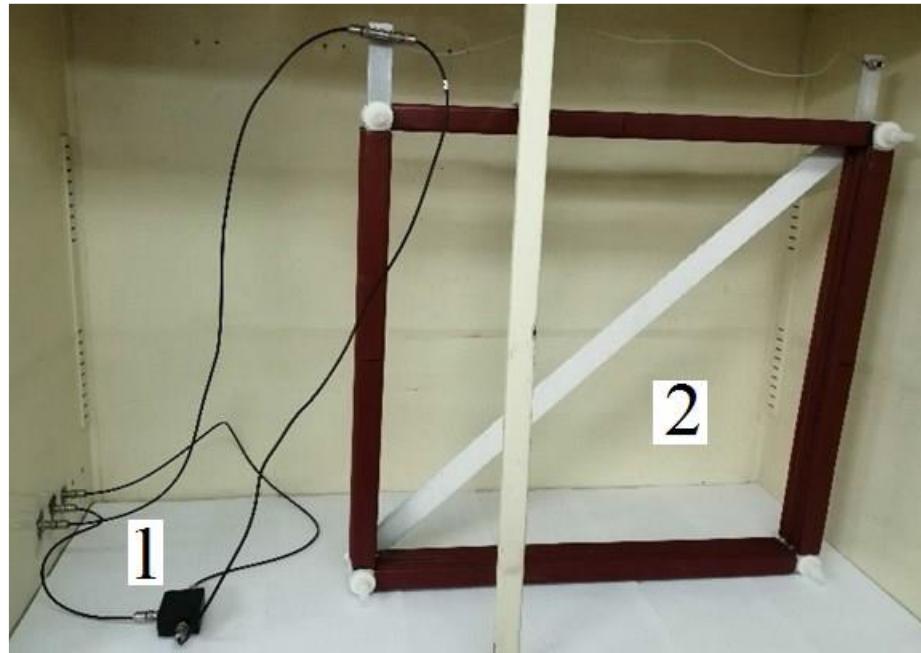
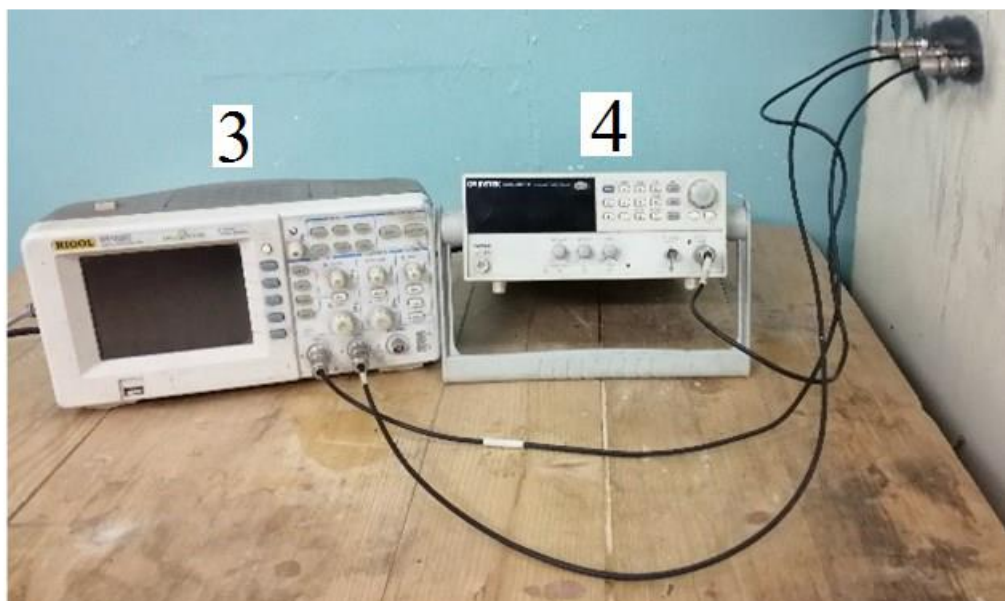


Рисунок 2.1 – Принципова схема вимірювальної установки (R1, R2, – малоіндуктивний шунт та макет, що вимірюється, K1, K2 – щупи осцилографа, G – генератор високочастотного сигналу



а)



б)

Рисунок 2.2 – Вимірювальна установка: а – вимірювальна установка у вимірювальній шафі; б – вимірювальна установка зовні шафи. Тут: 1 – малоіндуктивний шунт; 2 – макет ЧЗП; 3 – осцилограф DS11022C; 4 – генератор сигналів SFG 2010

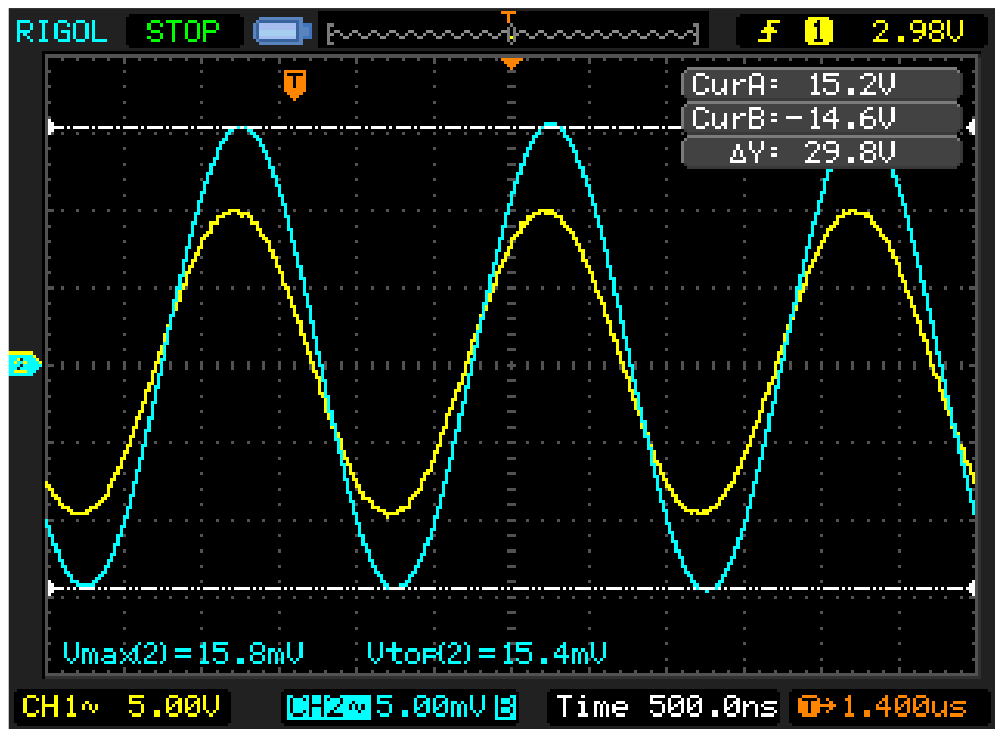


Рисунок 2.3 – Приклад отриманої осцилограми

Вимірювання проводилися в діапазоні частот від 100 кГц до 1 МГц з кроком 100 кГц. Отримані дані фіксувалися у журналі експерименту. За отриманими даним визначався повний опір зразка з наступного виразу:

$$Z_i = \frac{U_M}{U_{III}} R_{III} \quad (2.1)$$

де Z_i – повний опір макета на цій частоті, Ом;

U_M – напруга на макеті, В;

U_{III} – напруга на шунті, В;

R_{III} – опір шунта, Ом.

Далі обчислювався реактивний X і активний R опір макета. Для цього вимірювалося зміщення фаз τ і розраховувалися опори за виразами:

$$X_i = Z_i \sin \frac{\tau_i}{T_i} 360 \quad (2.2)$$

$$R_i = Z_i \cos \frac{\tau_i}{T_i} 360 \quad (2.3)$$

де: τ_i – зміщення фаз на цій частоті між коливаннями на шунті та макеті, мкс; T_i – період коливань на цій частоті, мкс.

2.1.2 Експерименти зі зміною конфігурації провідників

Першим кроком була спроба вдосконалити вже наявний провід ЧЗП, тобто збільшити його активний опір шляхом намотування мідного дроту на провідник ЧЗП. Ідея полягала у створенні за допомогою намотування магнітного поля, яке має посилювати скін-ефект за рахунок вдавлювання струму всередину стрічки 5БДСР. Як провідник був використаний алюмінієвий провід А-150, довжиною 3 метри з нанесеною на нього феромагнітною стрічкою 5БДСР, намотування проводилося мідним дротом діаметром 1 мм.

Низьковольтні дослідження проводилися з різними провідниками:

- провід зі стрічкою 5БДСР з намотуванням з мідного дроту;
- провід зі стрічкою без намотування,
- провід без стрічки та без намотування.

На графіках представлені зміни повного, активного та реактивного опору зразків, при підвищенні частоти вхідного сигналу (рис. 2.4).

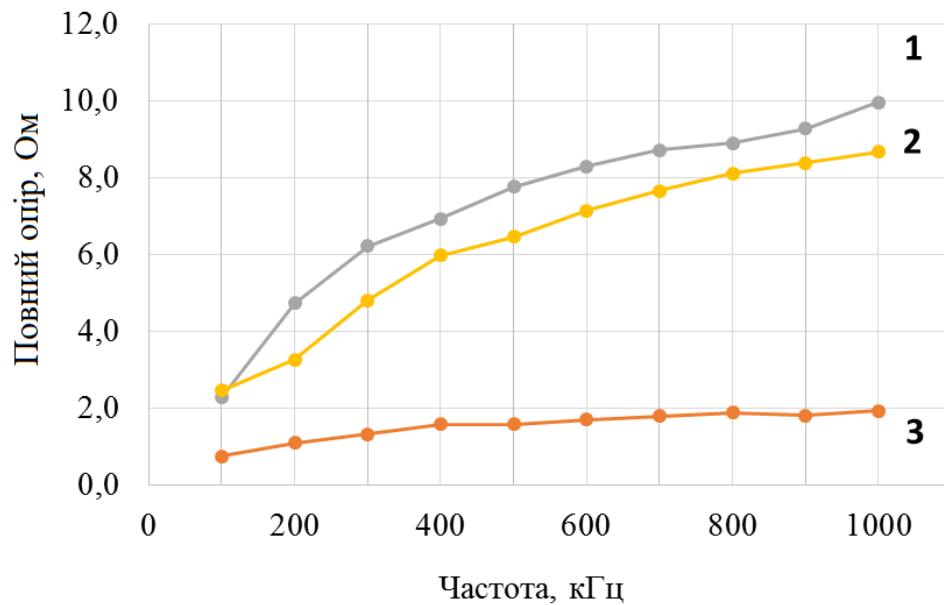


Рисунок 2.4 – Залежність повного опору ЧЗП від частоти: 1 – провід зі стрічкою 5БДСР; 2 – провід зі стрічкою 5БДСР та з намотуванням мідного дроту; 3 – провід без стрічки 5БДСР

З графіків видно, що опір у зразка з намотуванням (2) не зріс, порівняно з проводом без намотування (1). Також для порівняння представлені графіки реактивного (рис. 2.5) і активного опорів зразків (рис. 2.6).

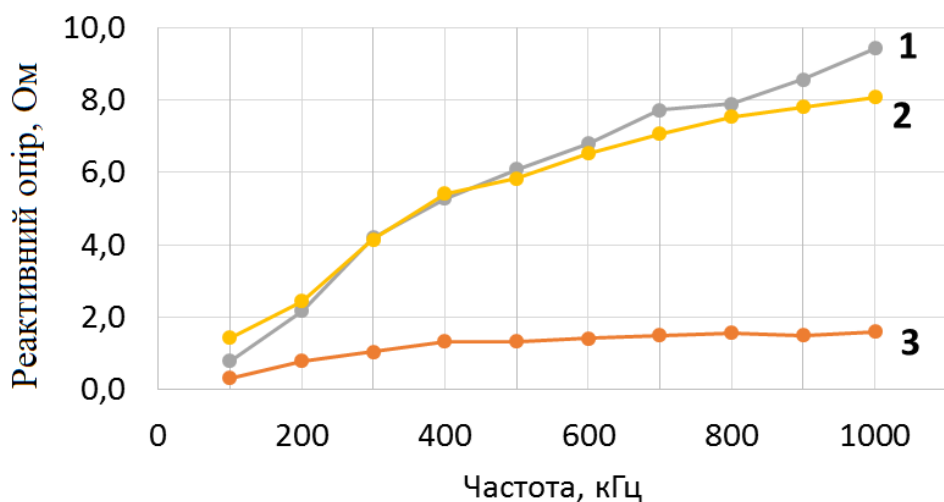


Рисунок 2.5 – Залежність реактивного опору від частоти: 1 – провід зі стрічкою 5БДСР; 2 – провід зі стрічкою 5БДСР та з намотуванням мідного дроту; 3 – провід без стрічки 5БДСР

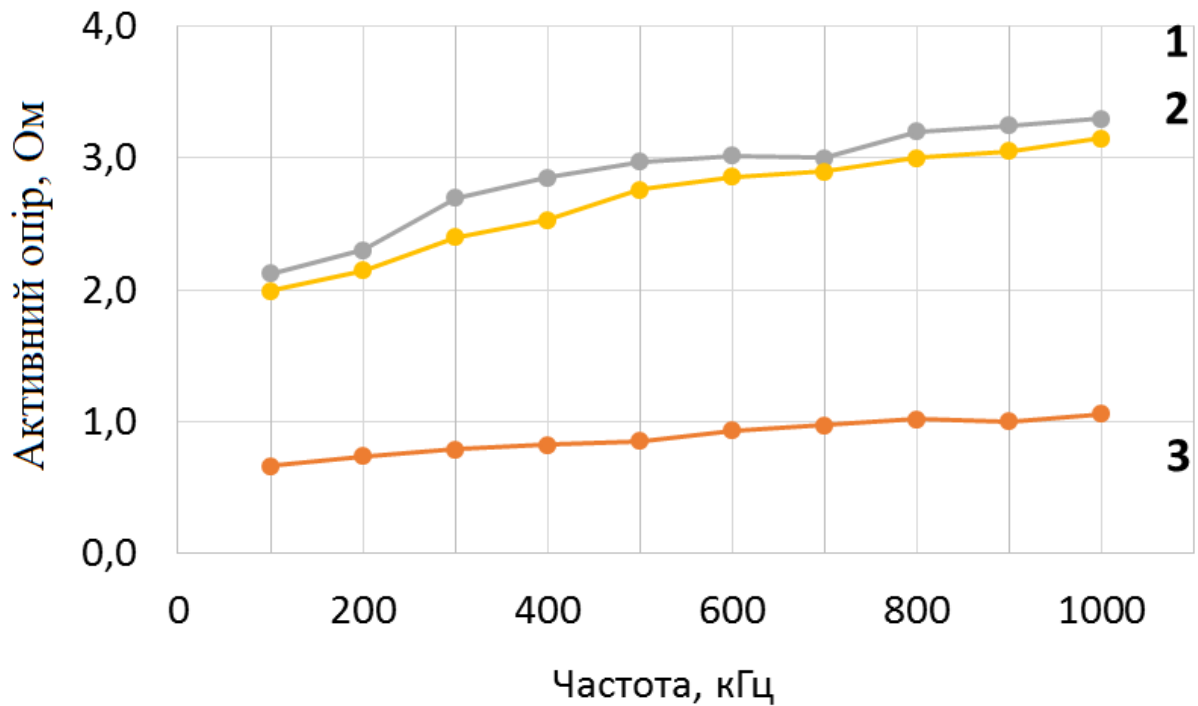


Рисунок 2.6 – Залежність активного опору від частоти: 1 – провід зі стрічкою 5БДСР; 2 – провід зі стрічкою 5БДСР та з намотуванням мідного дроту; 3 – провід без стрічки 5БДСР

Як видно з рис. 2.5-2.6 у зразка дроту з намотуванням дроту не спостерігається зростання активного або реактивного опору. Відмінності між графіками зразків з намотуванням і без намотування можна пояснити похибкою вимірів. Також можливо через наявність ізоляції між проводом зі стрічкою та намотуванням, мідна намотка показала себе як паралельно включена з проводом котушка. В результаті можна зробити висновок, що додаткове намотування дроту зі стрічкою 5БДСР не приносить збільшення опору. Паралельно були проведені експерименти щодо оцінки ефективності круглих частотнозалежних провідників різної конструкції. Було виготовлено 4 зразки струмопровідного дроту з алюмінію (рис. 2.7). Зразки проводів поміщалися в дрібнодисперсний феромагнітний порошок і щільно утрамбовувалися. Зразки довжиною 240 мм і площею перерізу 300 мм² являли собою дроти:

- кручений провід (рис. 2.7 (1)), що імітує фазні дроти;

- алюмінієвий стрижень з вирізаними борознами глибиною 2 мм та шириною 1 мм паралельні течії струму у провіднику у кількості 5 шт (рис. 2.7 (2));
- гладкий алюмінієвий стрижень (рис. 2.7 (3));
- алюмінієвий стрижень із нанесеним на нього витками провідника, що імітують котушку (для підтвердження результатів попереднього експерименту з намотуванням) (рис. 2.7 (4)).



Рисунок 2.7 – Зразки низьковольтних випробувань: 1 – зразок дроту;
2 – зразок прута з пазами; 3 – зразок гладкого прута; 4 - зразок прута з
намотування

В результаті вимірювань були побудовані графіки залежностей повного (рис. 2.8), активного (рис. 2.9) та реактивного опору зразків (рис. 2.10)

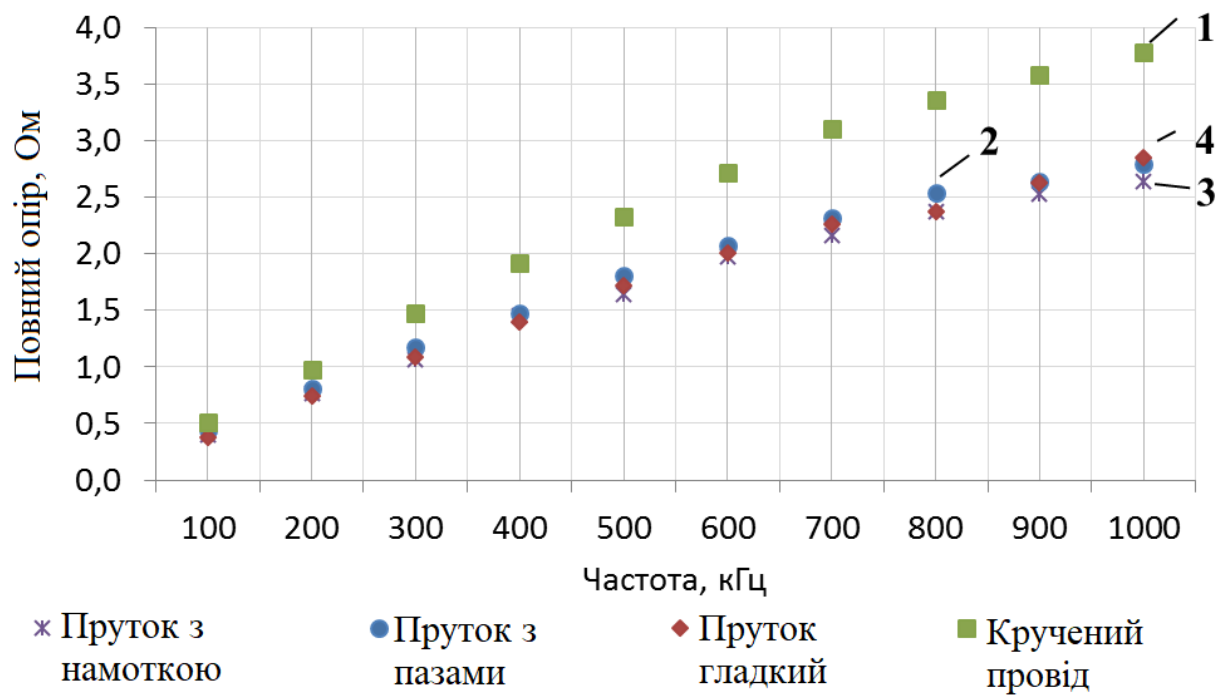


Рисунок 2.8 – Залежність повного опору від частоти: 1 – зразок дроту; 2 – зразок прута з пазами; 3 – зразок гладкого прута; 4 – зразок прута з намотуванням

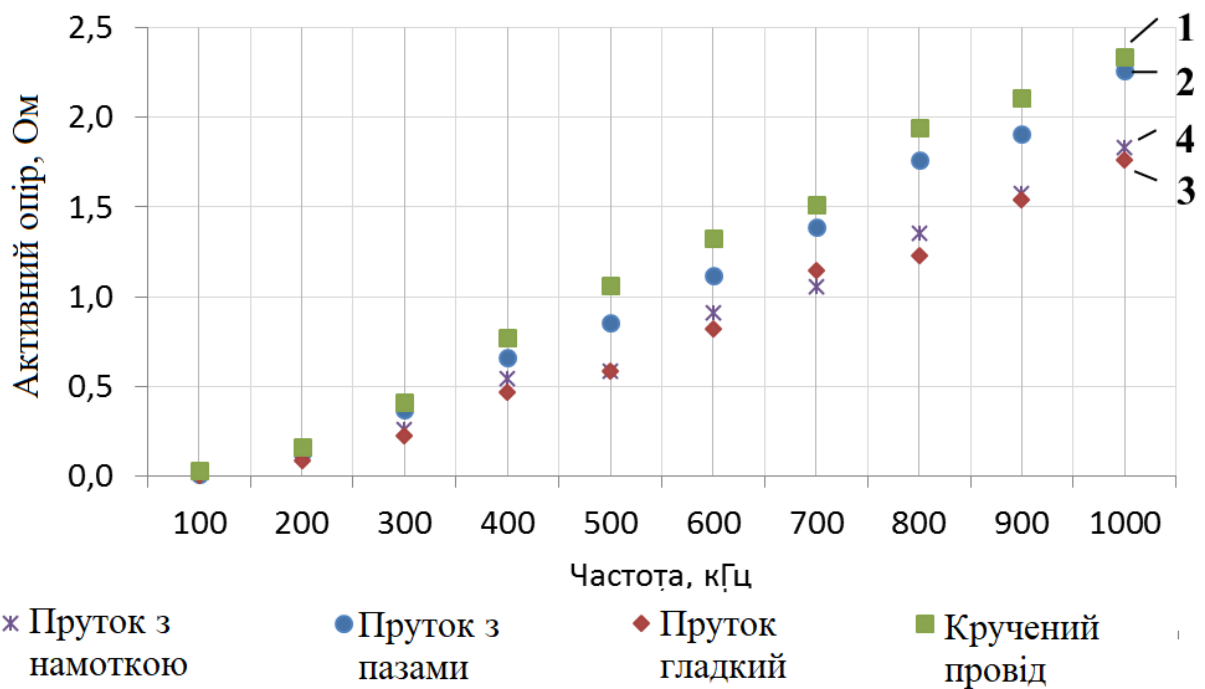


Рисунок 2.9 – Залежність активного опору від частоти: 1 – кручений провід; 2 – зразок прута з пазами; 3 – зразок гладкого прута; 4 - зразок прута з намотуванням

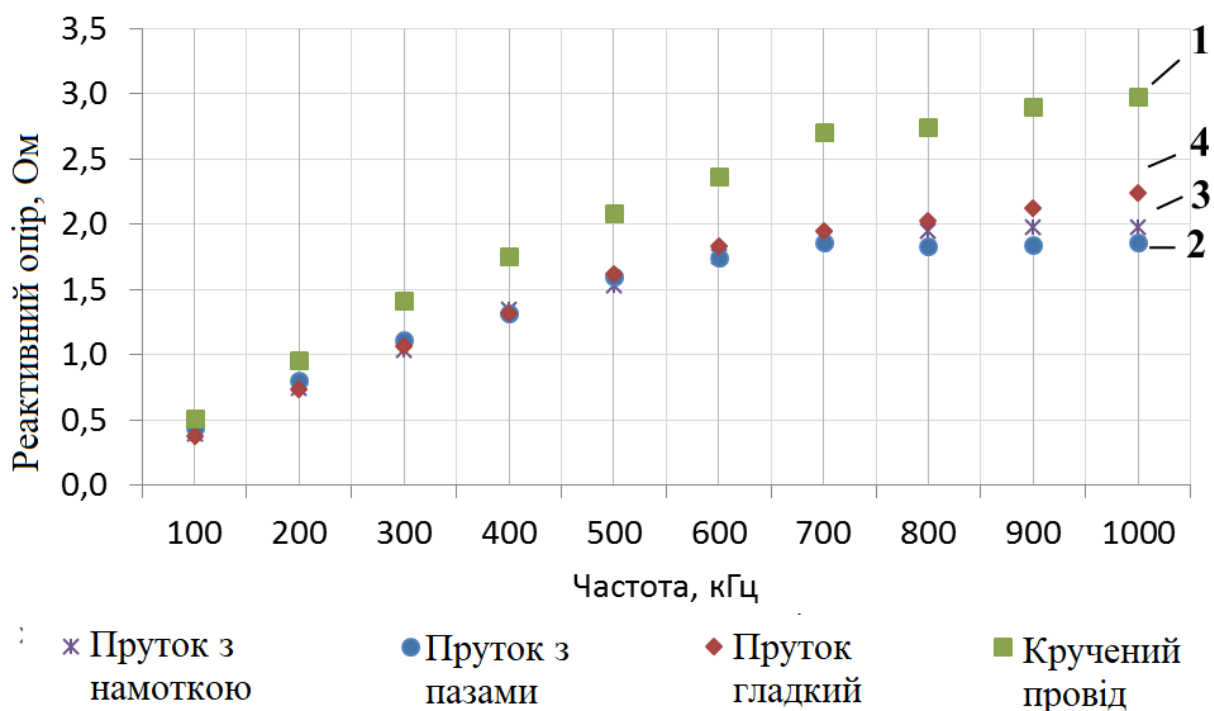


Рисунок 2.10 – Залежність реактивного опору від частоти: 1 – кручений провід; 2 – зразок прута з пазами; 3 – зразок цілого прута; 4 – зразок прута з намотуванням

Аналіз отриманих даних показав, що найбільший активний опір на грозових частотах (200-300 кГц) має кручений провід (1). Другим за зростанням опору є провід з борознами вздовж течії струму (2). А найменший скін-ефект показують цілий прут і цілий прут із намотуванням. Результати вимірювань показали, що зразки з великою кількістю нерівностей, розташованих уздовж напрямку течії, мають більш виражений скін-ефект. Це можна пояснити тим, що струм протікає неоднорідно по поверхні, очевидно під дією скін-ефекту найбільш опуклих областях поверхні підвищується щільність протікання струму, і надалі відбувається виштовхування струму в феромагнітний шар і збільшує опір. В результаті виконаної роботи з'ясовано, що найбільший опір (повний та активний) мали зразки, що мають поздовжні пази та виступи (зразки 1 і 2), що спричинило посилення скін-ефекту за рахунок підвищення щільності струму на краях зразків та «виштовхування» струму в феромагнітний матеріал. Ці висновки

сходяться з результатами раніше проведеної роботи [11] і підтверджують інформацію, що для застосування в ЧЗП необхідно досягти збільшення щільності струму, тобто сконцентрувати струм на меншій площі перерізу. Комп'ютерне моделювання, виявило, що найбільшою ефективністю має форма дроту, представлена на рис. 2.11 (а) (зростання опору в 11 000 разів на 50 Гц 0,16 мОм до 1,76 на 300 кГц), в порівнянні з круглим дротом (б) (зростання опору в 1600 разів на 50 Гц 0,19 мОм до 0,32 Ом на 300 кГц).

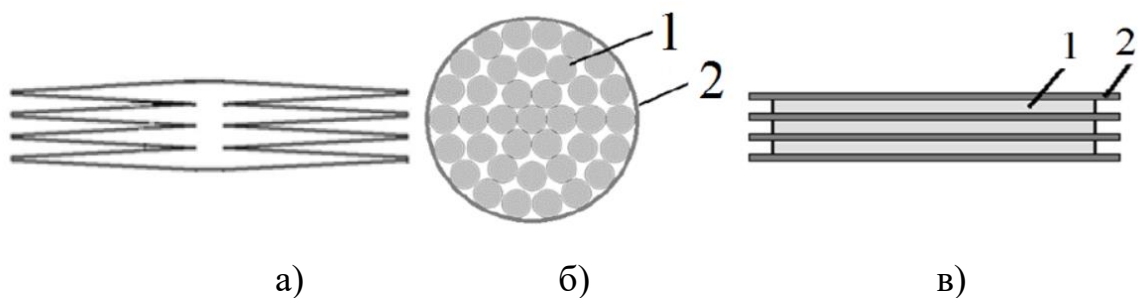


Рисунок 2.11 – Форми частотно-залежних провідників. а – найкраща форма провідника; б – кругла форма провідника; в – конструкція багатошарового провідника типу; 1 – струмопровідний провідник; 2 – ферромагнітний матеріал

Однак дана форма провідника має низьку механічну міцність і низьку технологічність як при виготовленні, так і при складанні конструкції в котушку (оскільки у формі котушки досягаються необхідні значення індуктивності, а також знижуються загальні габарити захисного пристрою). У зв'язку з цим, для підвищення технологічності та міцності проводу була запропонована форма проводу (рисунок 2.11 (в)), що представляє собою багатошарову конструкцію з шарів провідника і ферромагнітного матеріалу, що чергуються. Слід зазначити, що хоч важливість впливу форми було зазначено раніше, але дана конструкція багатошарового дроту запропонована вперше.

2.1.3 Експерименти з круглим та плоским багатошаровим зразком

Для перевірки припущення щодо ефективності запропонованої форми провідника були виготовлені макети дроту ЧЗП круглої та багатошарової плоскої конструкції (рис 2.12 та 2.13).



Рисунок 2.12 – Макет круглого провідника: а) фотографія зразка; б) схема конструкції провідника: 1 – алюмінієвий провідник, 2 – феромагнітний шар, 3 – діелектричний захисний шар



Рисунок 2.13 – Макет плоского багатошарового провідника: а) фотографія зразка; б) схема конструкції провідника: 1 – алюмінієвий провідник, 2 – феромагнітний шар

Круглий дріт ЧЗП є тришаровим коаксіальним проводом (рисунок 2.12). Внутрішній шар – алюмінієвий дріт А-95, площею перерізу 95 мм^2 (такий переріз використовується в Україні для ПЛ 35 кВ), на нього нанесений шар феромагнітної стрічки завтовшки 0,3 мм. Третій, зовнішній шар – термоусадкова трубка ТУТ, яка захищає феромагнітний шар від зовнішніх механічних та кліматичних впливів. Плоский багатошаровий макет

провідника, показаний на рис. 2.13, складався з 6 шарів алюмінієвого провідника, що чергується із сімома шарами феромагнітної стрічки 5БДСР. Кожен шар провідника мав товщину 0,3 мм та ширину 50 мм, товщина феромагнітних шарів також становила 0,3 мм, а ширина становила 60 мм. Через різну ширину феромагнітний матеріал виступав по краях на 5 мм з кожного боку. Це мало підвищити ефективність з допомогою проходження частини струму в тонкому феромагнітному шарі. Для збереження форми макета використовувалися стискаючі конструкції з фанери. У майбутньому її планувалося замінити на більш зручну і ергономічну діелектричну конструкцію. Обидва дроти мали алюмінієву струмопровідну частину довжиною 0,7 метра. Площа перерізу жили в обох схемах була однаковою та становила 95 мм².

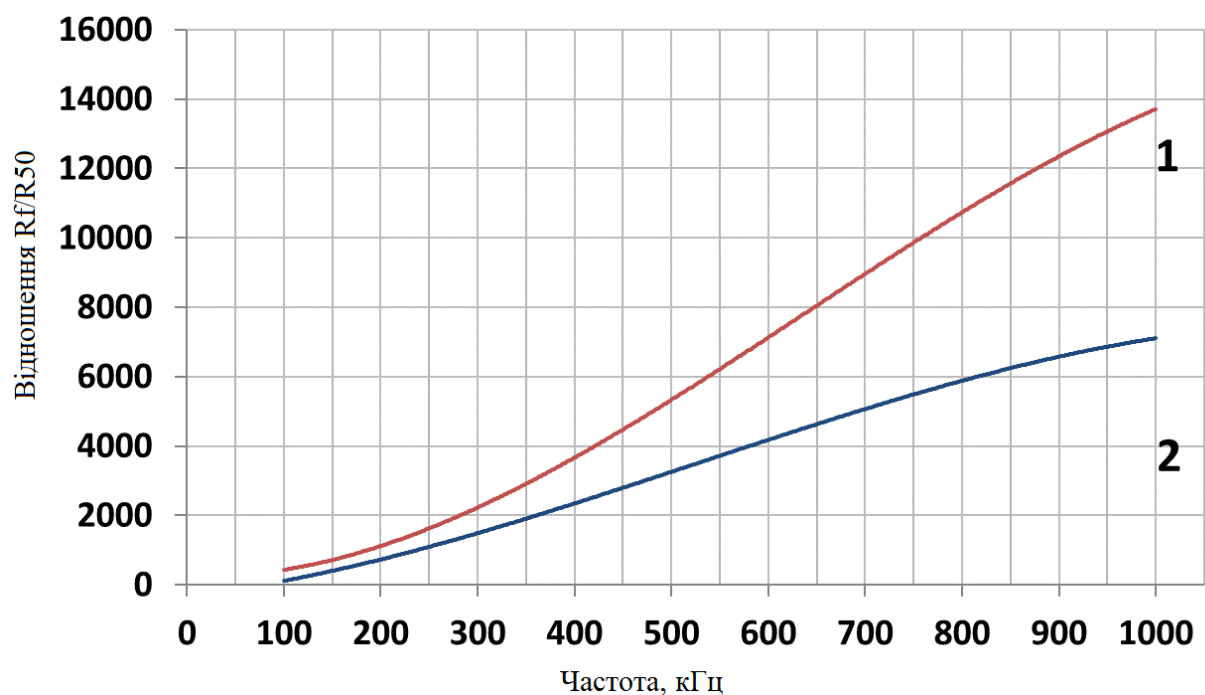


Рисунок 2.14 – Результати випробувань: 1 – багат шаровий провідник;
2 - круглий провідник

Порівняння зростання активного опору макетів провідника ЧЗП з проводом круглого перерізу та макета ЧЗП з багат шаровим провідником (рис. 2.14) показало, що останній показує високе зростання активного опору

зі збільшенням частоти сигналу. На рис. 2.14 показано, що на грозових частотах (200–300 кГц) ефективність багатошарового зразка на 20–30% вища. При високочастотних комутаційних перенапругах (~1 МГц) активний опір багатошарового зразка більш ніж в 1,7 рази перевищує опір круглого зразка.

2.1.4 Експерименти із зміною числа шарів провідника

Були проведені низьковольтні експерименти з оцінкою впливу кількості шарів провідника. Ідея була в тому, щоб оцінити, як ефект близькості впливатиме на зростання активного опору в плоских багатошарових провідниках. Для цього було виготовлено чотири зразки з різним числом шарів. Узагальнена схема зразка з трьома шарами представлена рис. 2.15.

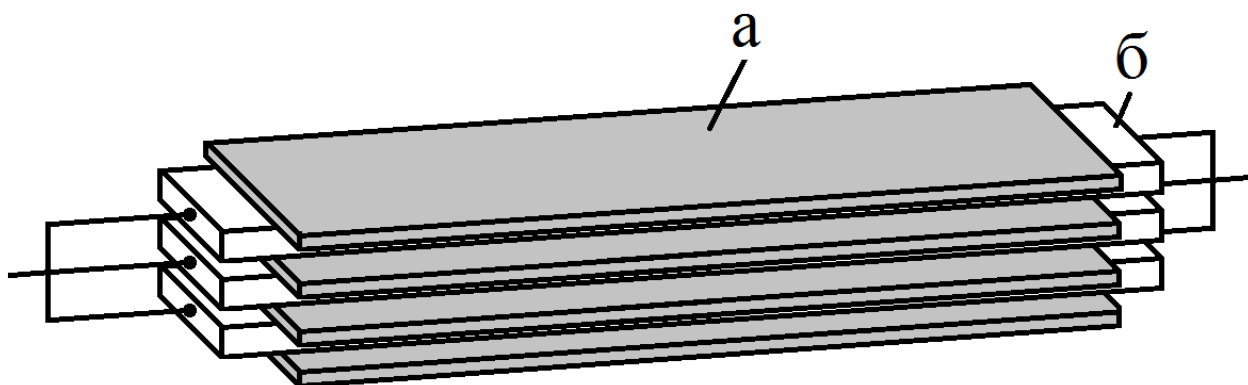


Рисунок 2.15 – Схема зразка із трьома шарами провідника:

а – феромагнітний матеріал; б – провідний матеріал

Зразки є мідними стрічками (рисунок 2.15 б) довжиною 320 мм, шириною 8 мм, товщиною 0,25 мм, з'єднані паралельно між собою по краях провідника. Між провідниками розташовувався феромагнітний шар, зібраний з феромагнітних стрічок (рис. 2.15 а) довжиною 300 мм, шириною 10 мм та товщиною 0,025 мм. Повна товщина феромагнітного шару між провідниками становила 0,075 мм. Для забезпечення цілісності конструкції, краї мідних

стрічок були спаяні, а макети поміщені в термозбіжну трубку (трубка термозбіжна негорюча ТУТнг-25/12.5). Для забезпечення щільного притискання феромагнітного шару до провідника зразки поміщалися між 2 листами оргскла фіксація забезпечувалася поліамідними гвинтами і гайками, сила притискання дорівнювала 4 Н. Всього було зроблено три зразки, з 1, 3, 5 і 15 шарами мідної стрічки. Результати вимірів показані на рис. 2.16-2.17.

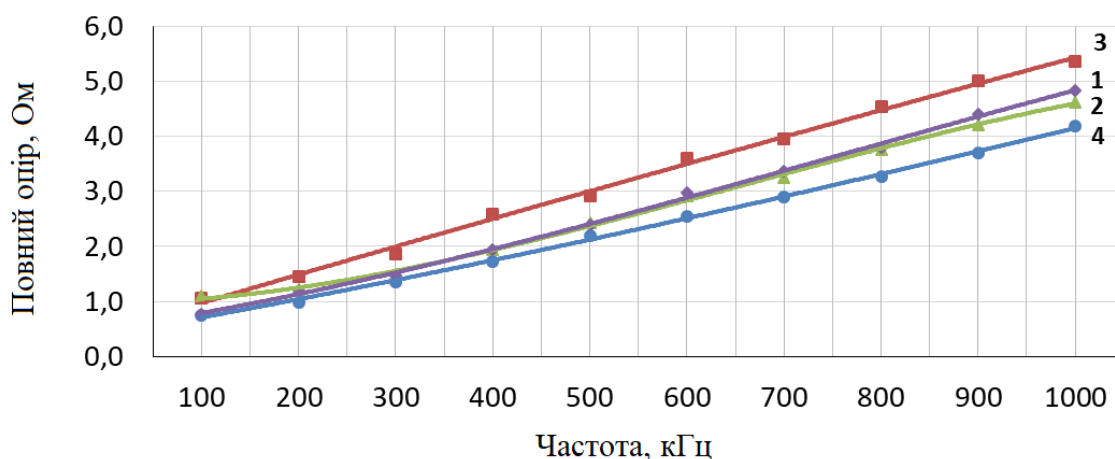


Рисунок 2.16 – Повний опір зразків: 1 – п'ятнадцять смуг провідника, 2 – п'ять смуг, 3 – три смуги, 4 – одна смуга

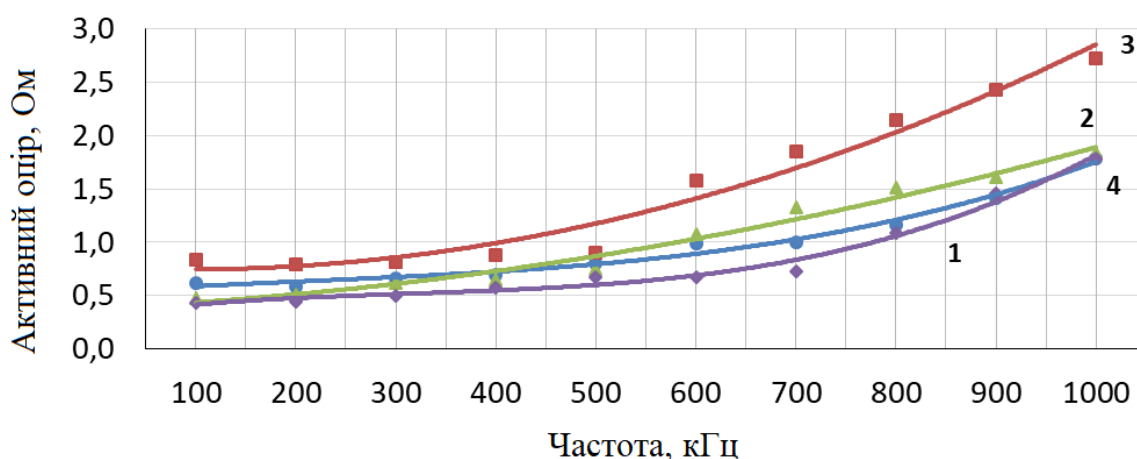


Рисунок 2.17 – Активний опір зразків: 1 – п'ятнадцять смуг провідника, 2 – п'ять смуг, 3 – три смуги, 4 – одна смуга

Також було проведено оцінку зростання величини активного опору по відношенню до опору зразків на частоті 50 Гц (рисунок 2.18).

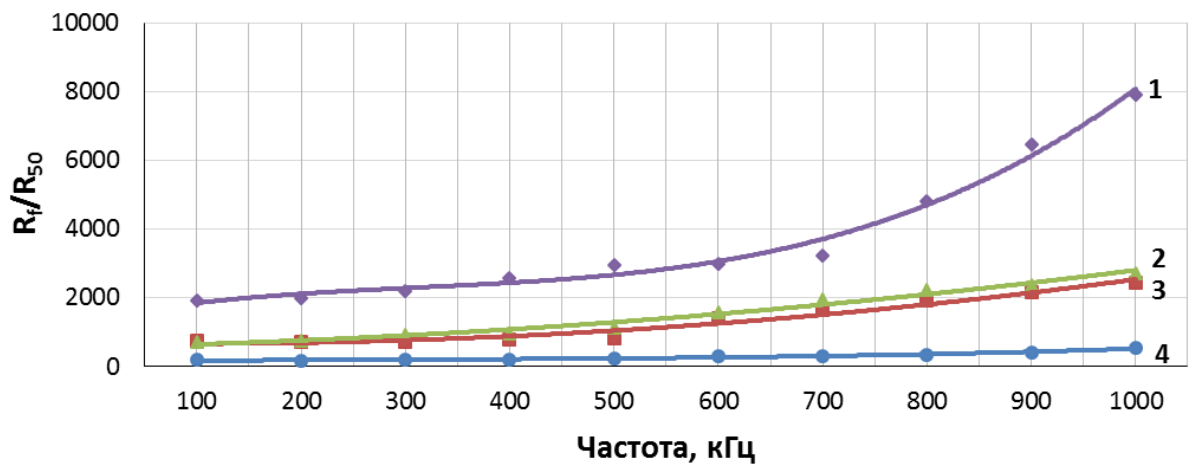


Рисунок 2.18 – Зростання активного опору зразків: 1 – п'ятнадцять смуг провідника, 2 – п'ять смуг, 3 – три смуги, 4 – одна смуга

Як видно з отриманих рисунків в абсолютних значеннях, найкращі результати показує зразок з трьома шарами провідника. Але водночас відносне зростання активного опору більше у зразка з п'ятнадцятьма шарами. Це можна пояснити тим, що в багатошарових провідниках найближчі провідники діють, один на одного збільшуючи зміщення струму до крайніх шарів, проте цей ефект, судячи з усього, має найбільший вплив, при малій кількості шарів провідника і зі зростанням їх кількості компенсується зменшенням загального опору зразка.

2.1.5 Розрахунок впливу параметрів «Товщина/ширина провідника/кількість шарів провідника»

Слід зазначити, що одночасно проводилися комп'ютерні розрахунки залежностей «кількість шарів провідника – товщина провідника – ширина провідника» визначення залежностей впливу параметрів феромагнітного шару та габаритів провідника, а також виявлення найбільш оптимальних

параметрів ЧЗП. У комп'ютерній програмі зразок є нескінченним дротом, що складається з шарів провідника і феромагнетика. Згорнутий у квадратну котушку зі стороною 1000 мм п'ять витків. Товщина феромагнітного шару у всіх розрахунках становить 0,075 мм, ширина збігається із шириною провідника. Сумарна площа перерізу провідника 35 мм², частота сигналу, що подається 300 кГц. Базовим був узятий зразок, що представляє 7 шарів провідника, завтовшки 0,5 мм, шириною 30 мм. Результати розрахунків показані на рис. 2.19 – 2.21. Для зручності під кожним графіком представлено таблицю отриманих значень (таблиці 2.1 – 2.3). Де I – ширина провідника, h – товщина одного прошарку провідника.

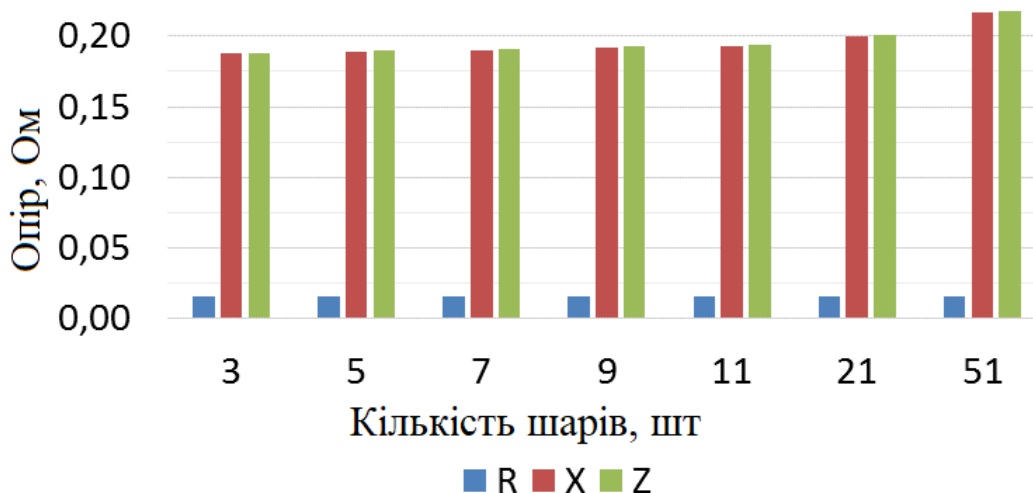


Рисунок 2.19 – Вплив відношення «Товщина провідника/кількість шарів» на опір зразків при ширині провідника = 30 мм

Таблиця 2.1 – Вплив відношення «Товщина провідника/кількість шарів» на опір зразків при ширині провідника = 30 мм

п, кільк	3	5	7	9	11	21	51
h, мм	1,17	0,7	0,5	0,39	0,32	0,167	0,069
R, мОм	15	15	16	16	16	16	15
X, мОм	188	191	191	192	193	200	217
Z, мОм	189	192	192	193	194	201	218

З рисунку 2.19 і таблиці 2.1 видно, що з однієї й тієї ширини, зміна кількості шарів мало впливає активний опір, але водночас, більша кількість тонких шарів веде до зростання реактивного і повного опорів.

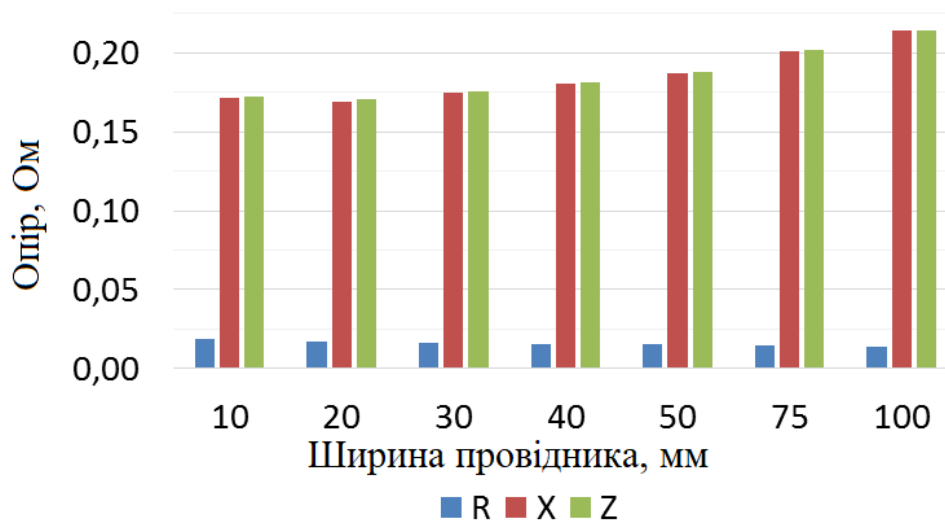


Рисунок 2.20 – Вплив відношення «Товщина провідника/ширина провідника» на опір зразків при кількості шарів провідника = 7 шт.

Таблиця 2.2 – Вплив відношення «Товщина провідника/ширина провідника» на опір зразків, при кількості шарів провідника = 7 шт

l, мм	10	20	30	40	50	75	100
h, мм	1,5	0,75	0,5	0,375	0,3	0,200	0,150
R, мОм	19	17	16	16	15	15	14
X, мОм	171	170	175	181	187	201	214
Z, мОм	172	171	176	182	188	202	215

Як видно з рис. 2.20 та таблиці 2.2, зміна відношення ширини провідника та товщини досить сильно впливає на зміну реактивного та повного опорів (зростання цих опорів близько 25 %), у той же час, при малій ширині провідника (10 мм) та великій товщині (1,5 мм) активний опір помітно більший, ніж при ширших, але тонких провідників до 30%. Це

говорить про те, що при створенні плоского дроту, необхідно віддати перевагу вужчому виконанню провідника, але більшої товщини.

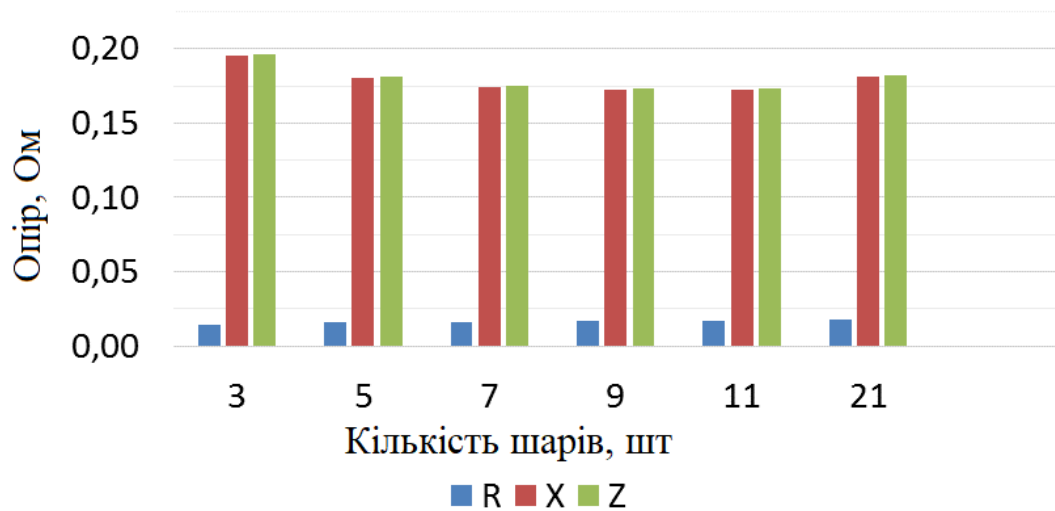


Рисунок 2.21 – Вплив відношення «Ширина провідника/кількість шарів» на опір зразків при товщині провідника = 0,5 мм

Таблиця 2.3 – Вплив відношення «Ширина провідника/кількість шарів» на опір зразків при товщині провідника const=0,5 мм

п. кільк	3	5	7	9	11	21
l, мм	70	42	30	23,3	19,1	10
R, мОм	15	16	16	17	17	18
X, мОм	196	180	175	172	172	181
Z, мОм	197	181	176	173	173	182

З рис. 2.21 та таблиці 2.3 видно, що при одній і тій же товщині шару провідника кількість шарів збільшує зростання активного опору, у той час як у повного та реактивного опору спостерігається провал у районі 9-11 шарів, що відповідає ширині 25-20 мм. Можна відзначити, що істотного впливу на зростання активного опору товщина феромагнітного шару не надає, а тому він вибирався виходячи з інших оцінок.

2.1.6 Експерименти з різною орієнтацією провідника у макеті

Наступним кроком було вирішено вивчити вплив орієнтації плоского провідника на ефективність пристрою. Один із найпростіших способів укладання плоского провідника великої довжини, є скручування його в спіраль. Крім зменшення габаритів пристрою та підвищення індуктивності пристрою, даний спосіб може збільшити ефективність дроту ЧЗП, за рахунок магнітного поля котушки. Для оцінки ефективності змотування в спіраль були проведені експерименти з тришаровими зразками (три шари мідного провідника завтовшки 0,2 мм, товщина феромагнітного шару 0,3 мм) завдовжки 6 метрів. Згортання в котушку проводилося двома способами: у першому випадку площина, в якій розташовуються шари перпендикулярна лініям магнітного поля котушки (рис. 2.22 (а)). А в другому випадку, площина, вздовж якої розташовувалися шари проводу, була паралельна осі котушки (рис. 2.22 (б)). Результати вимірів представлені на рис. 2.23 – 2.25.

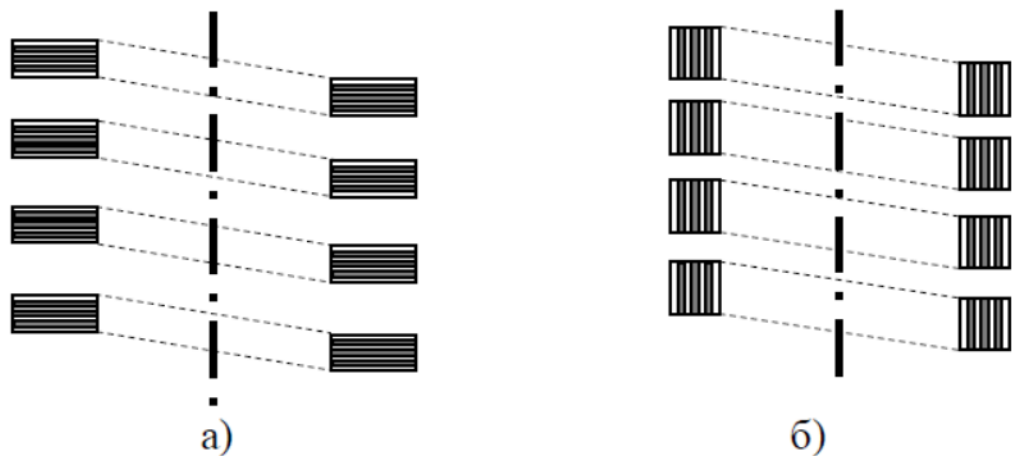


Рисунок 2.22 – Розташування шарів провідника щодо осі котушки:

а) – перпендикулярно до осі; б) – паралельно осі

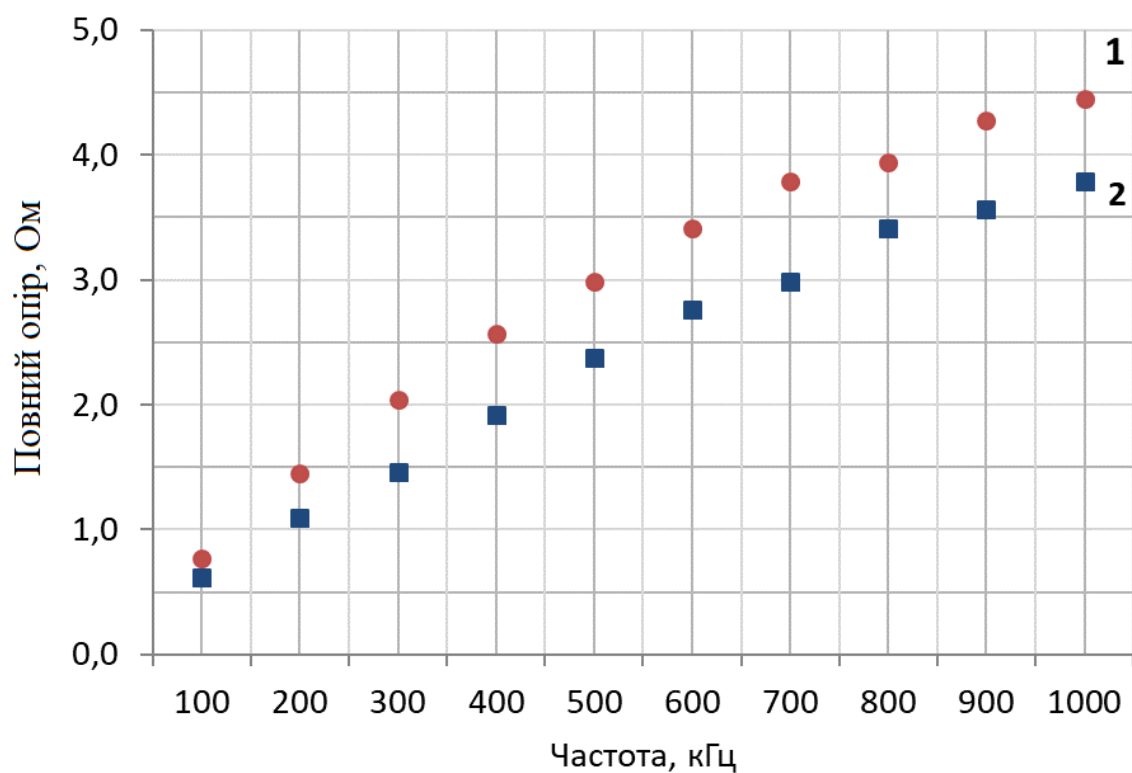


Рисунок 2.23 – Повний опір макетів: 1 – шари перпендикулярні до осі котушки; 2 – шари паралельні осі

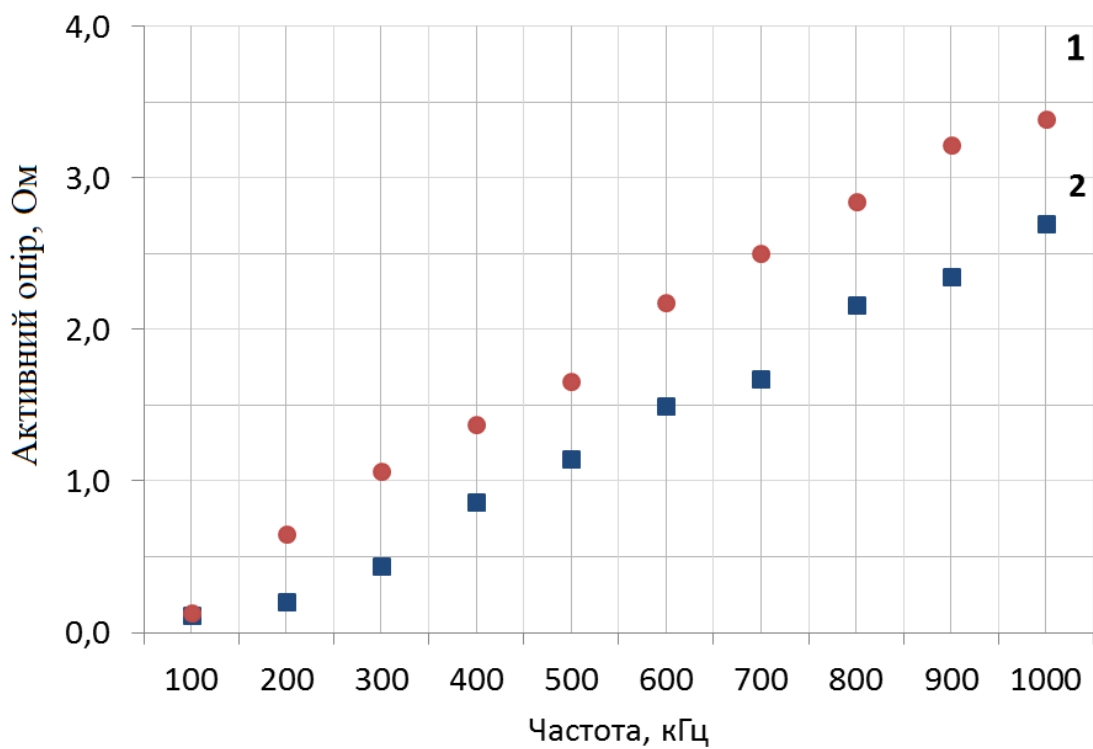


Рисунок 2.24 – Активний опір макетів: 1 - шари перпендикулярні до осі котушки; 2 – шари паралельні осі

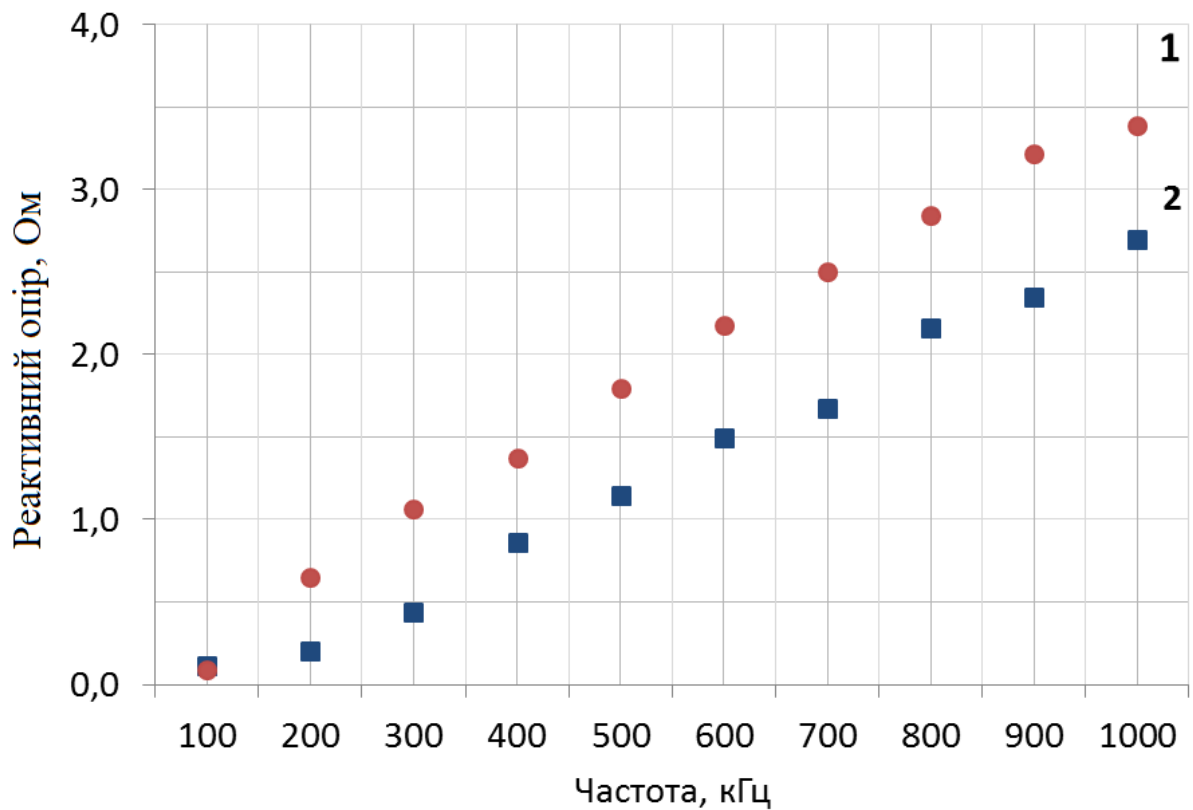


Рисунок 2.25 – Реактивний опір макетів: 1 – шари перпендикулярні до осі котушки; 2 – шари паралельні осі

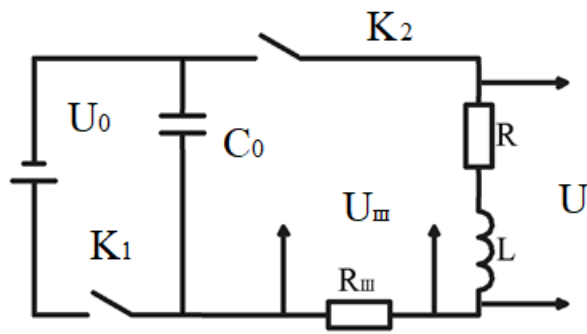
Отримана різниця в 10-15% досягається лише при 3 витках. При збільшенні кількості витків, як наслідок і магнітного поля, ефективність можна буде підвищити на 50-60 %. Це, у свою чергу, дозволить зменшити габарити ЧЗП.

2.2 Випробування на імпульсній напрузі

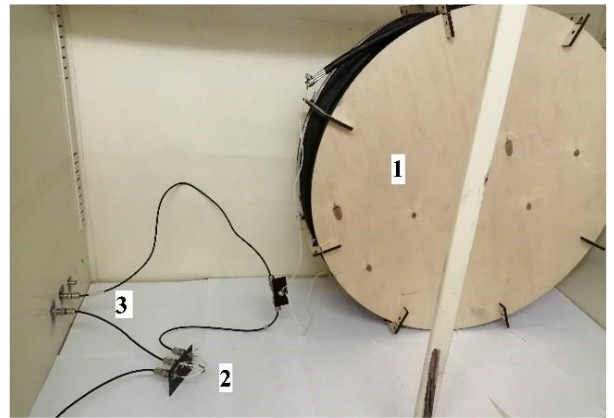
2.2.1 Експериментальна установка

Для імпульсних експериментів застосовувалася наступна схема вимірювання, що складається з двох електричних ланцюгів із загальним конденсатором: один, що заряджає ланцюг, що складається з послідовно з'єданого джерела постійного струму, ключа К1 і конденсатора С0; – другий, вимірювальний ланцюг, що складається з конденсатора С0, ключа

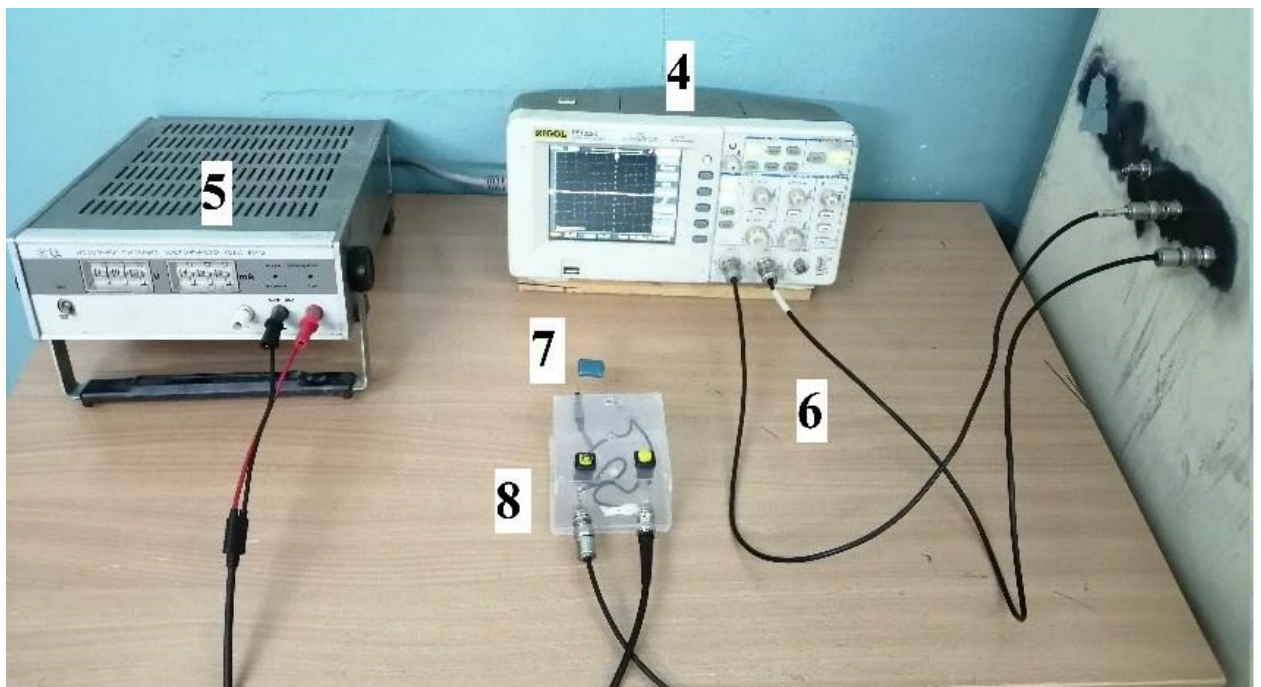
K_2 , шунта R_{III} (0,5 Ом) і зразка ЧЗП, що має випробування, має опір R і індуктивність L . Процес вимірювання був двоетапний процес. Спочатку проводилася зарядка конденсатора C_0 при замкнутому ключі K_1 і розімкнутому ключі K_2 .



а)



б)



в)

Рисунок 2.26 – Схема імпульсних вимірювань: а) принципова схема; б) фактична схема у шафі; в) вимірювальна схема зовні шафи. Тут: 1 – зразок ЧЗП; 2 – малоіндуктивний шунт (3 Ом); 3, 6 – сполучні кабелі; 4 –

осцилограф; 5 – джерело напруги; 7 – конденсатор; 8 – ключі для замикання схеми заряджання та схеми вимірювання

Після зарядки ключ К1 розмикався (для ізолювання джерела живлення) та замикався ключ К2, який замикав контур другого ланцюга та створював замкнутий коливальний контур.

Для вимірювання напруги на шунтувальному опорі ($U_{ш}$) та зразку (U), застосовувався осцилограф (Rigol 1022C). $U_{ш}$ та U – щупи осцилографа, які фіксували падіння напруги на $R_{ш}$ та R відповідно.

Для вимірювання використовувалися керамічні конденсатори з різними номіналами ємностей, що дозволяло досягти аперіодичних коливальних імпульсів різної частоти. Частота коливального процесу, що утворюється, в системі залежить від включених в ланцюг елементів і була індивідуальна для кожного зразка. Отримані форми імпульсів зберігалися у пам'яті осцилографа подальшої обробки.

2.2.2 Методика вимірювання

Для визначення активного опору ЧЗП застосовувався спосіб, заснований на визначенні добротності коливального контуру Q , що складається із зразка ЧЗП, ємності та шунтуючого опору.

Широко відомо, що добротність контуру залежить від включених до нього елементів, та у разі наявності послідовних R , L , C елементів має вигляд (2.4):

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.4)$$

де: R – активний опір контуру (сума опорів зразка, шунта і контактних опорів $R_{зр}$, $R_{шунт}$, $R_{конт}$);

C – ємність контуру (вважатимемо що основною ємнісною складовою є включена ємність із відомим нам номіналом C_0);

L – індуктивність контуру (оскільки котушки мають свідомо велику індуктивність ніж провідники схеми, можна вважати, що індуктивність повністю залежить від індуктивності зразків L_{zp}).

З формули Томсона для періоду коливального контуру (2.5):

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (2.5)$$

Знаючи період коливань та ємність, можна визначити індуктивність контуру:

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2 C} \quad (2.6)$$

Тоді з (2.4) та (2.6):

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{T^2}{4\pi^2 C^2}} = \frac{T}{2\pi RC} \quad (2.7)$$

Тоді R :

$$R = \frac{T}{2\pi QC} \quad (2.8)$$

Добротність контуру можна переділити через коефіцієнт загасання (2.9):

$$Q = \frac{\pi}{\gamma T} \quad (2.9)$$

$$\gamma = \frac{1}{\tau} \quad (2.10)$$

де: τ – час згасання коливань чи інтервал часу, протягом якого амплітуда коливань зменшується в $e \approx 2,7$ разів;

Тоді з (2.8), (2.9) та (2.10) опір контуру:

$$R = \frac{T^2}{2\pi^2\tau C} \quad (2.11)$$

Віднімаючи з отриманого опору значення опору шунта, отримували опір зразка.

У ручному режимі вимірювався зсув фаз між піками напруги та струму та період коливань T . Далі з вершин гармонік будувався графік загасання коливань і визначався інтервал часу τ , протягом якого амплітуда коливань зменшується у 2,7 раза. За значенням τ та періодом коливань T розраховувалися значення добротності коливального контуру Q .

2.2.3 Результати вимірювань

Нижче наведено номінали використаних ємностей та відповідність одержаних частот коливальних процесів для зразків (таблиця 2.4).

Таблиця 2.4 – Номінали ємностей та відповідність частоти вхідного сигналу

С, нФ	2000	1000	680	100	47	33	22	10
Частота, ЧЗП з круглим провідником, кГц	10	15	23	63	91	111	143	200
Частота, макет силового реактора, кГц	19	27	35	83	125	149	189	250
Частота, ЧЗП з одношаровим плоским провідником, кГц	9	15	17	56	83	100	111	-
Частота, ЧЗП з плоским багатошаровим провідником, кГц	44	73	100	278	435	526	667	-

На рис. 2.27 наведено приклади отриманих осцилограм

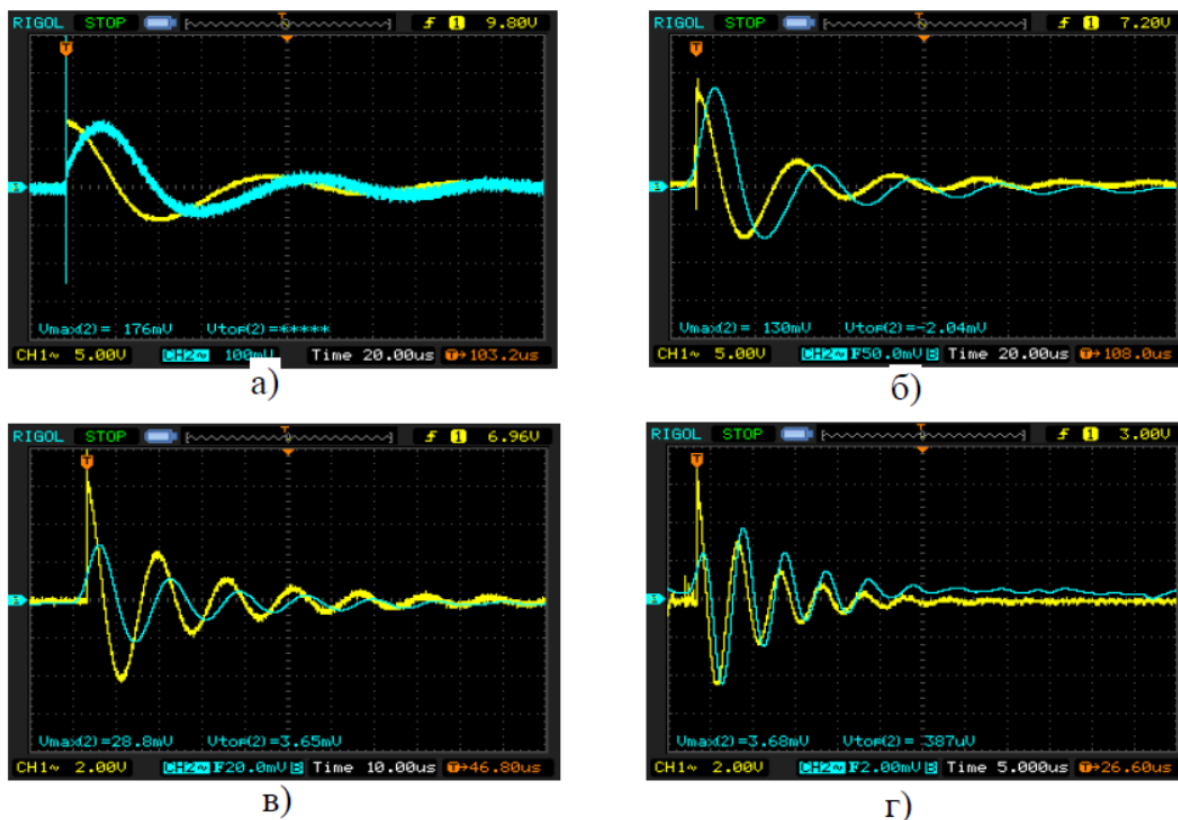


Рисунок 2.27 – Приклади отриманих осцилограм на зразку ЧЗП з круглим провідником при різних ємностях: а) 2 мкФ; б) 680 нФ; в) 100 нФ; г) 10 нФ.

На рис 2.28 подано залежності активного опору від частоти після обробки результатів вимірювань.

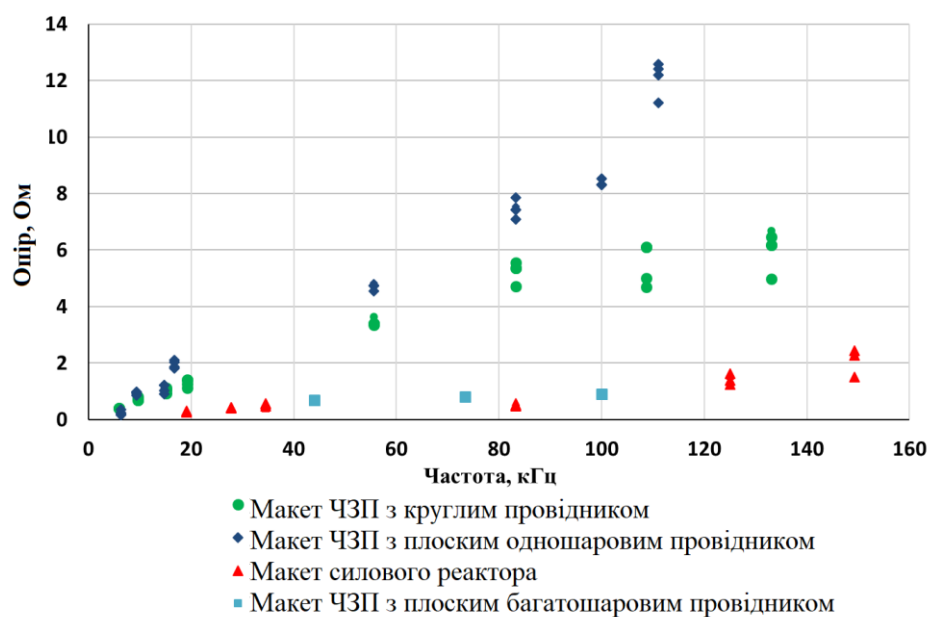


Рисунок 2.28 – Опір зразків на різних частотах

Після приведення отриманих даних до 1 метра довжини провідника були отримані наступні результати, представлені на рис. 2.29.

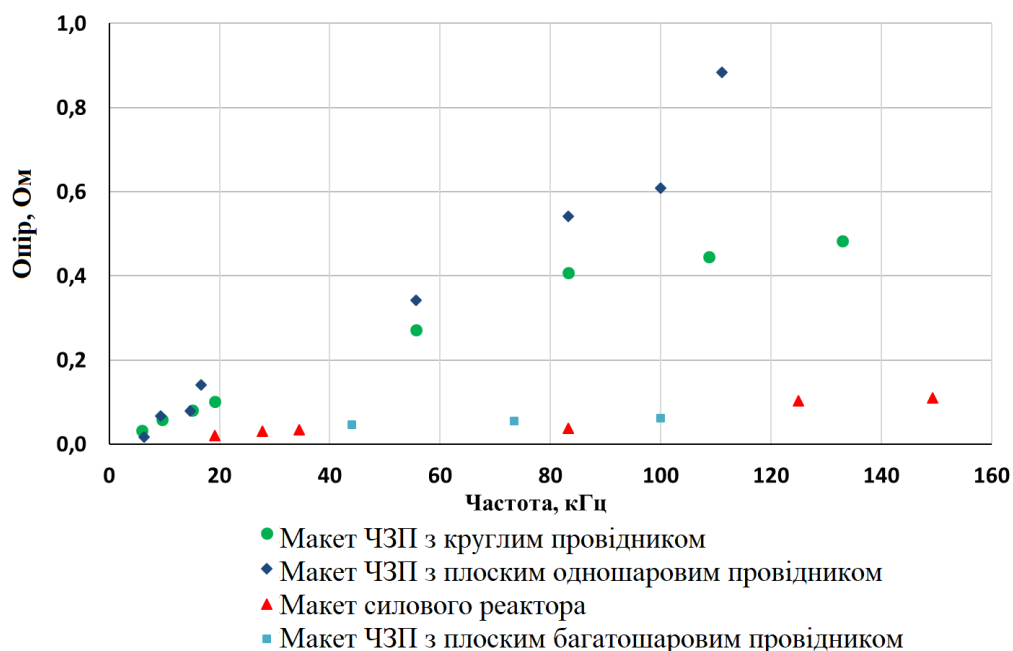


Рисунок 2.29 – Опір зразків на різних частотах, приведений до 1 метра

Також для підтвердження отриманих тенденцій було проведено серію вимірювань зразків за допомогою RLC-метра АМ-3002. на 5 частотах (100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц). Отримані результати вимірювання опору та індуктивності зразків представлені на рисунках 2.30, 2.31 та таблиці 2.5.

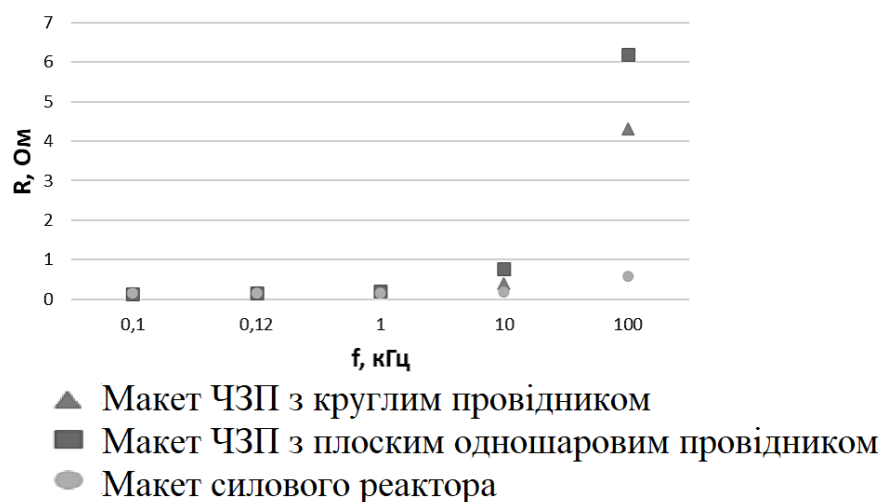


Рисунок 2.30 – Активний опір зразків ЧЗП

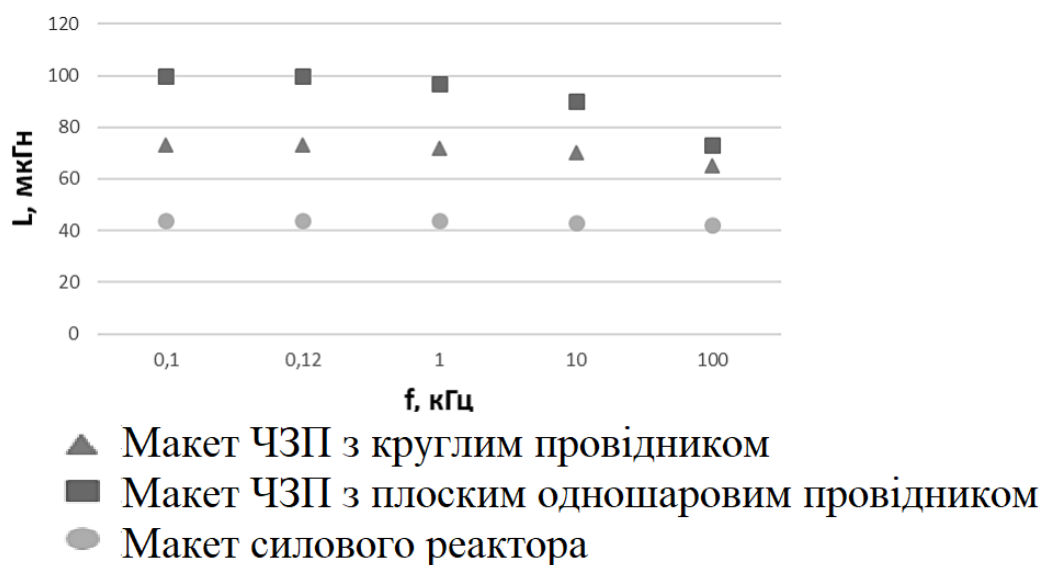


Рисунок 2.31 – Індуктивність зразків ЧЗП

Таблиця 2.5 – Результати вимірювань RLC-метром

ЧЗП з круглим провідником				
f, кГц	L, мкГн	R, мОм	C, мкФ	Q
0,1	73	0,16	34760	0,3
0,12	73	0,16	24090	0,4
1	72	0,18	350	2,6
10	70	0,39	4	10
100	65	4,32	0,039	11
ЧЗП з плоским одношаровим провідником				
f, кГц	L, мкГн	R, мОм	C, мкФ	Q
0,1	100	0,14	25440	0,4
0,12	100	0,15	17590	0,5
1	97	0,20	260	3,1
10	90	0,76	3	7
100	73	6,2	0,034	8
Макет силового реактора				
f, кГц	L, мкГн	R, мОм	C, мкФ	Q
0,1	44	0,15	57860	0,1
0,12	44	0,15	40220	0,2
1	44	0,15	581,9	1,8
10	43	0,18	6	15
100	42	0,59	0,06	45

Жирним виділено опору на частотах 100 Гц і 100 кГц, як видно у ЧЗП з круглим провідником зростання опору відбувається практично в 27 разів, а у ЧЗП з плоским одношаровим провідником у 40 разів, макет силового реактора опір зріс у 4 рази. При цьому індуктивність зразка практично не змінюється. Зіставлення даних, показує, що отримані в результаті імпульсних вимірювань значення опорів були близькі, але все ж таки дещо вище в порівнянні з RLC вимірюваннями. Швидше за все, це може бути пов'язане з опорами іскри та контактів, які не враховувалися у розрахунку активного опору зразків ЧЗП. Результати імпульсних вимірювань показують, що конструкція ЧЗП з плоским багатошаровим проводом поступається зростання активного опору ЧЗП з круглим проводом, отже, необхідно вносити зміни в конструкцію плоского проводу. Було запропоновано одне з рішень: зменшення ширини провідного шару, щоб феромагнітні шари утворювали виступаючі краї, це має підвищити ефективність ЧЗП із плоским багатошаровим проводом. Було підтверджено, що застосування конструкції ЧЗП з плоским одношаровим провідником, виконаним струмопровідними шинами, дозволяє підвищити зростання активного опору щодо ЧЗП з круглим провідником. Також слід відзначити низьку ефективність зразка без феромагнітної стрічки (макета силового реактора) порівняно з ЧЗП з круглим і плоским одношаровим провідниками, малий опір не дозволить знижувати амплітуду імпульсу. Це може говорити про малу ефективність застосування силових ректорів без додаткових пристроїв як захисне обладнання, порівняно із застосуванням будь-якої конструкції ЧЗП.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У результаті роботи з 2 розділу:

- 1) показано, що застосування конструкції, в якій площини плоского провідника знаходиться перпендикулярно магнітним полям котушки, дозволяє підвищити ефективність ЧЗП в порівнянні з іншою орієнтацією;
- 2) показано високу ефективність застосування плоского одношарового провідника в котушці ЧЗП порівняно з круглим провідником;
- 3) не виявлено ефективного придушення імпульсних сигналів макетом силового реактора.

ВИСНОВКИ

У ході магістерської роботи отримано основні результати:

1. Проведено аналіз результатів моніторингу роботи ЧЗП в умовах дослідної експлуатації на підстанції, що виявила високу ефективність захисту від високочастотних перенапруг.
2. Показана висока ефективність ЧЗП у придушенні зрізаних та імпульсів зворотного перекриття імпульсів.
3. Проведено порівняння різних способів підвищення активного високочастотного опору ЧЗП та показано, що управління формою провідника є найбільш ефективним способом підвищення активного опору захисного пристрою.
4. Показано, що зі зростанням амплітуди струму знижується активний опір зразків ЧЗП, при струмах до 1,2 кА опір падає незначно, багаторазово перевищуючи опір провідника без феромагнітного матеріалу.
5. Показано, що активний опір зразків ЧЗП на більш високих частотах меншою мірою залежить від значень струму, що протікає.
6. Проведено розрахунки та аналіз впливу геометричних параметрів частотнозалежного пристрою, що дозволяють провести оптимізацію конструкції пристрою для повітряних ліній 35 кВ та 110 кВ.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Liljestränd L., Lindell E. Efficiency of surge arresters as protective devices against circuit-breaker-induced overvoltages // IEEE Transactions on power delivery. – 2016. – Vol. 31. № 4. – P. 1562-1570.
2. Costea M., Nicoara B. The Effects of Lightning Induced Overvoltages on Low Voltage Power Networks // IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th - July 2nd. – Bucharest, Romania. – 2009. – P. 1-6.
3. Aravanis T.I., Pyrgioti E.C., Gonos I.F. Lightning-induced Overvoltages in the Hellenic Electricity Distribution Network // 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE Lightning-induced Overvoltages in the Hellenic Electricity Distribution Network). – Chengdu, China. – 2016. – P. 1-4.
4. Hayashi T., Mizuno , Naito K. Study on Transmission-Line Arresters for Tower With High Footing Resistance // IEEE Transactions on power delivery. – 2008. – Vol. 23. № 4. – P. 2456-2460.
5. Kolano R., Kolano-Burian A., Polak M., Szynowski J. Application of Rapidly Quenched Soft Magnetic Materials in Energy-Saving Electric Equipment // IEEE Transactions on magnetics. – 2014. – Vol. 4. № 50. – P. 1-4.
6. Tomomi N., Takeshi Y., Azuma M., Eiichi Z., Masaru I. Observation of Current Waveshapes of Lightning Strokes on Transmission Towers // IEEE Transactions on power delivery. – 2000. – Vol. 15. № 1. – P. 429-435.
7. Mikropoulos P.N., Tsovilis T.E. Estimation of Lightning Incidence to Overhead Transmission Lines // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – Vol. 25. № 3. – P. 1855-1865.
8. Mikropoulos P.N., Tsovilis T.E. Statistical method for the evaluation of the lightning performance of overhead distribution lines // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – Vol. 20. № 1. – P. 202-211.

9. Holmquist J.R., Jones R.W. Reducing the effects of lightning in cogeneration plants // IEEE Industry Applications Magazine. – 2001. – Vol. 7. № 5. – P. 20-29.
10. Takami J., Okabe S. Observational Results of Lightning Current on Transmission Towers // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22. № 1. – P. 547-556.
11. Wang J., Mi, Li X., Zhang Cai. Effects of Surge Protective Devices on Overhead Power Line Induced Voltage from Natural Lightning // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2013. – Vol. 55. № 6. – P. 1201-1209.
12. He, Wang X., Yu Z., Zeng R. Statistical Analysis on Lightning Performance of Transmission Lines in Several Regions of China // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30. № 3. – P. 1543-1551.
13. Aranguren D., Soto E.A., Pérez, Torres H. Lightning Voltages Measurements on an Energized Distribution Line in Colombia // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2020. – Vol. 64. № 4. – P. 1219-1224.
14. Soares A., Schroeder M.A., Visacro S. Transient voltages in transmission lines caused by direct lightning strikes // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20. № 2. – P. 1447-1452.
15. Mahmood F., Lehtonen M., Nehmdoh S.A. Probabilistic Risk Assessment of MV Insulator Flashover Under Combined AC and Lightning-Induced Overvoltages // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30. № 4. – P. 1880-1888.
16. Cervantes M., Kocar I., Montenegro A., Goldsworthy D.L., Tobin T., Mahseredjian J., Ramos R., Martí J.R., Noda T., Ametani A., Martin C. Simulation of Switching Overvoltages and Validation With Field Tests // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2018. – Vol. 33. № 6. – P. 2884-2893.
17. Alstom Grid Worldwide Contact Centre. NETWORK PROTECTION & AUTOMATION. Alstom Grid, 2011. – № 16-3 – pp.508.

18. Larin V.S., Matveev D.A., Zhuikov A.V. A Study of Transferred Overvoltages on the Secondary Windings of Station Service Voltage Transformers // Russian Electrical Engineering. – 2018. – № 89. – P. 313-317.

19. Larin V.S., Matveev D.A., Zhuikov A.V., Kubatkin M.A., Nikulov I.I. Resonance Overvoltages in Primary Winding of a Station Service Voltage Transformer // Russian Electrical Engineering. – 2018. – № 89. – P. 490-495.

20. Kumar U., Hegde V., Shivanand V. Preliminary Studies on the Characteristics of the Induced Currents in Simple Down Conductors Due to a Nearby Lightning Strike // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2006. – Vol. 48 № 4. – P. 805-816.