

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2023 р.

**Кваліфікаційна робота
магістра**

на тему Розробка заходів з покращення електромагнітної сумісності
обладнання електричної підстанції

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКМ-22
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____ **Андрій САМОЙЛЕНКО**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник _____ **к.т.н., доц., М. РОМАНЮК**

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ **Е. НЕМЦЕВ**

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

_____ (дата)

_____ (дата)

ЛУЦЬК – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

«_____» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Андрію САМОЙЛЕНКУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Розробка заходів з покращення електромагнітної сумісності обладнання електричної підстанції

керівник роботи _____ Микола РОМАНЮК, канд. техн. наук, доцент
 (ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 11 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Характеристики підстанції: генератор 1: потужність – 42 МВА, опір – 0,18 в.о.; генератор 2: потужність – 20 МВА, опір – 0,15 в.о.; трансформатор 1: потужність – 40 МВА, напруга КЗ – 8%; трансформатор 2: потужність – 63 МВА, напруга КЗ – 10%; трансформатор 3: потужність – 63 МВА, напруга КЗ – 10%; трансформатор 4: потужність – 16 МВА, напруга КЗ – 9,2%; довжина ЛЕП: перша – 150 м, друга – 30 м, опір реактора – 0,2 в.о. Максимальне навантаження – 36 МВА, значення коефіцієнта потужності – 0,85. Базова потужність – 1000 МВА. Питомий опір повітряної лінії – 0,35 Ом/км. Власний час відключення вимикачів – 0,02 с. Площа підстанції: $40 \times 40 = 1600 \text{ м}^2$. Найвища точка підстанції – 5м. Питомий опір верхнього шару ґрунту – 70 Ом.м. Питомий опір нижнього шару ґрунту – 80 Ом.м. Імпульсний коефіцієнт – 0,5.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд загальних відомостей про електромагнітну сумісність.
 2. Аналіз способів покращення електромагнітної сумісності на електричних підстанціях.
 3. Моніторинг і діагностика електромагнітних перешкод у реальному часі, встановлення і дотримання стандартів електромагнітної сумісності та здійснення тестування.
 4. Розрахунок окремих параметрів електромагнітної сумісності на підстанції.
 5. Моделювання електромагнітних процесів.
 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)
- Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи			
Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	М. РОМАНЮК, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЄМЦЕВ		

7. Дата видачі завдання 2 жовтня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	02.10.23 – 15.10.23	
2.	Розділ 2	16.10.23 – 29.10.23	
3.	Розділ 3	30.10.23 – 12.11.23	
4.	Розділ 4	15.04.23 – 03.12.23	
5.	Розділ 5	04.12.23 – 10.12.23	
6.			

Студент _____
(підпис)

Андрій САМОЙЛЕНКО
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Микола РОМАНЮК
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Андрій САМОЙЛЕНКО. Розробка заходів з покращення електромагнітної сумісності обладнання електричної підстанції / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі наведено загальні відомості про електромагнітну сумісність, визначена важливість її застосування на електричних підстанціях, здійснено огляд загальних проблем електромагнітної сумісності.

У другому розділі було виконано аналіз способів покращення електромагнітної сумісності на електричних підстанціях.

У третьому розділі здійснено розрахунок окремих параметрів електромагнітної сумісності на підстанції.

У четвертому розділі було здійснено моделювання електромагнітних процесів.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, електрична підстанція, екранування обладнання, пристрої активної фільтрації, якість електроенергії, заземлюючі системи, захист від перенапруг, перехідні процеси, електромагнітні перешкоди, стандарти електромагнітної сумісності, моделювання

SUMMARY

Andrii SAMOILENKO. Development of measures to improve electromagnetic compatibility of electrical substation equipment / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Lutsk, 2023.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four chapters, conclusions, a list of references and appendices.

The first chapter provides general information about electromagnetic compatibility, determines the importance of its application at electrical substations, and reviews common problems of electromagnetic compatibility.

Section two analyzed ways to improve electromagnetic compatibility at electrical substations.

In the third section, the calculation of certain parameters of electromagnetic compatibility at the substation was carried out.

In the fourth section, we modeled electromagnetic processes.

Keywords: electromagnetic compatibility, electrical substation, equipment shielding, active filtration devices, power quality, grounding systems, surge protection, transients, electromagnetic interference, electromagnetic compatibility standards, modeling

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОМАГНІТНУ СУМІСНІСТЬ	10
1.1 Основні визначення електромагнітної сумісності	10
1.2 Важливість застосування електромагнітної сумісності на електричних підстанціях	12
1.3 Огляд загальних проблем електромагнітної сумісності на підстанціях	16
1.4 Огляд літературних джерел з дослідження і покращення електромагнітної сумісності на підстанціях	21
2 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ НА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЯХ	30
2.1 Провідні методи екранування обладнання	30
2.2 Впровадження пристроїв активної фільтрації та покращення якості електроенергії	32
2.3 Зонування розміщення обладнання та оптимізація планування	35
2.4 Методи виконання заземлюючих систем	37
2.5 Використання обмежувачів для захисту від перенапруг при перехідних процесах	39
2.6 Аналіз електромагнітних перешкод за допомогою обчислювального моделювання	41
2.7 Моніторинг і діагностика електромагнітних перешкод у реальному часі	43
2.8 Встановлення і дотримання стандартів електромагнітної сумісності та здійснення тестування	45

	7
2.9 Переоснащення та модернізація підстанцій	47
3 РОЗРАХУНОК ОКРЕМИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ НА ПІДСТАНЦІЇ	50
3.1 Облаштування підстанції	50
3.2 Розрахунок струмів короткого замикання	52
3.3 Розрахунок параметрів заземлення підстанції	56
3.4 Розрахунок блискавкозахисту на підстанції	60
4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ	63
ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	74
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	79
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	86

ВСТУП

Конструктивні особливості обладнання електричних підстанцій вимагає необхідності забезпечення стабільної та гармонійної роботи в існуючій електромагнітній обстановці.

Наявні електромагнітні поля мають шкідливий вплив на поведінку різноманітного обладнання, через порушення його функціонування. Підвищення електромагнітної сумісності (ЕМС) – це відповідне виконання електричних пристроїв для можливості ефективного його функціонування у відповідному електромагнітному середовищі та не створювати електромагнітних перешкод для роботи обладнання, що знаходиться поруч.

Забезпечення ЕМС для обладнання електричних підстанцій може мати різноманітні підходи, та включати ідентифікацію та категоризацію джерел електромагнітних полів та перешкод, всебічний аналіз електромагнітного середовища та оцінка його впливу.

Одним з основних способів покращення ЕМС є відповідне просторове розміщення та взаємна орієнтація обладнання на електричних підстанціях. Додатковий позитивний ефект може бути отриманий шляхом впровадження екрануючих покриттів, металевих бар'єрів та встановлення фільтруючих пристроїв, здатних ефективно послабити електромагнітні впливи та покращити ЕМС обладнання підстанції.

Підвищити стійкість до електромагнітних полів компонентів систем можна шляхом використання спеціальних матеріалів та компонентів, які за своїми фізичними властивостями є стійкими до електромагнітних впливів та мінімізують вірогідність виникнення збоїв, пов'язаних з наявністю електромагнітних полів.

Ще одним позитивним способом покращення ЕМС є створення ефективної системи заземлень, що дозволить утворювати шляхи для

розсіювання струмів несправностей, від ударів блискавки та інших перехідних процесів – це запобігає потенційному ушкодженню обладнання підстанції та забезпечення стабільної роботи обладнання.

Мета роботи – дослідити виклики та рішення, пов’язані з підтриманням електромагнітної сумісності на електричних підстанціях.

Завдання роботи:

- навести основні визначення електромагнітної сумісності,
- визначити важливість застосування електромагнітної сумісності на електричних підстанціях,
- оглянути загальні проблеми електромагнітної сумісності на підстанціях,
- проаналізувати способи покращення електромагнітної сумісності на електричних підстанціях,
- розрахувати окремі параметри електромагнітної сумісності на підстанції,
- здійснити моделювання електромагнітних процесів.

Об’єкт досліджень – електричні підстанції як компоненти електроенергетичних систем.

Предмет досліджень – електромагнітна сумісність у контексті підстанцій.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОМАГНІТНУ СУМІСНІСТЬ

1.1 Основні визначення електромагнітної сумісності

Електромагнітна сумісність є ключовим поняттям в галузі електроенергетики, особливо в контексті обладнання електричних підстанцій, де безперебійна робота складних електронних систем має важливе значення.

Електромагнітна сумісність (ЕМС) – це здатність електрообладнання задовільно функціонувати у конкретному електромагнітному середовищі і не створювати неприпустимих електромагнітних перешкод для іншого обладнання, що працює в цьому середовищі. ЕМС характеризується двома взаємними явищами – випромінювання та сприйняття електромагнітної енергії [1].

Випромінювання характеризується створенням електромагнітних перешкод або «електричного шуму» під час нормальної роботи електричного обладнання. Ці випромінювання повинні бути обмежені або піддаватися регулюванню для того, щоб вони не перевищували нормовані значення та не заважали роботі іншого обладнання. З іншого боку, кожен вид обладнання має свою чутливість, що визначає його схильність до виникнення несправностей та зниження продуктивності, що може бути викликано випромінюваннями [1].

Для забезпечення електромагнітної сумісності електричне обладнання підстанцій повинно бути спроектовано та піддано випробуванням у відповідності до нормативних стандартів. Зазначені стандарти визначають максимальні рівні випромінювання, що можуть бути створені електричними пристроями, та мінімальні рівні стійкості електрообладнання до перешкод. Забезпечення дотримання цих нормативів може бути гарантією того, що електричне обладнання буде надійно працювати та експлуатуватися [1].

Проектування електричних підстанцій з урахуванням принципів електромагнітної сумісності є складним завданням, що передбачає визначення джерел електромагнітних перешкод та їх результуючої дії в електромагнітному середовищі підстанції. Виникнення електромагнітних перешкод на підстанціях може бути викликано як перехідними процесами (перемикання, несправності та інше), так і усталеними режимами роботи енергетичного обладнання. Крім «внутрішніх» джерел електромагнітних перешкод на підстанції, слід також враховувати наявність зовнішніх джерел (промислові об'єкти, що працюють поблизу, засоби зв'язку, прояви природних явищ). Обладнання підстанцій повинно бути спроектовано достатньо надійним, щоб витримувати зазначені фактори без погіршення факторів, що характеризують роботу електромеханічних пристроїв [2].

Розробка заходів по досягненню електромагнітної сумісності вимагає багатогранного підходу, що повинен включати аналіз як внутрішнього, так і зовнішнього електромагнітного середовища підстанції. Серед таких заходів можуть бути рішення по екрануванню, фільтрації, захисту та заземлення пристроїв. Концепція електромагнітної сумісності повинна бути поширена не тільки на окремі компоненти, але і на структурне облаштування підстанцій при їх проектуванні.

Пошук шляхів покращення електромагнітної сумісності на електричних підстанціях полягає у визначенні просторової конфігурації розміщення електричних пристроїв і струмопровідних конструкцій та ретельному плануванні розташування обладнання для зменшення ефекту взаємних зв'язків, що посилюють ступінь електромагнітних перешкод. Сутність просторового розміщення обладнання полягає у забезпеченні принципів відокремлення та ізоляції потужного обладнання, схильного до випромінювання сильних електромагнітних полів, від чутливої електроніки, що може вийти з ладу під дією цих полів. Просторове розміщення може бути реалізовано і в горизонтальних і у вертикальних площинах.

Орієнтація струмопровідних елементів (шини та кабелі) також має значення для забезпечення ЕМС через те, що при їх паралельному прокладанні викають індуктивні та ємнісні зв'язки, що можуть передавати енергію від силових ланцюгів до ланцюгів керування.

Для досягнення стабільного опорного потенціалу на підстанції, що може бути передумовою до покращення електромагнітної сумісності, необхідно дотримуватись параметрів заземлення і опорів з'єднань. Це дозволить значно зменшити електромагнітні перешкоди, забезпечуючи низький опір для розсіювання небажаних струмів, гарантування однаковості потенціалів металевих частин.

Комбінація різноманітних компонентів для покращення електромагнітної сумісності при їх інтеграції при проектуванні та експлуатації підстанцій дозволяють отримати комбінований ефект, підвищуючи електромагнітну стійкість об'єктів.

1.2 Важливість застосування електромагнітної сумісності на електричних підстанціях

Підстанції є критично важливими компонентами в електричних мережах, виконуючі завдання з контролю та перерозподілу потоків електричної енергії між споживачами. Забезпечення електромагнітної сумісності в цих комплексах є необхідністю для підтримки цілісності, надійності та ефективності енергосистем з умов відповідності нормативним вимогам. Електричні підстанції виконують роль динамічних концентраторів і оснащені електронними пристроями, які здійснюють контроль функцій керування, захисту та передачі даних. Зазначені електронні пристрої є досить чутливими до електромагнітних перешкод. Ці перешкоди можуть бути спродуковані цифровим обладнанням,

відновлюваними джерелами енергії, системами інтелектуальних мереж, що вимагає підвищеної уваги до цього питання [2].

Вплив електромагнітних перешкод на обладнання підстанції може проявлятися у різний спосіб – від незначних операційних проблем і до серйозних збоїв у системі. Електромагнітні випромінювання можуть спричиняти помилки при вимірюваннях за допомогою чутливого обладнання, викликати хибні спрацьовування реле та пристроїв керування. У найгіршому випадку електромагнітні перешкоди можуть призвести до перебоїв у роботі захисних пристроїв, збоїв у роботі обладнання, тривалих відключень, загрози безпеці персоналу підстанції [3].

Надійність роботи електричної мережі залежить від безперебійної роботи підстанцій і виникнення перебоїв через проблеми, пов'язані з електромагнітною сумісністю, можуть порушити постачання електричної енергії. Це питання стає ще більш актуальним через зростання попиту на електричну енергію зростає і електромагнітна сумісність може гарантувати, що мінливі та різноманітні навантаження, що характеризують роботу сучасних електричних мереж, дозволять забезпечити параметри стабільності.

Важливість електромагнітної сумісності також підкреслюється зростанням ступеня автоматизації із засобами дистанційного керування обладнання підстанцій за допомогою провідних комунікаційних технологій – цілісність даних, їх безпечна та безперебійна передача має високий ступінь значення. Будь-які електромагнітні перешкоди можуть викривити або/то погіршити дані, що передаються. Складність цього питання зростає через інтеграцію підстанцій до систем і архітектури інтелектуальних мереж, робота яких забезпечується завдяки набору датчиків та розвинену інфраструктуру засобів вимірювань, які є досить чутливими до електромагнітних перешкод та можуть сприяти їх поширенню по геометрії мережі. Важливість електромагнітної сумісності електричних підстанцій ще більше посилюється, коли розглядаються

конструктивні особливості обладнання, які відповідають вимогам електромагнітної сумісності, і які можуть вплинути на термін служби обладнання, ефективно використовувати навантаження та уникнути потенційних ушкоджень. Складний взаємозв'язок між електромагнітною сумісністю та довговічністю обладнання стає особливо очевидним у разі пошкодження ізоляції, що є поширеним наслідком тривалого впливу електромагнітних перешкод. Дотримуючись принципів електромагнітної сумісності, ризик таких ушкоджень може бути значно зменшений, що може зберегти цілісність критичних компонентів підстанцій [4].

Окрім збереження фізичного стану обладнання, питання електромагнітної сумісності невід'ємно пов'язано з можливістю розширення енергетичних систем, до яких входять електричні підстанції, коли електромагнітне середовище динамічно змінюється. Підстанції, що розроблені з впровадженням принципів електромагнітної сумісності, краще пристосовані до майбутніх змін. Ці зміни на тепер характеризуються інтеграцією відновлюваних джерел генерації та розподіленого навантаження, що може викликати необхідність реконструкції або модернізації підстанцій у загальній структурі енергопостачання. Дотримання електромагнітної сумісності відіграє ключову роль для дотримання нормативних вимог і стандартів при експлуатації електричного обладнання. Зазначені стандарти можуть регламентуватися національними та міжнародними нормативами і визначають припустимі рівні випромінювання та необхідні рівні стійкості обладнання. Дотримання цих стандартів стосується не лише нормативної відповідності, але й забезпечення сумісності між різними частинами обладнання та систем. Це може бути особливо важливим для взаємопов'язаних мереж, що може вимагати злагодженої роботи обладнання. Відповідність встановленим стандартам електромагнітної сумісності полегшує інтеграцію різноманітних технологій і систем на підстанціях, забезпечуючи гармонійну та стабільну їх роботу [4].

Прагнення до досягнення електромагнітної сумісності на підстанціях узгоджується з більш широкими цілями впровадження технологічних інновацій в енергетичному секторі. Реалізація даних принципів дозволяє ефективно інтегрувати сучасні інновації (системи накопичення енергії, засоби вимірювання, здійснення аналізу даних у реальному часі та інше). Таким чином, електромагнітна сумісність – це не просто технічна вимога, а і стратегічний засіб для досягнення безпечної, надійної та ефективної роботи електричних підстанцій. Це забезпечить підтримку постійної пристосованості електричних мереж до більш взаємопов'язаної та стійкої роботи, здатних задовольнити енергетичні потреби у майбутньому, одночасно зменшуючи ризики, пов'язані з виникненням електромагнітних перешкод у електричних зв'язках на підстанціях.

Збільшення частки відновлюваної енергії спонукає до перегляду існуючих стандартів тому, що традиційні рішення для забезпечення електромагнітної сумісності можуть бути недостатніми при виникненні вищих гармонік та перехідних процесів, що можуть бути викликані застосуванням новітніх пристроїв – ці пристрої характеризуються принципами швидкого перемикання, що може викликати суттєві електромагнітні перешкоди.

Не останнім аспектом важливості дотримання електромагнітної сумісності є забезпечення економічного фактору. Наявність електромагнітних перешкод може призвести до неефективності роботи електричного обладнання підстанцій, невиправданими втратами енергії та збільшеними витратами на обслуговування обладнання. Впроваджуючи ефективні заходи по забезпеченню та дотриманню електромагнітної сумісності, електричні підстанції зможуть працювати на рівні своєї оптимальної ефективності. З цих міркувань, сенс забезпечення електромагнітної сумісності полягає не лише у досягненні визначених технічних параметрів, а і забезпечує відповідні фінансові показники з супутнім досягненням значної економії [4].

Не останнє значення електромагнітної сумісності має для забезпечення безпеки та захисту обслуговуючого персоналу підстанції – необхідно, щоб персонал був обізнаний про потенційні впливи електромагнітних полів на здоров'я. Для цього необхідно дотримуватися норм і параметрів показників електромагнітних випромінювань від роботи електричних пристроїв підстанцій та їх залишку у визначених межах і на безпечному рівні, як це передбачено вимогами охорони здоров'я, гігієни та техніки безпеки [5].

Важливість електромагнітної сумісності на електричних підстанціях є комплексним питанням, що визначаються технічними, технологічними, економічними, нормативними, медичними та соціальними чинниками. Цей фактор є важливим при проектуванні, експлуатації та модернізації підстанцій і може мати негативні наслідки для неналежного функціонування електричних мереж.

1.3 Огляд загальних проблем електромагнітної сумісності на підстанціях

Питання електромагнітної сумісності у просторі електричних підстанцій являє складну проблему через різноманітність джерел, що їх викликають. Ці проблеми, як правило, викликані принципами та законами роботи обладнання підстанції, у яких відбуваються численні комутаційні перемикання та використовуються різноманітні засоби керування, що призводить до генерації перехідних перенапруг, генерації вищих гармонік та негативних наслідків електричних перехідних процесів [6].

Досить поширеною проблемою для електричних підстанцій є наявність гармонік, що кратні основній частоті напруги системи живлення. Ці коливання в основному викликаються нелінійними навантаженнями

(двигуни, трансформатор, силові електронні пристрої та іншого), що широко інтегруються до складу сучасних підстанцій. Наявність гармонічних коливань струмів може призвести до безлічі проблем: посилене нагрівання елементів обладнання, зменшення потужності обладнання, хибну роботу захисних пристроїв та помилкові показання вимірювальних пристроїв [6].

Перехідні процеси, що виникають під час перемикання, можуть викликати короточасні стрибки напруги, що пояснюється швидкою зміною рівня потенціалів (напруги) та струму через роботу комутаційних пристроїв, від'єднання та приєднання індуктивних та/або ємнісних навантажень. Імпульси високої потужності від дії цих перехідних процесів можуть індукувати потенціали у сусідніх провідниках, призводячи до пошкодження ізоляції та елементів чутливого електронного обладнання [7].

Іншою проблемою порушення електромагнітної сумісності на підстанціях є підвищення потенціалу «на землю», що виникає під час несправності. Це може призвести до виникнення небезпечної різниці потенціалів на елементах обладнання підстанції та у віддалених точках заземлення, що створює ризик для працездатності обладнання і для обслуговуючого персоналу.

Електромагнітні перешкоди порушують функціонування систем зв'язку та складних комунікаційних мереж для здійснення контролю, захисту та збирання даних. Електромагнітні перешкоди порушуючи форму сигналів призводять до викривлення даних, втрати зв'язку та несправності мережевих систем управління [7].

На підстанціях повинно здійснюватись керування електромагнітними полями між окремими провідниками (шинами, кабелями і т.п.), що може призвести до появи і проходження струмів по непередбаченим для цього шляхів – це явище пояснюється наявністю індуктивних та/або ємнісних зв'язків.

Проблеми електромагнітної сумісності можуть бути викликані взаємним просторовим розташуванням та неприпустимою близькістю встановлення у об'ємі підстанції. Провідники струму, що проходять паралельно один одному, можуть діяти як антенні пристрої або індуктивні петлі, що вловлюють індуковані напруги, тим самим посилюючи ефекти електромагнітних перешкод на підстанції [7].

Проблеми з електромагнітною сумісністю є не лише технічними проблемами – вони можуть мати значні наслідки для забезпечення безпеки через ненавмисне спрацювання або виклик несправності захисного обладнання, що призводить до небезпечних умов експлуатації або до катастрофічних збоїв у роботі елементів підстанції.

Питання забезпечення електромагнітної сумісності на підстанціях повинні бути оглянуті з врахуванням накопичувального ефекту її проявів. У сукупності вони можуть реалізувати сценарій, коли надійність усієї енергосистеми буде порушена оскільки підстанції є критично важливими вузлами в енергосистемі. Електромагнітна сумісність може бути ускладнена явищем резонансу, що викликається індуктивністю та ємністю елементів, що утворюють резонансні контури на певних частотах. При збудженні гармонійними коливаннями або перехідними процесами зазначені контури можуть посилювати збурення, що призводить до виникнення напруг або струмів, які перевищують технічні характеристики обладнання підстанції. Резонансні ефекти є важко передбачуваними через складність конфігурації електричного середовища підстанції та динамічного характеру умов роботи обладнання. При недотриманні вимог і параметрів електромагнітної сумісності відбувається наведення випромінювань у вигляді «шуму», який передається по лініям електропередач (повітряних і кабельних), по лініям керування та заземлюючих провідниках. Даний «шум» випромінюється в навколишнє середовище у вигляді електромагнітних хвиль і обладнання підстанції, що має недостатній ступінь екранування або недосконале планування у

розстановці обладнання, може піддатися значному електромагнітному впливу [8, 9].

Перехід на «цифрові підстанції» може створити додаткові проблеми при недотриманні електромагнітної сумісності – за мірою того, як підстанції стають більш «оцифрованими», розширюють систему вдосконалених датчиків, запроваджують сучасні принципи автоматизації та можливості дистанційного керування – розширюється номенклатура чутливого електронного обладнання, що є досить чутливим до електромагнітних перешкод. Забезпечення сумісності різних цифрових пристроїв вимагає суворої відповідності електромагнітної сумісності визначеним нормативам, що дозволить уникнути виникнення перехресних перешкод, які можуть призвести до пошкодження даних або збоїв у роботі обладнання.

Електромагнітні перешкоди можуть впливати на термін служби обладнання підстанції через повторення ефектів нагрівання та остигання, що викликаються гармоніками. Невизначений характер електромагнітних перешкод може призводити до появи періодичних несправностей, які складно діагностувати та усувати, вимагаючи більшого за об'ємом та номенклатурою технічного обслуговування та збільшення часу простоїв [7].

Ефективне управління електромагнітною сумісністю на підстанціях ще більше ускладнюється через зміну режиму їх роботи та необхідністю досягнення рівноваги між виробництвом та споживанням електроенергії. Інтеграція та підключення до існуючої системи підстанцій джерел розподіленої генерації позначається приєднанням нових типів електричних навантажень та режимів генерації, що відрізняються своїми унікальними характеристиками, що потребує переоцінки існуючих стратегій забезпечення електромагнітної сумісності.

Розвиток бездротових технологій та передачі і зберігання даних породжує низку нових викликів до забезпечення електромагнітної

сумісності. Розуміння цього вимагає більш ретельного планування та управління частотою сигналів передачі даних для запобігання перешкодам роботі зазначених систем.

Забезпечення стійкості електричних систем підстанцій до прояву електромагнітних перешкод можуть бути пояснені наслідками вибору матеріалів для будівництва та обслуговування підстанцій – матеріали з гіршими властивостями електромагнітного екранування або ті, які можуть призвести до накопичення статичних зарядів, можуть погіршити опірність до проявів електромагнітних перешкод.

Показники електромагнітної сумісності можуть бути погіршені внаслідок впливу факторів стану навколишнього середовища. Географічне положення підстанції, розташування по сторонах світу, погодні умови та навколишня інфраструктура можуть впливати на поширення та розповсюдження електромагнітних хвиль та сприйнятливість обладнання підстанцій до перешкод [8, 9].

У підсумку можна сказати, що загальні проблеми електромагнітної сумісності на електричних підстанціях є багатограними та динамічними, і на які впливає цілий ряд факторів, починаючи з конструкції обладнання і його компонування та закінчуючи інтеграцією нових технологій та джерел енергії. Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу, що поєднує надійні рішення з дотриманням суворих стандартів електромагнітної сумісності тим самим забезпечуючи експлуатаційну життєздатність обладнання підстанцій. Електромагнітна сумісність на підстанціях є складною загально-енергетичною проблемою і стосується прояву багатьох аспектів, що пояснюються законами електротехніки та електроенергетики. Виявлення та вирішення проблем електромагнітної сумісності вимагає врахування не лише стану електромагнітного середовища на підстанціях, але й приєднану до неї електричну мережу (вхідну та вихідну), технічні особливості облаштування підстанцій, їх просторове розташування, кваліфікація обслуговуючого персоналу і

підрядних організацій. Оскільки підстанції разом з електричними мережами розвиваються, реорганізуються і поновлюються, що супроводжується зростанням вимог до якості електричної енергії, питання електромагнітної сумісності залишаються одними з провідних, вимагають впровадження постійних інновацій та підвищеної уваги для забезпечення високого ступеня надійності та безпеки електроенергетичної інфраструктури цих підстанцій.

1.4 Огляд літературних джерел з дослідження і покращення електромагнітної сумісності на підстанціях

У [10] представлено новий метод виявлення та точного визначення місця ударів блискавки у повітряні лінії електропередачі. У запропонованій схемі використовують датчики, встановлені на опорах електропередач, для вимірювання струмів, що протікають через екрановані дроти до опор під час удару блискавки. У статті наголошується на важливості точного визначення місця ударів блискавки для швидкого ремонту та обслуговування, що може пом'якшити наслідки, спричинені відключенням ліній електропередач. На відміну від звичайних систем, які застосовуються для виявлення перехідних процесів і обмежені відбиттям лінії та взаємним зв'язком у розгалужених або паралельних лініях, метод авторів пропонує підвищену точність. У роботі детально описано використання спеціальних котушок для вимірювання струму. Автори здійснили моделювання за допомогою прикладної програми для дослідження різноманітних сценаріїв (різноманітні величини струмів удару блискавки, різні місця влучення, висоту веж, опорів заземлення, довжини прольоті та питомі опори ґрунту). Результати демонструють ефективність запропонованого методу. Обговорюються можливості оцінки тяжкості

ударів блискавки шляхом вимірювання стрибків напруги на вершинах веж, що може свідчити про прийняття рішень щодо необхідності проведення технічного обслуговування.

У [11] пропонується новий підхід до ідентифікації джерел магнітного поля, що має вирішальне значення для забезпечення ефективного екранування, особливо в середовищах, де електромагнітні перешкоди повинні бути мінімізовані з міркувань експлуатації. Автори пропонують метод, який передбачає вимірювання просторового розподілу амплітуд магнітного поля та моделювання реальних джерел полів за допомогою джерел, що керуються аналітичними співвідношеннями. Для цього використовується генетичний алгоритм для ідентифікації та моделювання джерел випромінювань, який може реалістично відтворити розподіл магнітного поля в просторі та часі. Ефективність методу доведено шляхом дослідження конструкції провідного екрану для трифазного трансформатора. Результати демонструють необхідність забезпечення значної кількості кластерів для досягнення точності моделювання магнітного поля. Експериментальна перевірка довела доцільність застосування методу в чутливому середовищі. Пропонується комплексний підхід до попередньої ідентифікації джерел магнітного поля для цілей екранування, поєднуючи теоретичні рівняння, комп'ютерне моделювання та експериментальні випробування.

У [12] наводиться технічне дослідження ефективності магнітного екранування для підстанції 10/0,4 кВ з використанням методу кінцевих елементів. Автори зосереджуються на впливі геометрії алюмінієвого екрана на ослаблення магнітного поля. Дослідження розглядає розподіл вихрових струмів всередині екрану, надаючи вказівки щодо розміщення отворів для мінімізації порушення форми магнітного поля. У статті визначаються перешкоди, що спричиняються магнітними полями від підстанцій, та потенційні небезпеки для здоров'я обслуговуючого персоналу від впливу магнітних полів промислової частоти. Автори

використовують об'єктно-орієнтоване моделювання для опису принципу екранування існуючої підстанції. Метою дослідження був аналіз геометричної залежності ефективності екранування та впливу наявності отворів у екрані. Обговорюється використання як 2D, так і 3D моделей для відображення складності середовища підстанції та застосування різних прикладних програм для здійснення розрахунків. Отримані результати детально описують середньоквадратичне значення щільності магнітного потоку на різних рівнях та його значне зменшення, досягнуте завдяки застосуванню алюмінієвих екранів на стелі та на стінах приміщень і представлено розподіл щільності індукованого струму в екрані та незначні теплові ефекти через вихрові струми. Документ містить цінну інформацію про практичне застосування методу моделювання для вирішення проблем електромагнітних перешкод в електричній інфраструктурі.

У [13] наведено всебічне дослідження впливу перехідних електромагнітних перешкод на вторинні системи підстанції через удари блискавки. Автори пропонують використання чисельних методів для аналізу перехідних характеристик у системах заземлення. Досліджується вплив різних факторів (матеріал заземлюючих електродів, форма хвилі струму блискавки, параметри кабелів та інших) на електромагнітні перешкоди. Наголошується на важливості довжини кабелів, яка значною мірою впливає на перехідну різницю потенціалів між шинами та екрануючою оболонкою кабелю. Визначається вплив матеріалу провідника, розміру сітки заземлення, проміжку між провідниками та товщини екрануючої оболонки на перехідну різницю потенціалів, прикладену до шару ізоляції кабелю. За допомогою числового аналізу та розрахункових алгоритмів демонструється те, як різні конфігурації та властивості матеріалів можуть зменшити або посилити ефекти електромагнітних перешкод. Дослідження містить детальні малюнки та таблиці, що ілюструють вплив зазначених факторів. Підкреслюється критичне значення місця удару блискавки та матеріалу провідника у

визначенні перехідної різниці потенціалів у заземлюючій сітці. Результати цього дослідження мають вирішальне значення для проектування та захисту підстанцій від електромагнітних перешкод, що можуть бути викликані ударами блискавки, забезпечуючи безпечну роботу енергосистем.

У [14] представлено комплексне дослідження магнітних полів, що створюються шинами трансформаторів, та ефективність різних екрануючих матеріалів. Для аналізу використовуються різні методи розрахунку та дослідження магнітних полів навколо шин високовольтного трансформатора – аналітичний метод та методи кінцевих елементів. У документі порівнюються результати цих методів. У статті детально описується спосіб визначення щільності магнітного потоку, що має місце на розподільчих підстанціях, та досліджувалась ефективність екранування різними матеріалами (алюміній, мідь і залізо). Визначено, що мідь є найкращим екрануючим матеріалом завдяки своїй високій провідності, але алюміній має кращий баланс з економічної та технічної точки зору. Досліджується також тепловий вплив на екранування, яке генерується від нагріву струмами навантаження та індукованих вихрових струмів. Автори дійшли висновку, що, незважаючи на те, що аналітичні методи забезпечують достатню точність для розрахунків магнітного поля шин трансформатора, вони не дають точних результатів у відношенні до феромагнітних матеріалів через їхню неоднорідність в об'ємі поверхні екрана. Підкреслюється важливість врахування теплових ефектів при розрахунках ефективності екранування, особливо для провідних матеріалів.

У [15] представлено всебічне дослідження щодо зменшення потужності магнітних полів навколо трансформаторних підстанцій. Дослідження вмотивовано необхідністю захисту чутливого електронного обладнання та вирішення потенційних проблем, пов'язаних з впливом магнітних полів. Автор зосереджується на екрануванні магнітних полів, що

створюються головним чином електричними шинами, кабелями та трансформаторами на підстанціях. Досліджуються як пасивні, так і активні методи екранування. Складена спрощена модель для розрахунку щільності магнітного поля навколо провідників. Детально описано математичну основу для розрахунку індукованих напруг і струмів у пасивних контурах на основі законів Кірхгофа та принципів взаємної індукції. Ефективність екранування оцінюється через поняття коефіцієнта екранування. Дослідження також представляє багатошарові екрани, що складаються з чергування шарів матеріалів з високою провідністю та високою проникністю, які, як показано, забезпечують чудову ефективність екранування. Для аналізу було використано метод кінцевих елементів, які дозволяють аналізувати складні геометричні форми екранів. Результати цифрового моделювання були підтверджені натурними вимірюваннями, які підтвердили адекватність моделі та продемонстрували вплив конфігурації екрана, властивостей матеріалу та орієнтації джерела випромінювання на ефективність зменшення потужності магнітного поля.

У [16] представлено новий підхід до аналізу відмов екранування на підстанціях високої напруги через прямі удари блискавок. Метод зосереджений на ефектах визначення полярності блискавки та невизначеної природи блискавки, які недостатньо розглянуті в існуючих стандартах. У документі критикуються детерміновані методи, прийняті в існуючих стандартах, які не враховують розгалужену та хвилеподібну природу грозових розрядів, що призводить до потенційної недооцінки ризиків відмови екранування. Модель, розроблена в дослідженні, реалізована в середовищі Matlab і використовує метод кінцевих різниць і техніку встановлення рівноваги для ефективного обчислення електричних потенціалів у тривимірному просторі. Модель враховує критичні параметри – максимальне значення електричного поля – для розвитку розряду та параметрів його розповсюдження, які коригуються у залежності від сценаріїв прояву блискавки. Результати симуляції показали значну

дисперсію, що визначає дистанцію удару, і вказує на те, що несправність екранування не можна точно передбачити за допомогою детермінованих виразів. У статті визначається максимальне значення струму, що призводить до відмови екранування та вразити захищене обладнання.

У [17] представлено комплексне дослідження можливості зменшення магнітних полів розсіювання на підстанціях середньої і низької напруги. Автори пропонують тривимірний інтегральний метод, заснований на методі клітин для моделювання немагнітних екранів, спеціально розроблений для зменшення обчислювальних вимог шляхом дискретизації лише поверхні екрана, таким чином мінімізуючи ступені свободи порівняно з методом кінцевих елементів. У статті описано чисельний метод, який спрощує рівняння Максвелла до алгебраїчної форми, дозволяючи здійснити дискретизацію лише металевих частин моделі. Цей метод може бути особливо ефективним для тонких провідних екранів, виготовлених з алюмінію або міді. Інтегральні змінні в розробленій моделі безпосередньо пов'язані з геометричними елементами, що дозволяє прямо сформулювати електромагнітну проблему. У створених експериментальних установках плоскі U-подібні алюмінієві екрани перевірялись на ефективність у змісті зниження щільності магнітного потоку. Вимірювання проводились на різних відстанях та при різних конфігураціях, що дозволило перевірити точність числової моделі – результати показали добру узгодженість між обчисленими та виміряними значеннями магнітного поля.

У [18] представлено новий підхід для зменшення впливу магнітних полів за межі закритих підстанцій середньої і низької напруги. Автори розробили процедуру оптимізації з використанням генетичних алгоритмів для розробки систем активного екранування, які зменшують щільність магнітного потоку в заданих геометричних об'ємах до нормативних рівнів. У статті окреслюється проблема екранування трансформаторних підстанцій від магнітних полів на частоті мережі, підкреслюючи

необхідність дотримання нормативних стандартів впливу магнітних полів на людину та інше обладнання. Була детально описана процедура оптимізації генетичного алгоритму для обробки геометрії розташування та струми збудження провідників усередині підстанції. Генетичний алгоритм послідовно дозволяє вдосконалити конструкцію екрануючих провідників, щоб мінімізувати щільність магнітного потоку в досліджуваному об'ємі підстанції. Чисельні результати були представлені для 2D і для 3D конфігурації, демонструючи ефективність застосування генетичного алгоритму. Автори стверджують, що активне екранування може значно зменшити магнітне «забруднення» досліджуваних об'ємів за межами підстанцій.

У [19] представлена модель для аналізу ефективності систем заземлення під час прямих ударів блискавки на підстанції. Було розглянуто три різні типи багатопровідних ліній передачі для представлення системи заземлення підстанції, включаючи екрануючі провідники. Автори розробили методологію для розрахунку як повітряних, так і підземних параметрів, зосереджуючись на струмах і перехідних напругах у цих структурах, а також на струмах витоку, що розсіюються в ґрунті. Перевірка моделі була успішною, і комп'ютерне моделювання показало, що включення екрануючих провідників в аналіз може зменшити величину струму та напруги, що дозволяє отримати ефективну конструкцію системи заземлення. У статті підкреслюється важливість врахування високочастотних компонентів при аналізі систем заземлення, якими зазвичай нехтують. Автори стверджують, що звичайний підхід, який часто ігнорує систему екранування підстанції, може призвести до неточностей, особливо під час реальних подій удару блискавки. Складена модель має на меті забезпечити більш точне представлення фізичних явищ, покращуючи аналіз перехідних процесів систем заземлення. Комплексний підхід до попереднього визначення характеристик систем заземлення підстанцій під час ударів блискавки поєднує теоретичні рівняння, комп'ютерне

моделювання та експериментальні випробування, для створення рекомендацій по впровадженню надійної методології для аналізу та оптимізації продуктивності систем, що розглядаються.

У [20] представлено всебічне дослідження ефективності екранів від вихрових струмів для зменшення впливу магнітних перешкод від роботи підстанцій. Автори використовують тривимірну кінцево-елементну модель для аналізу екрануючих можливостей алюмінієвого екрану, застосованого на підстанції 10/0,4 кВ. Дослідження базується на вирішенні практичної проблеми, що викликаються магнітними полями високої частоти, які можуть викликати перешкоди в електронному обладнанні, що знаходиться поблизу та потенційну небезпеку для здоров'я обслуговуючого персоналу. Значна частина досліджень передбачає моделювання магнітного поля підстанції за допомогою дво- та тривимірних комп'ютерних моделей. Автори використовували для своїх розрахунків відповідне програмне забезпечення. Результати показали, що основні вихрові струми протікають у верхній частині екрана, роблячи нижні частини менш критичними для ефективності екранування. Дослідження також вивчає вплив отворів в екранах на перенаправлення вихрових струмів вздовж країв отворів і локально збільшуючи інтенсивність магнітного поля. У документі обговорюється збільшення ефективності екранування зі збільшенням провідності екрануючого матеріалу. Теоретичні дослідження були підтверджені повноцінними випробуваннями та натурними вимірюваннями, що підтвердило висновок про можливість ефективного екранування магнітних полів від підстанцій.

У [21] представлено новий підхід до визначення імпедансу передачі та пропускної здатності екранованих кабелів на підстанціях, які є критичними параметрами для зменшення величини перехідних електромагнітних перешкод в релейному та контрольному обладнанні. Автори пропонують метод, заснований на теорії ліній передачі, який спрощує процес вимірювання в діапазоні частот від 0,1 МГц до 10 МГц, охоплюючи

основні частоти перешкод в системах живлення. Стаття визначає важливість забезпечення електромагнітної сумісності в системах живлення та роль застосування екранованих кабелів для зниження електромагнітних перешкод. Наводиться критика існуючих обчислювальних моделей через їх залежність від спрощених припущень та мінливості опору передачі енергії та пропускної здатності кабелів, підкреслюючи необхідність емпіричних вимірювань. У запропонованому авторами методі застосовується вимірювання вхідного опору замкнених і розімкнутих ланцюгів для отримання матриці опорів. Це дозволяє здійснювати прямий розрахунок комплексного опору передачі за допомогою аналітичних залежностей. Представлені експериментальні результати включали амплітудно-частотні та фазочастотні характеристики вхідних опорів, характеристичні опори. Застосування запропонованого методу продемонструвало ефективність його використання для прогнозування індукованої напруги та струму на екранованих кабелях через роботу перемикачів на підстанціях. Запропонований метод у порівнянні з існуючими має більшу застосованість для аналізу перехідних процесів у прогнозуванні електромагнітних перешкод.

2 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ НА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЯХ

Використання способів покращення електромагнітної сумісності на електричних підстанціях покликано забезпечити надійність роботи електричних апаратів, мереж і дотримання якості електричної енергії. Електричні підстанції виконують функції розподільчих вузлів у електричній мережі, є складними за структурою і електромагнітним середовищем, забезпечує співіснування високовольтного обладнання і чутливих електронних систем. Таке положення вимагає суворого підходу до забезпечення електромагнітної сумісності для недопущення виникнення загроз цілісності обладнання та/або параметрам безпеки [22].

Поточний стан сучасних практик забезпечення електромагнітної сумісності на електричних підстанціях значно змінився у порівнянні з попередніми роками, що пояснюється зростанням рівня цифровізації мереж і впровадженням інтелектуальних технологій та штучного інтелекту. Зазначене збільшило вірогідність виникнення електромагнітних перешкод, як у лініях передачі так і шляхом випромінювання, що вимагає пошук методів по вдосконаленню методів та засобів електромагнітної сумісності.

2.1 Провідні методи екранування обладнання

Широка інтеграція на підстанціях електронних пристроїв і цифрових систем викликає потребу в застосуванні передових методів екранування, що можуть захистити ці пристрої від широкого спектру електромагнітних перешкод. Екранування обладнання полягає в облаштуванні бар'єрів із

провідних або магнітних матеріалів навколо чутливого обладнання підстанцій для запобігання або зменшення впливу електромагнітних полів [23].

Ефективність екранування визначається властивостями матеріалу, частотою полів і конфігурацією та конструкцією екрана. Розширення можливостей технологій екранування пояснюється винаходом та створенням нових матеріалів, що здатні працювати у складному електромагнітному середовищі. Традиційні матеріали, що використовувались до теперішнього часу (сталь, мідь, алюміній та інші), тепер доповнюються різноманітними композитами та сплавами, що здатні забезпечити підвищену ефективність екранування за менших масо-вагових характеристик [23].

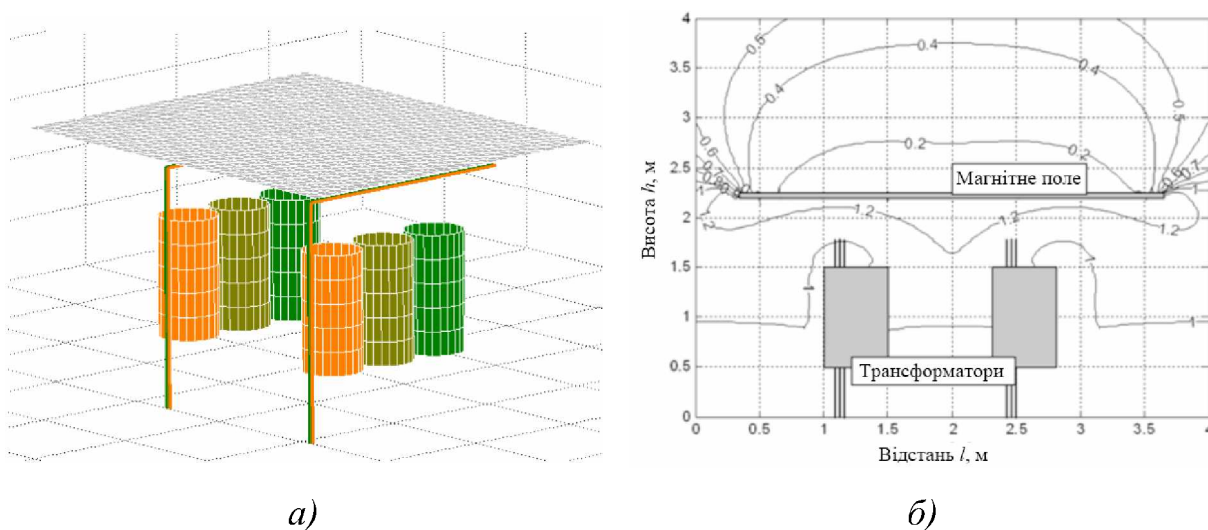


Рисунок 2.1 – Схема екранування трансформаторів на підстанції: *а* – розташування екрану над трансформаторами, *б* – розподіл напруженості магнітного поля

На сьогодні, суттєве ослаблення магнітного поля на основі інноваційних розробок полягає у використанні матеріалів з високою проникністю, які є особливо ефективними на низьких частотах, де звичайне екранування є менш ефективним.

Іншим напрямком у забезпеченні екранування є використання нанотехнологій для розробки наноструктурованих матеріалів, що здатні забезпечити ефективне екранування електромагнітних перешкод у широкому діапазоні частот.

Рішення по екрануванню отримали більше поширення завдяки модульному принципу будови частин підстанцій. Засоби екранування тепер можна вбудовувати безпосередньо в окремі компоненти підстанції, тим самим мінімізуючи потребу в додаткових екрануючих конструкціях і зменшуючи тим самим простір, що займається цим екрануванням. На допомогу при оптимізації конструкції та розташуванні екранування можуть прийти принципи обчислювального моделювання. Зазначені інструменти моделювання можуть визначити ефективність екрануючих матеріалів у різних конфігураціях, дозволяє більш точно налаштувати конструкції для досягнення максимальної ефективності [24].

2.2 Впровадження пристроїв активної фільтрації та покращення якості електроенергії

Використання та впровадження пристроїв активної фільтрації та заходів з покращення якості електроенергії є досить складним та багатогранним підходом до управління якістю забезпечення ЕМС. Активні пристрої призначені для здійснення безперервного моніторингу систем живлення та запровадження динамічного придушення небажаних електричних явищ у режимі реального часу, тим самим підвищуючи як якість електроенергії, так і електромагнітну сумісність обладнання підстанцій [25].

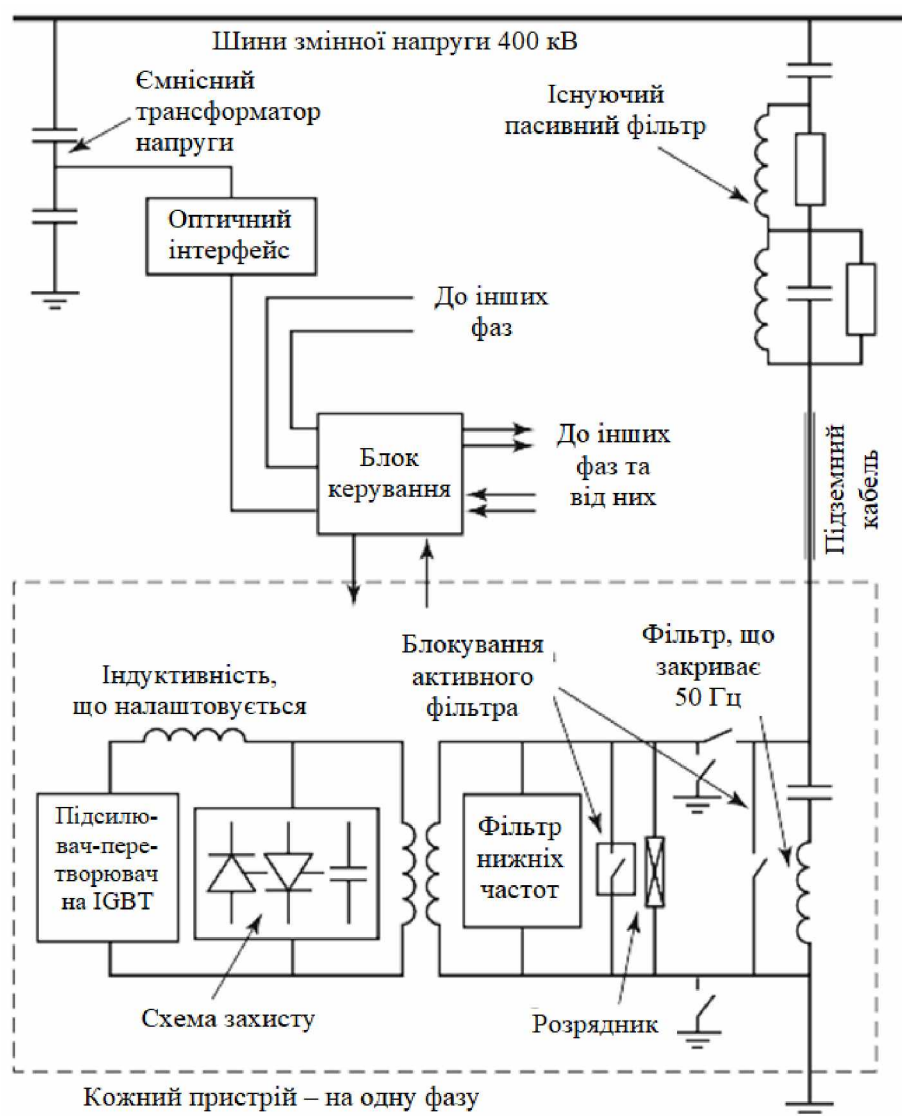


Рисунок 2.2 – Схема активного фільтра змінного струму на перетворювальній підстанції

Активні фільтри вищих гармонік працюють шляхом додавання в мережу компенсаційних струмів, що знаходяться у протифазі до гармонійних спотворень, що викликано нелінійними навантаженнями. Зазначене забезпечує поновлення синусоїдної форми сигналу напруги та струму, що є досить важливим для забезпечення належного функціонування чутливого електронного обладнання на підстанціях.

Пристрої динамічного відновлювання напруги і статичні компенсатори реактивної потужності є невід'ємними компонентами сучасних електричних підстанцій для здійснення і досягнення стабілізації

напруги та кількісних показників реактивної потужності. Ці пристрої здатні захищати від провалів і перепадів напруги, забезпечуючи роботу обладнання в межах визначеного діапазону напруги та коефіцієнта потужності й забезпечуючи відповідні параметри електромагнітного середовища і зменшуючи ймовірність резонансних умов [25].

Сучасні підстанції постачено пристроями акумулювання електроенергії, що призначені для живлення важливого обладнання під час перехідних процесів, стрибків напруги та здатні спричинити серйозні електромагнітні перешкоди та порушити роботу підстанції. Ці пристрої здатні з високою швидкістю реагувати на перехідні процеси, забезпечуючи захист від негативного впливу цих явищ та «ізолюючи» чутливі компоненти обладнання від ушкодження. Інтеграція цих пристроїв стає можливою завдяки широкій інфраструктурі датчиків й інтелектуальних систем керування. Ці інтелектуальні датчики та системи вимірювання розподілені та встановлені по всій електричній підстанції поблизу відповідальних вузлів та агрегатів і надають дані про величину електричних параметрів у реальному часі. Отримані дані аналізуються складними алгоритмами керування та впливають на роботу захисних пристроїв з підвищення якості електроенергії та завчасно реагувати на відхилення від встановлених норм [25].

Крім основної функції з покращення якості електроенергії, ці пристрої сприяють забезпеченню електромагнітної сумісності підстанцій, гарантуючи стабільність і передбачуваність електромагнітного середовища, що є життєво важливою вимогою для правильної роботи систем захисту, мереж зв'язку та вимірювального обладнання.

Таким чином, пристрої активної фільтрації та покращення якості електроенергії є не лише інструментами для покращення енергетичних характеристик і виступають невід'ємною частиною сучасної принципів по підтриманню електромагнітної сумісності, реагуючи на сучасні виклики електричних виробництв та складних енергосистем.

2.3 Зонування розміщення обладнання та оптимізація планування

Ключовим для реалізації електромагнітної сумісності на електричних підстанціях є зонування та оптимізація розташування електричного обладнання. Цей підхід визначає розподіл обладнання за визначеними координатами та зонами на основі їх профілю електромагнітної сумісності, рівнів випромінювання та вимог до стійкості електромагнітних впливів. Позитивний ефект спостерігається у мінімізації взаємного негативного впливу обладнання, що призводить до виникнення перешкод і збоїв у роботі (рис. 2.3) [26].

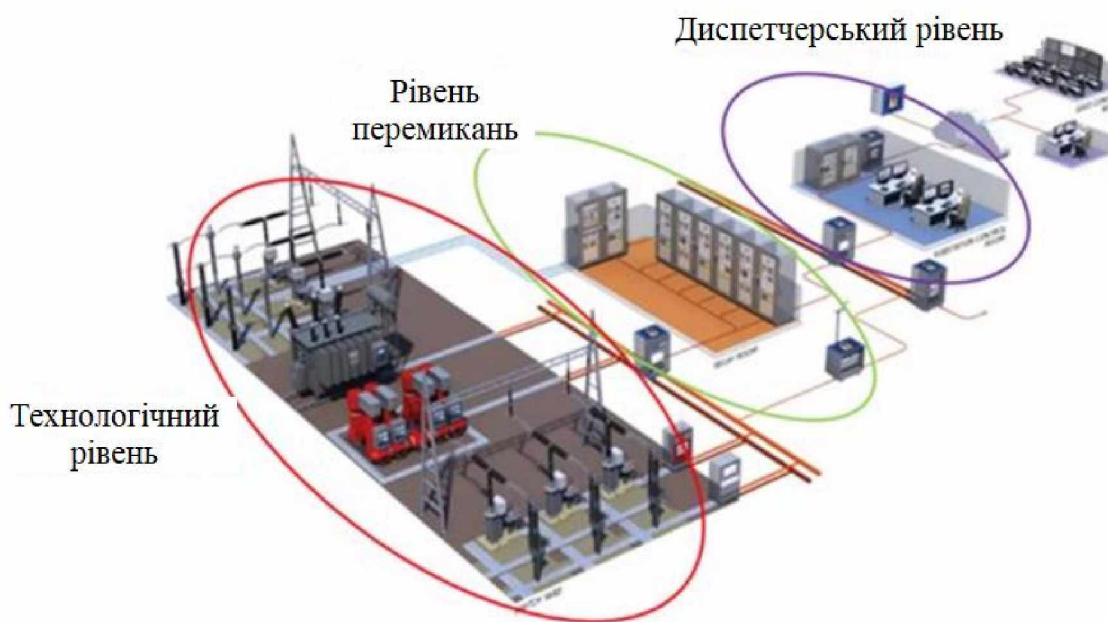


Рисунок 2.3 – Зонування на електричній підстанції [26]

Зміст зонування на підстанції полягає у визначенні зон з суворими заборонами по розміщенню того чи іншого типу обладнання – обладнання високої потужності здатне створювати значні електромагнітні поля і їх розміщення заборонено в зонах поблизу чутливого електронного обладнання керування та захисту. Взаємне розташування повинно враховувати не лише геометричну відстань між конкретним обладнанням і

взаємну орієнтацію, повинно також передбачати місце для розміщення відповідних бар'єрів, здатних перешкоджати та/або перенаправляти електромагнітні поля та перешкоджають потраплянню обслуговуючого персоналу до небезпечних зон [26].

Оптимізація планування і геометричного розташування на електричних підстанціях включає також розробку схеми прокладання кабелів, які усувають виникнення перехресних перешкод, широке використання «витих пар» та екранованих кабелів, де це можливо та необхідно, а також взаємне розташування шин і провідників для зменшення індуктивних зв'язків. Для однозначності визначення принципів розташування обладнання і провідників та оптимізації в нагоді можуть стати сучасні обчислювальні інструменти. Зазначені інструменти дозволяють змодельовати існуючі електромагнітні поля, що може бути використано на етапі проектування та модернізації електричних підстанцій та прогнозування електромагнітних взаємодій між різними зонами. Це дозволяє більш досконало скласти підстанції та досягти оптимального балансу між просторовими обмеженнями та вимогами норм електромагнітної сумісності.

Застосування модульних компонентів на підстанціях дозволяє підвищити гнучкість методів зонування та планування – модульні конструкції дозволяють розміщувати обладнання у відсіках, що забезпечені заходами по електромагнітній сумісності, і які можна легко змінити або розширити за потреби. Модульний підхід полегшує забезпечити зонування за вимог електромагнітної сумісності, оптимізувати технічне обслуговування, впроваджувати сучасні оновлення, зменшувати ризик виявлення проблем електромагнітної сумісності під час цих дій [27].

Зонування, оптимізація компонування та використання модульних конструкцій є основними заходами для забезпечення електромагнітної сумісності та керування складним електромагнітним середовищем підстанцій. Ретельно розробляючи план підстанції та дотримуючись

принципів зонування, можна ефективно зменшити рівень перешкод і забезпечуючи надійну роботу критичної енергетичної інфраструктури.

2.4 Методи виконання заземлюючих систем

Одним з основних методів забезпечення ЕМС на підстанціях є спеціальне виконання заземлень та їх електричних з'єднань, що супутньо підтримує працездатність електричних систем та забезпечує безпеку обслуговуючого персоналу та електрообладнання. Заземлення при його належному виконанні забезпечує нормативне значення опорного потенціалу для системної напруги, сприяє безпечній роботі захисних пристроїв та мінімізує вплив електромагнітних перешкод.

Сучасні методи заземлення на підстанціях передбачають створення низькоомного шляху до «землі», що допомагає ефективно розсіювати струми пошкодження та перехідні перенапруги. Підвищити ефективність цього процесу можна шляхом проектування і використання розгалуженої сітки заземлення, закладеної під підстанцією. Ця сітка зазвичай виготовляється з високопровідних матеріалів і покриває всю площу підстанції. Крім того, ефективність системи заземлення сильно залежить від питомого опору ґрунту, який змінюється залежно від географії розташування підстанції на навколишнього природного середовища, що вимагає при проектуванні заземлюючих систем попередньої оцінки значення питомого опору ґрунту (рис. 2.4) [28].

Навмисне з'єднання всіх металевих неструмопровідних частин обладнання та конструкцій підстанції з системою заземлення створює еквіпотенціальну площину, зменшуючи ризик виникнення різниці потенціалів, небезпечної «крокової напруги» та «напруги дотику», і допомагаючи зменшити циркуляцію блукаючих струмів, що можуть

викликати появу електромагнітних перешкод. Сучасні традиційні методи заземлення та електричних з'єднань полягають у використанні систем заземлення комплексного опору, які здатні обмежити струми замикання на землю, шляхом застосування резисторів або реакторів між нейтральним провідником системи та «землею». Цей метод дозволяє не тільки зменшити теплові та механічні навантаження на обладнання під час замикання на землю, але й обмежує генерацію електромагнітних полів, що можуть спричиняти перешкоди системам зв'язку та керування, тобто порушувати електромагнітну сумісність [28].

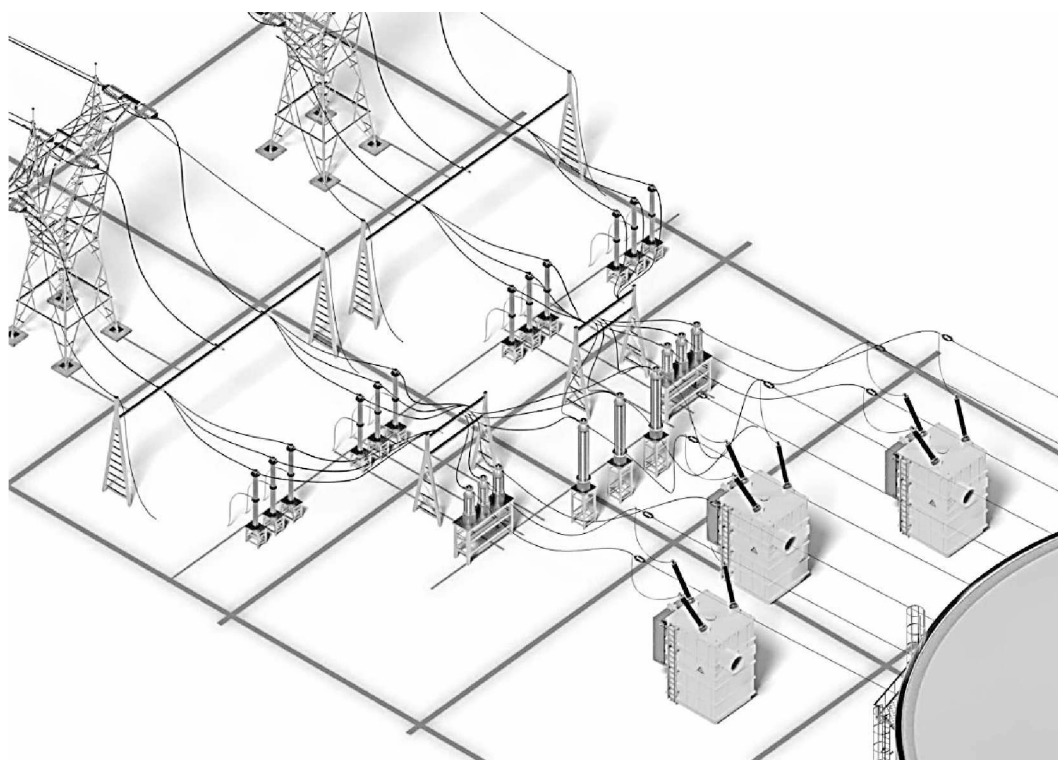


Рисунок 2.4 – Схема заземлення підстанції

У останній час досить широко використовують принципи інтеграції передових матеріалів у системи заземлення. Для реалізації цього положення у якості заземлюючих провідників, просочених рідкоземельними мінералами, що дозволяє підвищити провідність та стійкості до корозії систем заземлення і забезпечити тривалість функціонування заземлюючої інфраструктури. Іншим нововведенням у

системах заземлення підстанцій є використання матеріалів та провідних сполук, що здатні покращити провідність ґрунту навколо заземлюючих електродів, що може бути особливо корисним в районах з ґрунтами з недостатньою провідністю [28].

Еволюція методів заземлення та їх з'єднань відображає необхідність більш глибокого розуміння складності електромагнітної сумісності в сучасних енергетичних системах підстанцій. Застосовуючи передові методи забезпечення заземлення на підстанції, відповідне оснащення обладнання, придушення високих значень струмів пошкодження у складному електромагнітному середовищі здатні забезпечити покращення роботи та безпеку на електричних підстанціях.

2.5 Використання обмежувачів для захисту від перенапруг при перехідних процесах

Захист від перенапруги за допомогою пристроїв, що обмежують перехідні процеси є критично важливим для забезпечення стратегій електромагнітної сумісності на електричних підстанціях. Перехідні процеси можуть бути згенеровані зовнішніми джерелами або при внутрішніх операціях перемикання в самій енергосистемі. Серед таких пристроїв виділяють пристрої захисту від стрибків напруги і фільтрокомпенсуючі пристрої для придушення перехідних процесів. Сучасні пристрої захисту від стрибків напруги являють собою складні системи, що можуть майже миттєво відводити надлишкову енергію цих стрибків від захищених ланцюгів. Їх виготовляють з новітніх напівпровідникових матеріалів (металоксидні варистори, кремнієві лавинні діоди, газорозрядні трубки та інші), які вибирають на основі конкретних вимог захисту чутливого обладнання (рис. 2.5) [29].

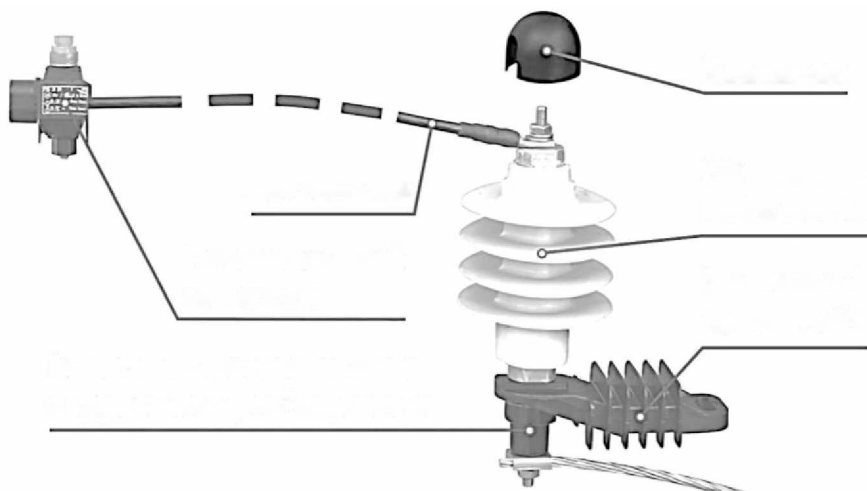


Рисунок 2.5 – Комплект для монтажу обмежувача перенапруг

Фільтро-компенсуючі пристрої для придушення перехідних процесів за своїми функціями схожі на пристрої захисту від стрибків напруги і частіше використовуються для керування дуже швидкими високочастотними сплесками енергії. Ці пристрої захищають від перехідних процесів під час перемикавання, що можуть викликати пробій ізоляції, погіршити якісні показники роботи обладнання або несправність електронних систем керування [30].

Застосування пристроїв захисту від перенапруги та фільтро-компенсуючих пристроїв для придушення перехідних процесів є критично важливим питанням при проектуванні підстанції. Ці пристрої встановлюють у відповідальних вузлах підстанції, що гарантує зниження впливу перехідних процесів і їх поширення електричною системою, спричиняючи пошкодження приєднаного обладнання. Завдяки використанню цих пристроїв у структурах забезпечення електромагнітної сумісності підстанції, останні стають краще захищеними від нерегулярних, але потенційно катастрофічних, тимчасових подій, які можуть порушити роботу електричних мереж, у складі яких знаходиться дана електрична підстанція [30].

Сучасний захист від стрибків напруги полягає в інтеграції можливостей прогнозного обслуговування, для чого необхідно

облаштовувати системами моніторингу, що можуть попередити обслуговуючий персонал про закінчення терміну служби або погіршення якості захисних елементів, дозволяючи вчасно їх замінити та забезпечити постійність захисту. Апаратні рішення можуть бути доповнені програмними засобами, які дозволяють здійснити моделювання впливу стрибків напруги на елементи підстанції, симулювати складні сценарії поведінки та надаючи повне уявлення про вразливість елементів підстанції до перехідних явищ, що дозволить здійснити оптимальний вибір і розташування зазначених вище пристроїв.

2.6 Аналіз електромагнітних перешкод за допомогою обчислювального моделювання

Аналіз електромагнітних перешкод за допомогою обчислювального моделювання – це сучасний метод обчислення та забезпечення електромагнітної сумісності на електричних підстанціях. Зазначений метод передбачає використання складних програмних інструментів для прогнозування та аналізу електромагнітних взаємодій всередині підстанції, забезпечуючи розуміння потенційних проблем.

Аналіз наявних електромагнітних перешкод починається з детального відображення картини електромагнітного середовища на підстанції. Даний аналіз здійснює ідентифікацію потенційних джерел внутрішніх і зовнішніх електромагнітних перешкод і просторового розташування чутливого до цих процесів обладнання. Для цього використовують спектральний аналіз, що показує частотний розподіл електромагнітних перешкод і дозволяє здійснити їх аналіз в часовій області.

Найсучаснішим методом аналізу перешкод у електромагнітному середовищі є обчислювальне електромагнітне моделювання (ОЕМ). Цей

метод полягає у здійсненні чисельного моделювання та імітації електромагнітних полів і електромагнітних хвиль. Основною метою роботи цієї програми є прогнозування поведінки електромагнітних полів при різних сценаріях, принципах і конфігураціях електричних підстанцій (рис. 2.6) [31].

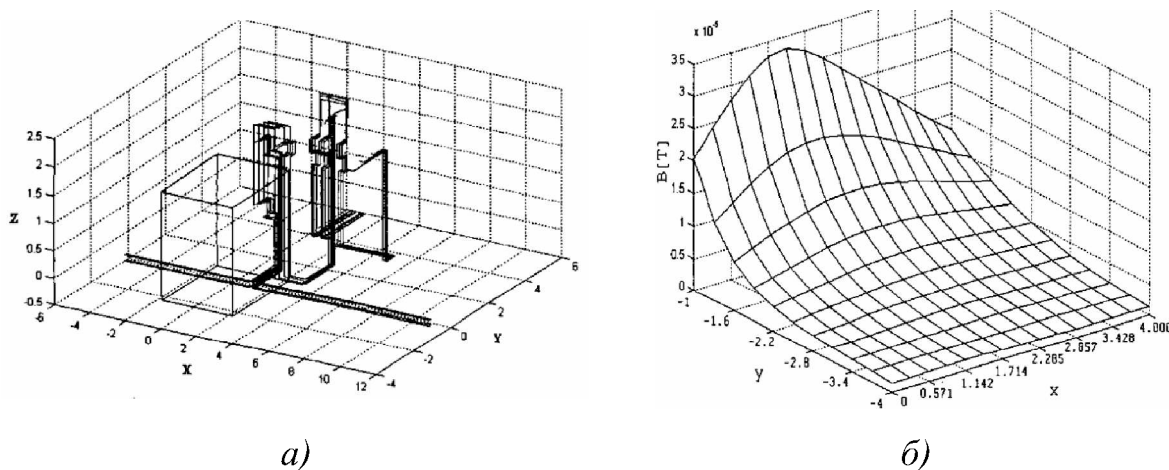


Рисунок 2.6 – 3D-вигляд розташування обладнання для аналізу (а) і розподіл густини магнітного потоку, що генерується в цільовому об'ємі (б)

Фундаментальні принципи OEM ґрунтуються на рівняннях Максвелла, що здатні описати як електричні, так і магнітні поля, що поширюються та взаємодіють з матеріальною речовиною. Ці рівняння поєднують: закон Гауса для електричних явищ, закон Гауса для магнітних явищ, закон індукції Фарадея, закон Ампера, що пов'язує магнітне поле з електричним струмом та швидкістю зміни електричного поля [31].

Методи обчислювального електромагнітного моделювання забезпечують дискретизацію рівнів безперервного поля з перетворенням їх в числову форму, яку можна розв'язувати на обчислювальних машинах/комп'ютерах. Для цього використовують методи кінцевої різниці в часовій області, метод кінцевих елементів, метод інтегральних рівнянь, метод граничних елементів у межах визначених областей [31].

Точність цих симуляцій значно підвищується завдяки наявності високоякісних моделей окремих компонентів підстанції та підвищенні обчислювальної потужності розрахункових процесорів. Це дозволить здійснити більш точний комплексний аналіз, розв'язувати складні нелінійні рівняння, описувати складну геометрію та охоплювати широкий діапазон умов роботи обладнання підстанцій.

Представлені інструменти можна використовувати не лише на етапі проектування, а і на існуючих підстанціях для їх модернізації. Вони можуть допомогти діагностувати проблеми з електромагнітною сумісністю шляхом порівняння змодельованих результатів з поточними даними вимірювань, та здійснювати керуючі дії для вирішення наявних проблем.

Інтеграція алгоритмів машинного навчання у інструменти моделювання можна здійснити аналіз великих наборів даних, отриманих у результаті моделювання, для ідентифікації шаблонів та пропонуванням заходів з модифікації дизайну підстанцій, що можуть бути не відразу очевидними для конструкторів та експлуатаційників.

2.7 Моніторинг і діагностика електромагнітних перешкод у реальному часі

Моніторинг і діагностика електромагнітних перешкод у реальному часі стають все більш важливими на етапі експлуатації електричних підстанцій для забезпечення постійності параметрів електромагнітної сумісності. У динамічному середовищі підстанції, коли електричні навантаження можуть швидко змінюватися, можливість постійного моніторингу електромагнітних перешкод та здійснення діагностики в режимі реального часу має вирішальне значення для підтримки надійної

роботи підстанцій. Сучасні системи моніторингу електромагнітних випромінювань на підстанціях оснащуються мережею датчиків, здатних виявляти широкий спектр електромагнітних випромінювань. Ці датчики мають бути розміщені по всій підстанції за певним законом та часто інтегруються з системами керування та збирання даних про роботу підстанції. При цьому виявляються аномалії у електромагнітному середовищі, перехідні процеси та гармонійні спотворення, які можуть вказувати на потенційні проблеми з електромагнітною сумісністю. Дані, зібрані датчиками, мають передаватися до центральної системи моніторингу, що здатна використовувати вдосконалені методи обробки сигналів для аналізу інформації. Система повинна бути налаштована таким чином, щоб відрізнити звичайні операційні комутації від справжніх електромагнітних перешкод, порівнюючи дані в реальному часі з встановленими нормативними та пороговими значеннями. У разі перевищення попередньо встановлених обмежень система може проінформувати зацікавлені сторони та сповістити обслуговуючий персонал підстанції про вжиття відповідних заходів [32].

Діагностика, що здійснюється в режимі реального часу, є однією з сучасних практик забезпечення електромагнітної сумісності, яка дає можливість діагностувати джерело та природу проблем виникнення електромагнітних перешкод за мірою їх виникнення. Уся система діагностування базується на складних алгоритмах, що можуть здійснювати кореляцію даних від різних датчиків і визначати ймовірну причину виникнення перешкод. Діагностичні процедури мають змогу не тільки точно визначити лише місце розташування, але й тип і типорозмір обладнання, що приймає участь у створенні електромагнітних перешкод. Сучасні діагностичні системи часто мають можливості прогнозу аналітики, використовуючи історичні дані та алгоритми машинного навчання для прогнозування потенційних проблем з електромагнітними випромінюваннями ще до їх потенційного виникнення. Такий підхід

дозволяє завчасно здійснити технічне обслуговування, запобігти простоюванню обладнання та зменшити витрати, пов'язані з проблемами, викликаними електромагнітними перешкодами та недотриманням положень електромагнітної сумісності [32].

2.8 Встановлення і дотримання стандартів електромагнітної сумісності та здійснення тестування

Дотримання стандартів електромагнітної сумісності та здійснення періодичного регулярного тестування на відповідність є обов'язковою умовою забезпечення електромагнітної сумісності на електричних підстанціях. Національні та міжнародні стандарти встановлюють технічні параметри та методологію здійснення технічних випробувань, які гарантують, що обладнання та системи на підстанціях не генерують, не поширюють і не піддаються впливу небажаного рівня енергії електромагнітного випромінювання.

Стандарти і нормативи забезпечують комплексну основу для визначення і порівняння станів електромагнітної сумісності та визначають обмеження рівня випромінювання, вимоги до рівня впливу та алгоритми тестування. Відповідність цим стандартам і нормам є обов'язковою для елементів підстанції, що гарантує забезпечення їх сумісного існування в одному електромагнітному середовищі [8, 9].

Щоб перевірити відповідність роботи обладнання підстанцій стандартам електромагнітної сумісності, виробники та експлуатаційники повинні проводити низку випробувань цього обладнання. Випробування проводяться в спеціалізованих лабораторіях електромагнітної сумісності та включають оцінку ступеня сприйняття та виплесків електромагнітних хвиль. Під час випробувань на стійкість обладнання піддають

різноманітним електромагнітним впливам: електростатичним розрядам, випромінюванням, швидким перехідним процесам, стрибкам та коливанням важливих параметрів живлення для того, щоб переконатися, що воно може витримувати ці умови без настання збоїв у його роботі. Під час тестування на випромінювання здійснюють вимірювання електромагнітної енергії та полів, що випромінюються обладнанням, щоб переконатися, що воно не перевищує визначених рівнів, які можуть створювати перешкоди роботі інших пристроїв [8, 9].

Обладнання сучасних підстанцій також піддається тестуванню на відповідність безпосередньо на підстанції, де обладнання перевіряється в робочому середовищі. Такий підхід гарантує демонстрацію реальної картини, що відповідає реальним умовам його експлуатації, забезпечуючи більш точну оцінку показників електромагнітної сумісності.

Постійний розвиток технологій і еволюція електромагнітного середовища вимагають регулярного оновлення стандартів електромагнітної сумісності. До стандартизації повинні бути залучені експерти з енергетики, наукових кіл і регуляторних органів, які на регулярні основі мають спільно працювати над переглядом і розробкою стандартів, які відповідають новим викликам і розвитку новітніх технологій. Забезпечення надійної структури стандартів та нормативів електромагнітної сумісності та здійснення тестування обладнання на відповідність цим вимогам гарантує, що підстанції здатні зберігати високий рівень стійкості до електромагнітних перешкод, що сприяє їх загальній надійності та безпеки роботи [33].

Для пошуку оптимальної електромагнітної сумісності на електричних підстанціях суттєву роль відіграє надання спеціалізованих знань шляхом навчання обслуговуючого персоналу та шляхом поширення передового досвіду. Підстанції стають все більш складними через інтеграцію передових технологій, існує потреба в кваліфікованих фахівцях, які легко орієнтуються в структурі електромагнітної сумісності. Значною частиною

у такому навчанні повинно бути розуміння відповідних стандартів і правил, які регулюють електромагнітну сумісність підстанцій: інструкції щодо процедур перевірки відповідності, стратегії усунення несправностей, шляхи вирішення проблем з електромагнітною сумісністю та інші. Поширення найкращих практик також є важливим елементом для підтримки високих стандартів електромагнітної сумісності в галузі. Інвестиції в навчання з електромагнітної сумісності та активне поширення найкращих практик свідчать про прагнення галузі підтримувати надійну та безпечну енергетичну інфраструктуру. З розвитком технологій і викликів зростає потреба в постійній освіті та обміні знаннями з електромагнітної сумісності, що гарантує, що персонал буде готовий застосовувати найефективніші стратегії електромагнітної сумісності [33].

2.9 Переоснащення та модернізація підстанцій

Переобладнання та модернізація є одними з ключових стратегій для забезпечення електромагнітної сумісності на електричних підстанціях, що спочатку не були спроектовані відповідно до сучасних суворих вимог щодо електромагнітної сумісності. Електромагнітне середовище стає все більш складним через широке застосування високотехнологічного обладнання та відновлюваних джерел енергії, потреба в модернізації застарілих систем стає вкрай необхідною.

Переобладнання передбачає вибіркову заміну або додавання компонентів, що підвищують параметри електромагнітної сумісності на підстанції. Таке переобладнання може полягати у впровадженні нових рішень по екрануванню, поліпшенню систем заземлення та з'єднань й інтеграцію передових пристроїв захисту від перенапруги. Часто переобладнання може бути економічно доцільною та гарною

альтернативою повній заміні обладнання, що дозволить підвищити ефективність електромагнітної сумісності [34].

Модернізація виходить за рамки переобладнання та охоплює комплексне оновлення інфраструктури підстанції. Ці дії можуть включати заміну аналогових систем на цифрові, використання волоконно-оптичних комунікацій замість мідних кабелів або повну реконструкцію систем керування для забезпечення електромагнітної сумісності. Модернізація не тільки покращує електромагнітну сумісність, але й покращує загальну функціональність та надійність роботи підстанції [34].

Одним із ключових моментів при переобладнанні та модернізації є сумісність нових компонентів з існуючими системами. Для підтвердження необхідності та доцільності цих процесів необхідно здійснення ретельного планування та тестування, щоб переконатися, що вони не завдають нових проблем з електромагнітною сумісністю. Ключову роль у цьому процесі може відігравати обчислювальне моделювання та симуляція, дозволяючи інженерам та обслуговуючому персоналу передбачити вплив змін до їх повноцінного впровадження.

Важливим аспектом при модернізації є перехід на цифрову архітектуру підстанції. Цифрові підстанції використовують технологію загальних шин, щоб звести до мінімуму використання традиційних схем з мідними провідниками для передачі сигналу. Натомість можуть бути використані цифрові комунікаційні мережі, які є менш чутливими до електромагнітних перешкод, покращується електромагнітна сумісність, призводить до більш ефективного управління та експлуатації підстанції [34].

При модернізації підстанцій доцільним може бути також зміна стратегії технічного обслуговування на основі поточного стану обладнання, що реалізується за використання систем моніторингу в реальному часі. Системи моніторингу використовують дані з датчиків і розширену аналітику для прогнозування можливості збоїв обладнання та

завчасного планування заходів по технічному обслуговуванню, що може запобігти виникненню проблем електромагнітної сумісності, спричиненим погіршенням стану компонентів підстанції [34].

Для покращення роботи обладнання підстанцій можуть бути застосовані технології розумних мереж, що є частиною плану модернізації. Розумні мережі передбачають наявність інтелектуальної інфраструктури, що підвищує стійкість мереж до електромагнітних перешкод і підвищити загальну енергоефективність системи.

3 РОЗРАХУНОК ОКРЕМИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ НА ПІДСТАНЦІЇ

3.1 Облаштування підстанції

Підстанція є складовою схеми електроенергетичної системи і при виборі електричних з'єднань підстанцій істотну роль відіграє розташування підстанції у схемі мережі.

Для забезпечення електромагнітної сумісності здійснюємо відповідне компонування і відповідне взаємне розташування основних та допоміжних елементів електроустановки на території підстанції [35].

Відкритий розподільчий пристрій (ВРП) 35 кВ виконуємо окремими блоками, на яких змонтовано відповідне обладнання та апаратура. Ошиновка ВРП виконуємо алюмінієвими трубами, що закріплено на ізоляторах, а відпайки – гнучкими провідниками (типу *A* та *AC*). Роз'єднувачі розташовуємо на типових опорних конструкціях ($H = 2,7$ м) нижче збірних шин – усі три полюси розташовуємо під середньою фазою.

На стороні 10 кВ приймаємо схему з двома секціями шин. Будівлю облаштовуємо з утеплених панелей, розрахованих під монтаж різноманітних керуючих та захисних панелей. Кабелі та інші провідники прокладаємо в залізобетонних лотках, що накриваються залізобетонними плитами.

Регулювання напруги на понижувальних підстанціях з двообмотковими трансформаторами здійснюємо за допомогою пристрою РПН, що здійснює перемикання між робочими відгалуженнями витків обмотки трансформатора, змінюючи таким чином коефіцієнт трансформації трансформаторів.

Параметри підстанції на напругу 35/10 кВ представлено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики підстанції

Γ_1		Γ_2		T_1		T_2, T_3		T_4		ЛЕП	
S, МВА	x_d'' , в.о.	S, МВА	x_d'' , в.о.	S, МВА	u_K , %	S, МВА	u_K , %	S, МВА	u_K , %	L_1 , км	L_2 , км
42,0	0,18	20,0	0,15	40,0	8,0	63,0	10,0	16	9,2	150	30

Максимальне навантаження: $S_{max} = 36$ МВА, $\cos \varphi = 0,85$.

Схему підключення підстанції до енергосистеми представлено на рис.

3.1.

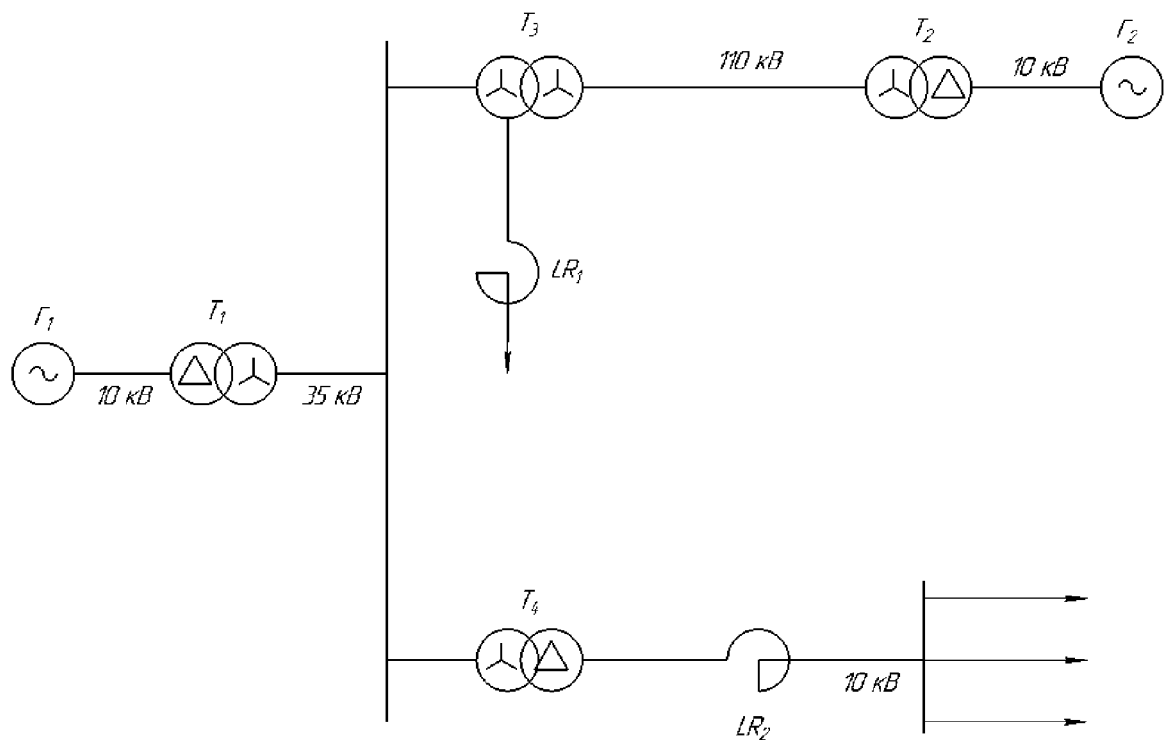


Рисунок 3.1 – Схема підключення підстанції до енергосистеми

Величина активної потужності [36]:

$$P_{max} = S_{max} \cdot \cos \varphi = 36 \cdot 0,85 = 30,6 \text{ МВт.} \quad (3.1)$$

3.2 Розрахунок струмів короткого замикання

Однією з основних причин порушення нормального режиму роботи системи електропостачання є виникнення коротких замикань. Для того, щоб зменшити вірогідність виходу електрообладнання з ладу при протіканні струмів короткого замикання та для швидкого відновлення нормального режиму роботи системи електропостачання необхідно заздалегідь визначати зазначені струми. Струми короткого замикання дають змогу вибирати відповідне електричне обладнання, захисну апаратуру та засоби обмеження струмів короткого замикання.

Місця виникнення коротких замикань обираються для найважчих умов і шкоди їх струмів.

Для розрахунку струмів короткого замикання складемо схему заміщення – рис. 3.2.

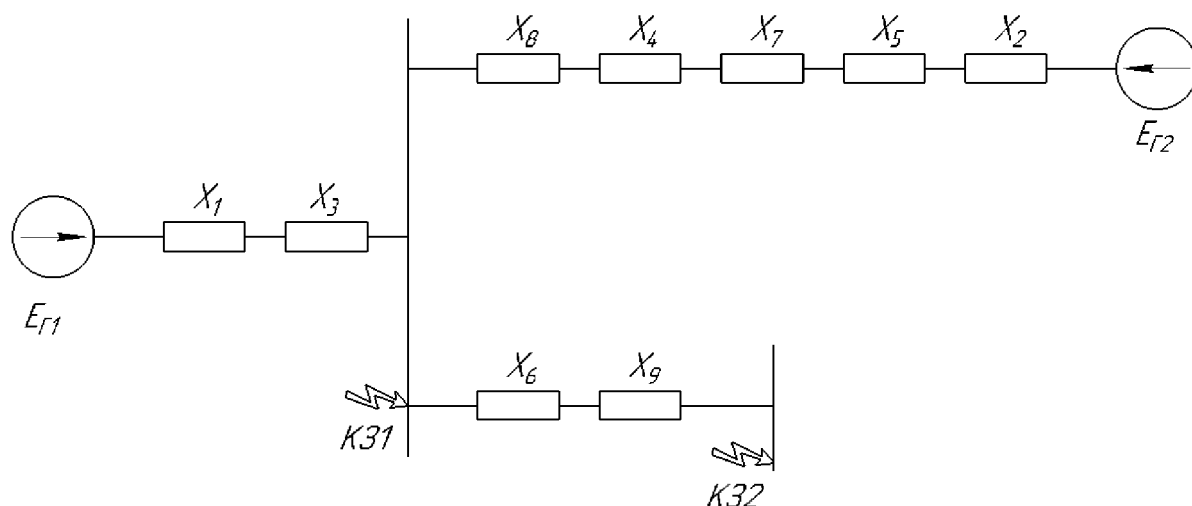


Рисунок 3.2 – Однолінійна схема заміщення

Усі розрахунки робимо у відносних одиницях (в.о.).

Опір генераторів на схемі заміщення [36]:

$$X_{*1} = x''_{di} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{нг}}}, \quad (3.2)$$

де S_6 – базова потужність, $S_6 = 1000$ МВА [36].

– генератор Γ_1 :

$$X_{*1} = 0,18 \cdot \frac{1000}{42,0} = 4,29 \text{ в. о.}$$

– генератор Γ_2 :

$$X_{*2} = 0,15 \cdot \frac{1000}{20} = 7,5 \text{ в. о.}$$

Опір трансформаторів на схемі заміщення [36]:

– трансформатор T_1 :

$$X_{*3} = \frac{u_k \cdot S_6}{100 \cdot S_H} = \frac{8,0 \cdot 1000}{100 \cdot 40} = 2,0 \text{ в. о.}, \quad (3.3)$$

– трансформатор T_2, T_3 :

$$X_{*4} = X_{*5} = \frac{u_k \cdot S_6}{100 \cdot S_H} = \frac{10,0 \cdot 1000}{100 \cdot 63} = 1,59 \text{ в. о.} \quad (3.4)$$

– трансформатор T_4 :

$$X_{*6} = \frac{u_k \cdot S_6}{100 \cdot S_H} = \frac{9,2 \cdot 1000}{100 \cdot 16} = 5,75 \text{ в. о.} \quad (3.5)$$

Опір лінії L_1 [36]:

$$X_{*7} = \frac{x_0 \cdot L_1 \cdot S_6}{U_{6B}^2}, \quad (3.6)$$

де x_0 – питомий опір повітряної лінії, $x_0 = 0,35$ Ом/км,

U_{6B} – базова напруга (висока), $U_{6B} = 110$ кВ [36],

$$X_{*7} = \frac{0,35 \cdot 150 \cdot 1000}{110^2} = 4,34 \text{ в. о.}$$

Опір лінії L_2 [36]:

$$X_{*8} = \frac{x_0 \cdot L_2 \cdot S_6}{U_{6C}^2}, \quad (3.7)$$

де U_{6C} – базова напруга (середня), $U_{6C} = 35$ кВ,

$$X_{*8} = \frac{0,35 \cdot 30 \cdot 1000}{35^2} = 8,57 \text{ в. о.}$$

Опір реактора [36]:

$$X_{*9} = X_p \cdot \frac{S_6}{U_{6H}^2}, \quad (3.8)$$

де X_p – опір реактора, $X_p = 0,2$ в.о.,

U_{6H} – базова напруга (низька), $U_{6H} = 10$ кВ,

$$X_{*9} = 0,2 \cdot \frac{1000}{10^2} = 2,0 \text{ в. о.}$$

Результуючий опір з боку джерела живлення до точки КЗ1:

$$X_{*10} = X_{*1} + X_{*3} = 4,29 + 2,0 = 6,29 \text{ в. о.}, \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} X_{*11} &= X_{*2} + X_{*4} + X_{*5} + X_{*7} + X_{*8} = \\ &= 7,5 + 2 \cdot 1,59 + 4,34 + 8,57 = 23,59 \text{ в. о.} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Результуючий опір у точці КЗ1:

$$X_{*КЗ1} = \frac{X_{*10} \cdot X_{*11}}{X_{*10} + X_{*11}} = \frac{6,29 \cdot 23,59}{6,29 + 23,59} = 4,97 \text{ в. о.} \quad (3.11)$$

Результуючий опір у точці КЗ2:

$$X_{*КЗ2} = X_{*КЗ1} + X_{*6} + X_{*9} = 4,97 + 5,75 + 2,0 = 12,72 \text{ в. о.} \quad (3.12)$$

Розрахунок струмів трифазного короткого замикання представимо у вигляді табл. 3.2. Приймаємо для розрахунку: значення величини ЕРС джерела: $E^{//} = 1,0$ в.о. та власний час відключення вимикача $t_{\text{св відкл.}} = 0,02$ с.

Таблиця 3.2 – Розрахункова таблиця струмів трифазного короткого замикання [36]

Параметр, одиниці вимірювання	Позначення або розрахункова формула	Точка короткого замикання	
		K31	K32
Результуючий опір, в.о.	X_{*i}	4,97	12,72
Базовий струм, кА	$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6}$	16,5	57,74
Початкове значення струму, кА	$I_{\text{по}}^{(3)} = \frac{E_*''}{X_{*\text{рез}}} \cdot I_6$	3,32	4,54
Розрахунковий час, с	$\tau = 0,01 + t_{\text{св відкл.}}$	0,03	0,03
Постійна часу системи, с	T_a	0,03	0,02
Ударний коефіцієнт	$k_{\text{уд}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}$	1,72	1,61
Ударнийий струм, кА	$i_{\text{уд}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{по}}^{(3)}$	8,08	10,34
Аперіодична складова струму, кА	$i_{\text{ат}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{по}}^{(3)} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}}$	1,73	1,43

3.3 Розрахунок параметрів заземлення підстанції

На підстанції розрізняють робоче, захисне та грозозахисне заземлення. Зазвичай для всіх цих типів заземлення електричних установок використовують один заземлюючий пристрій, який складається із заземлювача, що безпосередньо знаходиться під землею та системи провідників, які з'єднують електрообладнання із заземлювачем.

Заземлюючий пристрій виконуємо у вигляді замкнутого контуру зі смуги 45x4 мм, прокладеного на глибині $t = 0,75$ м навкруги підстанції на відстані 2 м від внутрішньої сторони огорожі.

Вихідними дані для розрахунку представлено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Вихідні дані для розрахунку заземлювача

Параметр	Позначення, одиниці виміру	Значення
Площа підстанції	$S, \text{м}^2$	$40 \times 40 = 1600$
Питомий опір верхнього шару ґрунту	$\rho_1, \text{Ом}\cdot\text{м}$	70
Питомий опір нижнього шару ґрунту	$\rho_2, \text{Ом}\cdot\text{м}$	80
Товщина верхнього шару ґрунту	$h, \text{м}$	0,75
Струм замикання на землю на стороні 35 кВ	$I_{\text{КЗ35}}, \text{А}$	5
Струм замикання на землю на стороні 10 кВ	$I_{\text{КЗ10}}, \text{А}$	20
Загальна довжина смуги заземлення	$l, \text{м}$	176

Опір заземлюючого пристрою для установок 10–35 кВ при використанні його одночасно для всіх споживачів має задовольняти нерівності:

– на стороні 35 кВ (неізолювана нейтраль) [36]:

$$R_{\text{ЗЗ35}} \leq \frac{250}{I_{\text{КЗ35}}} = \frac{250}{5} = 50 \text{ Ом}, \quad (3.13)$$

– на стороні 10 кВ (ізолювана нейтраль) [36]:

$$R_{\text{ЗЗ10}} \leq \frac{125}{I_{\text{КЗ10}}} = \frac{125}{20} = 6,25 \text{ Ом}. \quad (3.14)$$

Опір заземлюючого пристрою нейтралі трансформатора на стороні 0,4 кВ має бути: $R_{30,4} \leq 4 \text{ Ом}$.

Опір ґрунту з урахуванням сезонності [36]:

$$\rho_{\text{розр.}} = k_{\text{сі}} \cdot \rho_1, \quad (3.15)$$

де $k_{\text{сі}}$ — коефіцієнт сезонності, що враховує промерзання та просихання ґрунту:

– для вертикальних електродів: $k_{\text{св}} = 1,3$:

$$\rho_{\text{розр.вер.}} = 1,3 \cdot 80 = 104,0 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (3.16)$$

– для горизонтальних електродів: $k_{\text{сг}} = 3,0$.

$$\rho_{\text{розр.гор.}} = 3 \cdot 70 = 210 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (3.17)$$

Опір заземлюючої смуги [36]:

$$\begin{aligned} r_{\Gamma} &= \frac{0,4 \cdot \rho_{\text{розр.гор.}}}{l} \cdot \ln \frac{2 \cdot l^2}{b \cdot t} = \\ &= \frac{0,4 \cdot 210}{176} \cdot \ln \frac{2 \cdot 176^2}{45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,75} = 6,88 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Попередньо приймаємо значення коефіцієнту використання смуги: $\eta_{\Gamma} = 0,3$.

Опір заземлюючої смуги в контурі [36]:

$$R_{\Gamma} = \frac{r_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}} = \frac{6,88}{0,3} = 22,95 \text{ Ом}. \quad (3.19)$$

Необхідний опір вертикальних заземлювачів [36]:

$$R_B = \frac{R_r \cdot R_{30,4}}{R_r - R_{30,4}} = \frac{22,95 \cdot 4}{22,95 - 4} = 4,85 \text{ Ом.} \quad (3.20)$$

Опір одного вертикального заземлювача [36]:

$$r_B = \frac{\rho_{\text{розр.вер.}}}{2\pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l}{4t - l} \right), \quad (3.21)$$

де l – довжина стрижня, $l = 2$ м,

d – діаметр стрижня, $d = 16 \cdot 10^{-3}$ м,

t – глибина закладання, що дорівнює відстані від поверхні землі до середини заземлювача, $t = 1,8$ м.

$$r_B = \frac{104}{2\pi \cdot 2} \left(\ln \frac{2 \cdot 2}{16 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 1,8 + 2}{4 \cdot 1,8 - 2} \right) = 48,06 \text{ Ом.}$$

Кінцеве значення кількості вертикальних заземлювачів [36]:

$$n_B \geq \frac{r_B}{R_B \cdot \eta_B}, \quad (3.22)$$

де η_B – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів, $\eta_B = 0,6$.

$$n_B \geq \frac{48,06}{4,85 \cdot 0,6} = 16,52. \quad (3.23)$$

Приймаємо у контурі 18 вертикальних заземлювачів.

3.4 Розрахунок блискавкозахисту на підстанції

Від прямих ударів блискавки підстанцію захищаємо стрижневими блискавковідводами висотою $h = 17$ м (для умов найвищої точки підстанції на рівні $h_{\text{найв.}} = 5$ м). Встановлюємо чотири блискавковідводи, розташовані на землі, на відстані 3 метри від огорожі.

Активна висота блискавковідведення [34]:

$$h_a = h - h_{\text{найв.}} = 17 - 5 = 12 \text{ м.} \quad (3.24)$$

Радіус зони захисту на рівні найвищої точки підстанції [34]:

$$\begin{aligned} r_x &= (1,1 - 0,002h) \cdot \left(h - \frac{h_{\text{найв.}}}{0,85} \right) = \\ &= (1,1 - 0,002 \cdot 17) \cdot \left(17 - \frac{5}{0,85} \right) = 11,85 \text{ м.} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Радіус зони захисту на рівні землі [34]:

$$\begin{aligned} r_o &= (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot h = \\ &= (1,1 - 0,002 \cdot 17) \cdot 17 = 18,12 \text{ м.} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Розрахунок мінімальної висоти до блискавкоприймача [34]:

$$h_0 = 0,85 \cdot h = 0,85 \cdot 17 = 12,8 \text{ м.} \quad (3.27)$$

Відстань між блискавковідводами становитиме: $L = 40$ м.

Серединна відстані між блискавковідводами [34]:

$$\begin{aligned}
 h_c &= h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h) \cdot (L - h) = \\
 &= 14,45 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot 17) \cdot (40 - 17) = 10,42 \text{ м.}
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$

Радіус зони захисту на серединній відстані [34]:

$$r_{cx} = r_0 \cdot \frac{h_c - h_{\text{найв.}}}{h_c} = 18,12 \cdot \frac{10,42 - 5}{10,42} = 9,43 \text{ м.} \tag{3.29}$$

Ґрунт має питомий опір: $\rho_{\text{гр.}} = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Нормований опір заземлюючого пристрою: $r_0 = 10 \text{ Ом}$. Припустимий опір заземлюючого пристрою: $r_{\text{пр}} = 30 \text{ Ом}$. Коефіцієнт використання $\eta_I = 0,75$.

Опір ґрунту з урахуванням сезонності:

$$\rho_{\text{розр.гр.}} = 2 \cdot 80 = 160 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \tag{3.30}$$

Приблизна кількість одиночних заземлювачів [34]:

$$n \geq \frac{r_{\text{пр}}}{r_0} = \frac{30}{10} = 3. \tag{3.31}$$

Приймаємо до встановлення $n = 4$ заземлювача.

Загальний опір заземлювачів [34]:

$$r'_0 = \frac{r_{\text{пр}}}{\eta_1 \cdot n} = \frac{30}{0,75 \cdot 4} = 10,0 \text{ Ом.} \tag{3.32}$$

Довжина горизонтальних заземлювачів розташованих по контуру [34]:

$$L_{\Gamma} = a \cdot n, \tag{3.33}$$

де a – відстань між одиночними заземлювачами, $a = 0,1 \text{ м}$.

$$L_{\Gamma} = 0,1 \cdot 4 = 0,4 \text{ м.}$$

Опір сполучної лінії [34]:

$$r_{\Gamma} = \frac{\rho_{\text{розр.гр.}}}{\eta_2 \cdot 2\pi \cdot L_{\Gamma}} \cdot \ln \frac{L_{\Gamma}^2}{d \cdot h}, \quad (3.34)$$

де η_2 – коефіцієнт екранування смуги, $\eta_2 = 0,85$,

d – діаметр горизонтального заземлювача, $d = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$,

h – заглиблення смуги, $h = 0,75 \text{ м}$,

$$r_{\Gamma} = \frac{160}{0,85 \cdot 2\pi \cdot 0,4} \cdot \ln \frac{0,4^2}{16 \cdot 10^{-3} \cdot 0,75} = 194 \text{ Ом.} \quad (3.35)$$

Загальний опір заземлення дорівнюватиме [34]:

$$R_{\text{заг.}} = \frac{r_0' \cdot r_{\Gamma}}{r_0' + r_{\Gamma}} = \frac{10,0 \cdot 194}{10,0 + 194} = 9,5 \text{ Ом.} \quad (3.36)$$

Імпульсний опір заземлювачів для відведення струмів [34]:

$$R_i = a_i \cdot R_{\text{заг.}}, \quad (3.37)$$

де a_i – імпульсний коефіцієнт, що залежить від типу заземлювача, питомого опору ґрунту, і амплітуди імпульсного струму, що стікає через заземлювач, $a_i = 0,5$.

$$R_i = 0,5 \cdot 9,5 = 4,75 \text{ Ом} < 10 \text{ Ом.}$$

4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ

У рамках дослідження розглянемо ключові аспекти моделювання у програмному середовищі ANSYS Multiphysics та контролю екранування магнітних полів з використанням різноманітних матеріалів та структур. Необхідно встановити вплив різних матеріалів та конструкцій на ефективність екранування магнітних полів, що виникають внаслідок змінних струмів. Проаналізуємо напівсферичний екран, виготовлений з магнітом'яких матеріалів (залізо, сталь), і дослідимо можливість екранування у поперечних магнітних полях (рис. 4.1) [37].

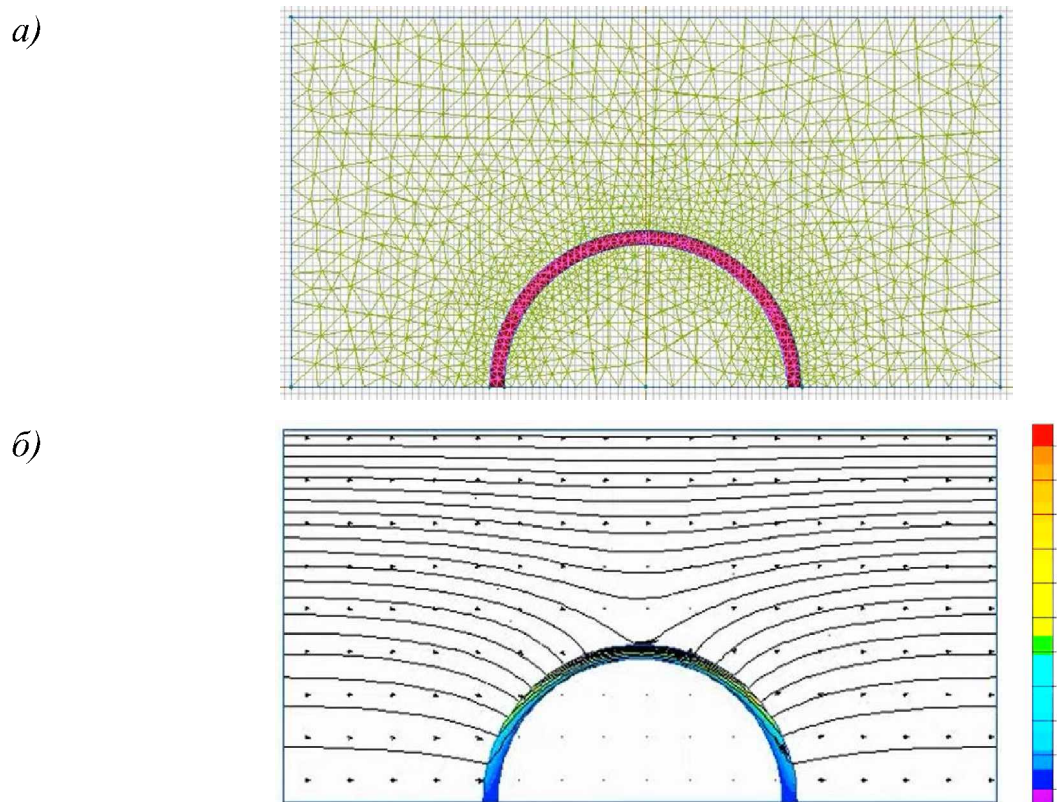


Рисунок 4.1 – До визначення впливу магнітного поля змінного струму:
а – картина магнітного поля навколо екрану, *б* – силові лінії магнітного поля та розподіл щільності струму в екрані

Здійснене моделювання продемонстровано розподіл магнітного поля та струмових навантажень навколо екрануючої конструкції та оцінити його

ефективність для зменшення магнітної індукції всередині області, що захищається. Це було здійснено шляхом аналізу коефіцієнта екранування, що визначається як відношення магнітної індукції в зовнішній області до індукції всередині області, що захищається. Це дозволило оцінити ефективність використання конкретного типу екрана з огляду на зміну величини магнітної індукції всередині області, що захищається, в залежності від частоти зовнішнього магнітного поля (рис. 4.2) [37].

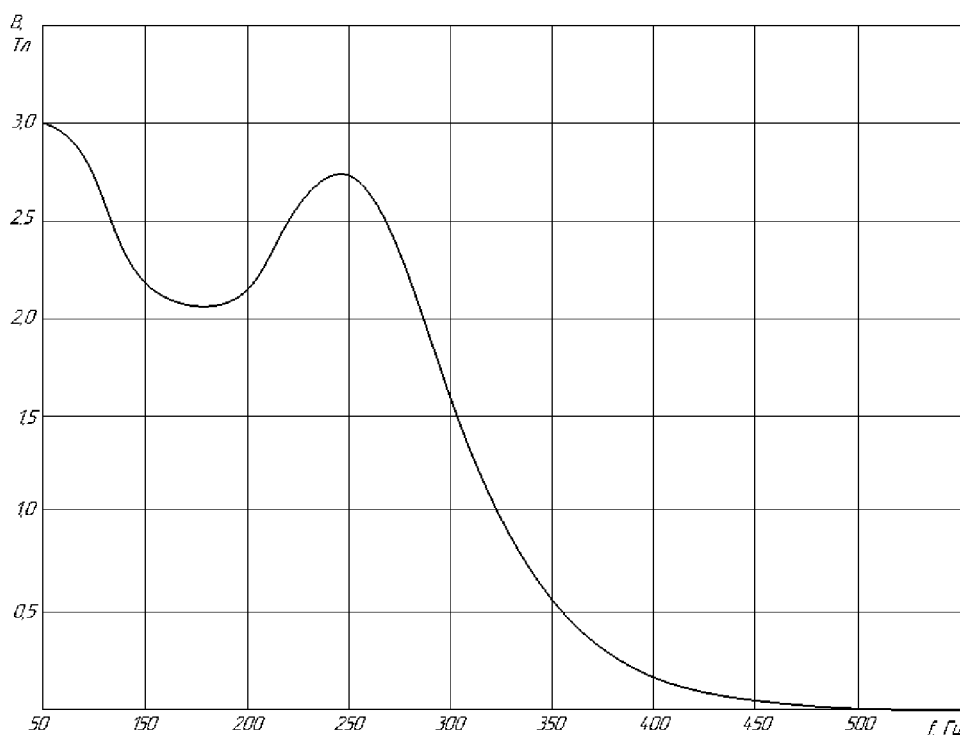


Рисунок 4.2 – Зміна величини магнітної індукції всередині області, що захищається, в залежності від частоти зовнішнього магнітного поля

Було встановлено, що індукція магнітного поля всередині області, що захищається, значно знижується при низьких частотах порівняно з високими частотами.

Тепер розглянемо прямокутний екран з міді, що знаходиться під впливом поперечних магнітних полів, та здійснюємо оцінку розподілу щільності струму та магнітної індукції під екраном, що має одношарову структуру (рис. 4.3) [37].

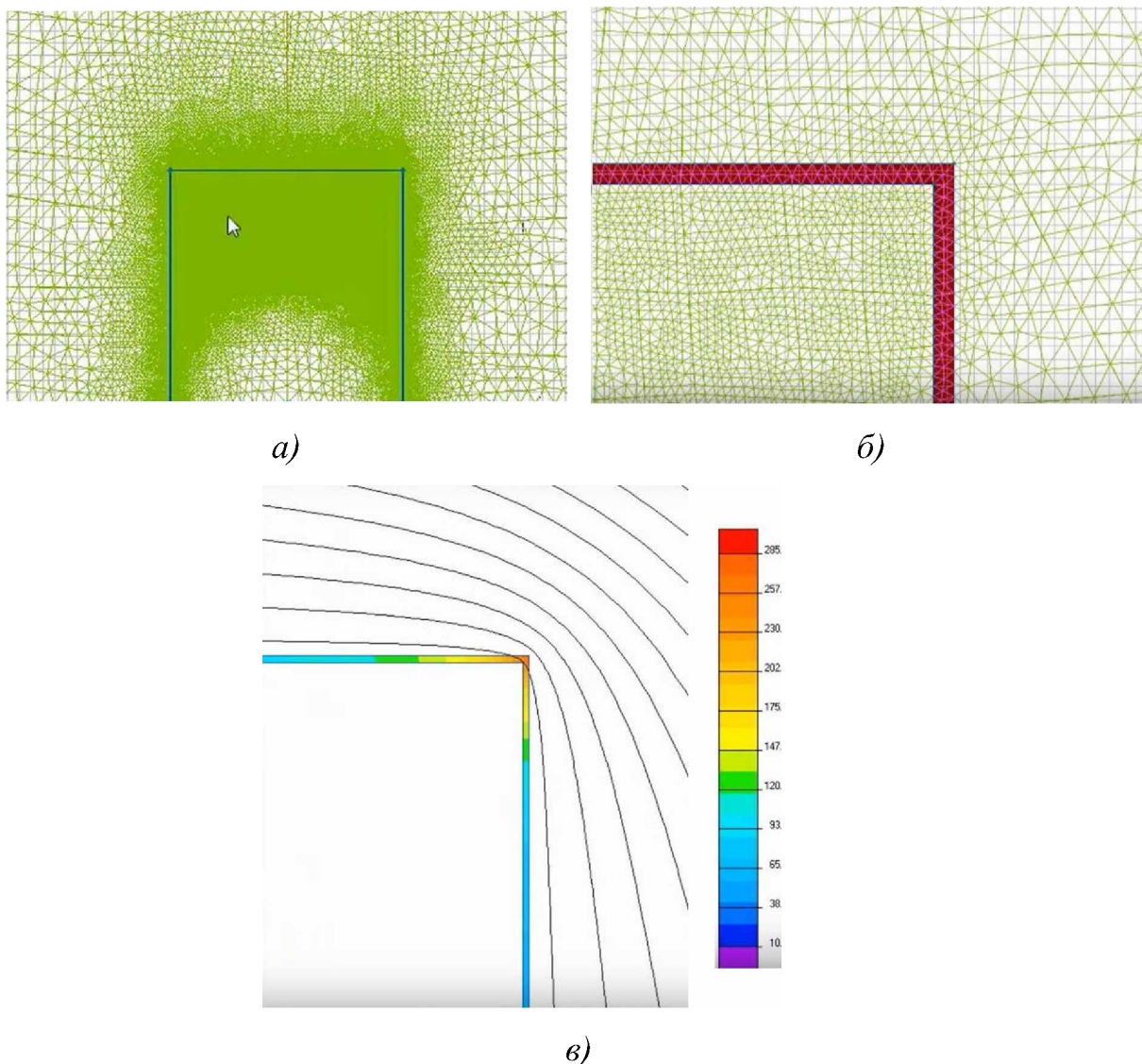


Рисунок 4.3 – До визначення впливу магнітного поля змінного струму:
а – картина магнітного поля навколо прямокутного екрану з міді, *б* – збільшена частина екрану, що демонструє його одношаровість, *в* – положення силових ліній магнітного поля та розподіл щільності струму на мідному екрані

На рис. 4.4*в* показано положення силових ліній магнітного поля у певний момент часу та розподіл щільності струму на мідному екрані. Видно, що найбільша щільність струму спостерігається на кутах екрану. Індукція магнітного поля всередині екрану завдяки його екрануючим властивостям практично дорівнює нулю. Аналіз коефіцієнта екранування показав, що індукція магнітного поля всередині області, що захищається,

значно знижується, особливо при низьких частотах зовнішнього магнітного поля. Це підтверджує ефективність використання міді як екрануючого матеріалу.

Наступним кроком було дослідження і аналіз багатошарової структури екранів. Зовнішня та внутрішня частина екрану виконуємо мідними, між якими розташовуємо шар зі сталі (рис. 4.4) [37].

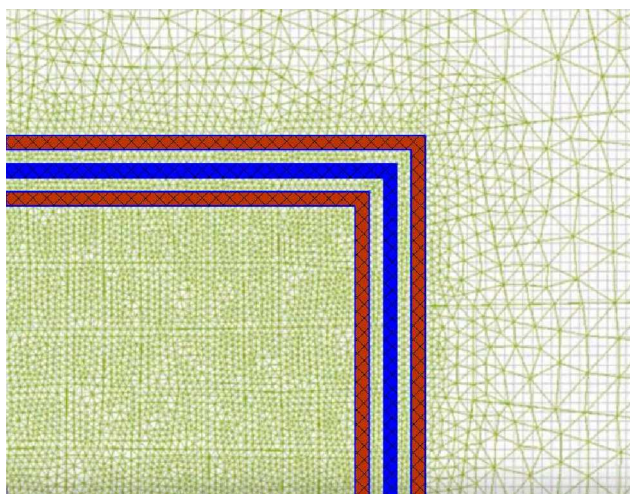


Рисунок 4.4 – Багатошарова структура екрану

Багатошарова структура забезпечує покращену ступінь екранування в порівнянні з одношаровою структурою. За допомогою моделювання було встановлено, що зовнішній шар екрану приймає основне навантаження магнітного впливу, що підкреслює важливість правильного вибору матеріалів і конструкції екрана (рис. 4.5) [37].

Дослідження дозволяє здійснювати аналіз стаціонарного і нестаціонарного магнітного поля. Отримані картини дозволяють розширити розуміння застосування екранування в різних умовах і показати, як можна моделювати та аналізувати електромагнітні імпульси та їх вплив на структури, що екранують.

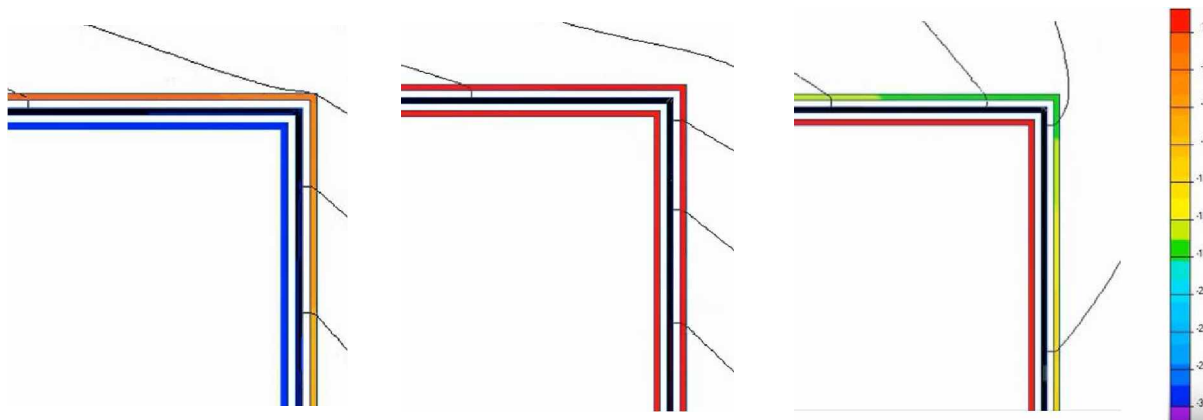


Рисунок 4.5 – Положення силових ліній магнітного поля та розподіл щільності струму в шарах багатошарового екрану в різні моменти часу

Здійснимо моделювання наведення струму у одиночному провіднику нестационарним магнітним полем, наприклад грозовим розрядом (рис. 4.6) [37].

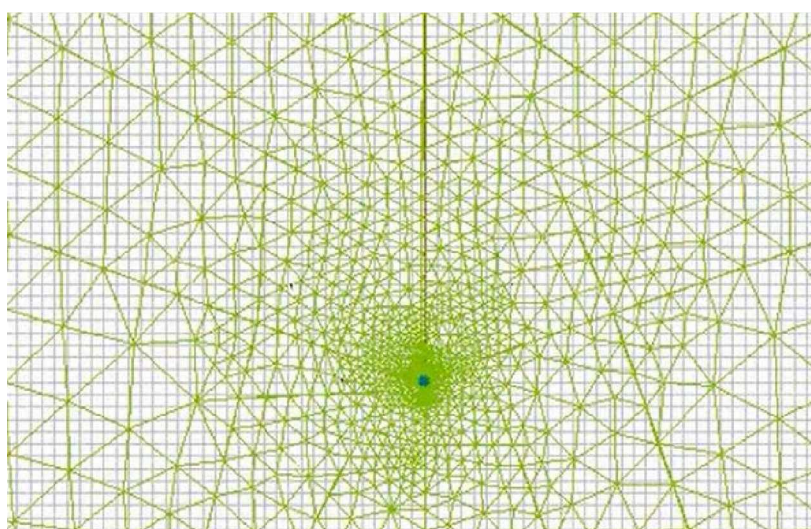


Рисунок 4.6 – Розташування одиночного металевго провідника у нестационарному магнітному полі, що згенеровано зовнішнім імпульсом

Для демонстрації впливу грозового розряду на одиночний провідник було побудовано графік, що ілюструє зміну наведеного нестационарним магнітним полем струму (рис. 4.7) [37].

Аналіз графіка показує значне підвищення сили струму в провіднику, що знаходиться під дією цього впливу.

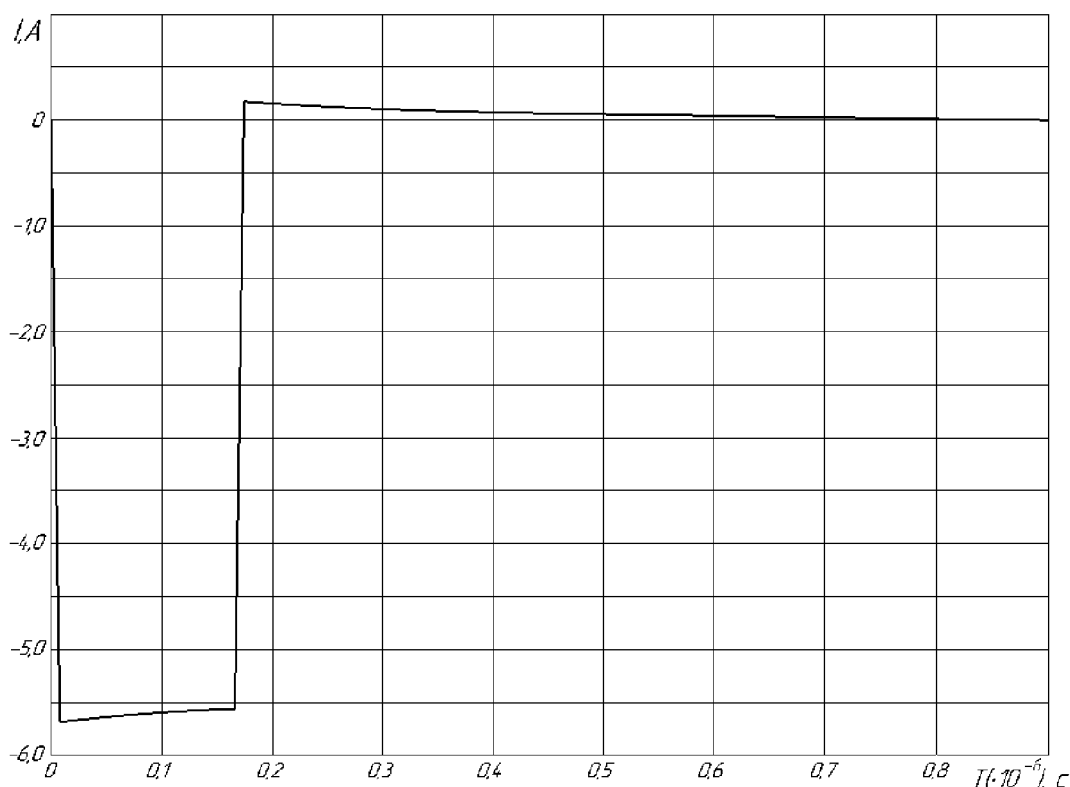


Рисунок 4.6 – Наведений нестаціонарним магнітним полем струм у одиночному провіднику

Для дослідження можливості зменшення цього впливу було застосовано принцип екранування – шляхом розміщення мідної пластини з одного боку від одиночного провідника і розташовану поруч (рис. 4.7).

Аналіз показав, що наявність мідної пластини значно впливає величину і характер індукованих струмів у провіднику, викликаючи їх зменшення (рис. 4.8). При цьому сама пластина, як екран, сприймає суттєвий вплив нестаціонарного магнітного поля і у ній наводяться відповідні значення струму (рис. 4.9), дія яких може бути перетворена у теплові прояви і наведення у мідній пластині блукаючих струмів, що можуть створювати свої магнітні поля [37].

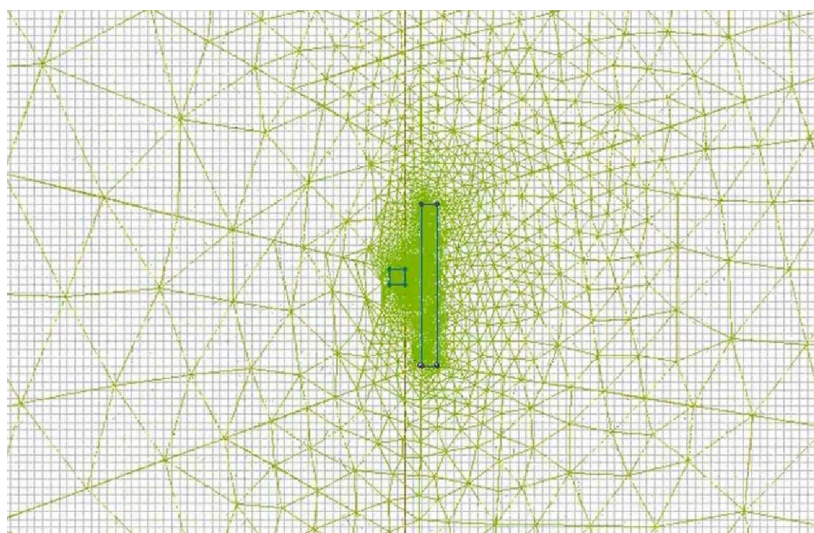


Рисунок 4.7 – Екранування одиночного провідника мідною пластиною з одного боку

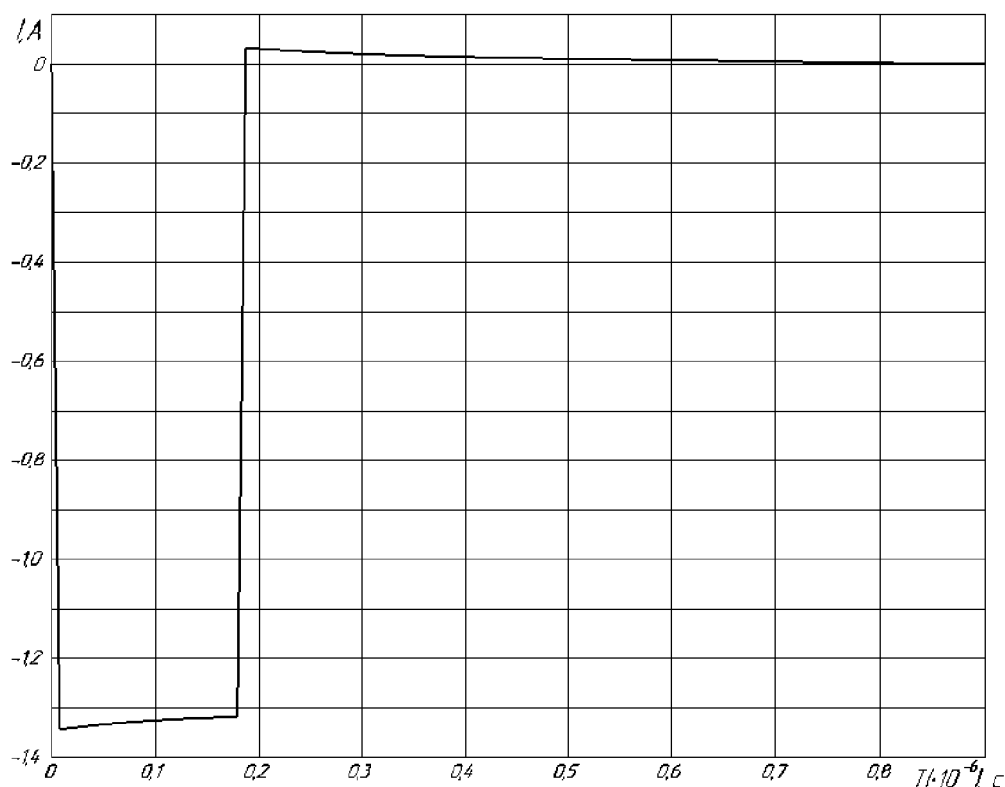


Рисунок 4.8 – Наведений нестационарним магнітним полем струм у одиночному провіднику при екранування цього провідника мідною пластиною з одного боку

У застосованій програмі можна змінювати фізичні властивості матеріалів екрану і провідників, що піддаються впливу магнітних

імпульсів, та визначати здатність до екранування. Різні матеріали та конструкції можуть значно змінювати розподіл магнітного поля та індукованих струмів.

Моделювання може дати розуміння впливу електромагнітних імпульсів і магнітних перешкод у світлі застосування різноманітних матеріалів і структур, демонструє, як за допомогою прикладних програм можна передбачати поведінку магнітних полів та індукованих струмів у різних умовах, що має важливе значення для розробки ефективних методів захисту та екранування [38].

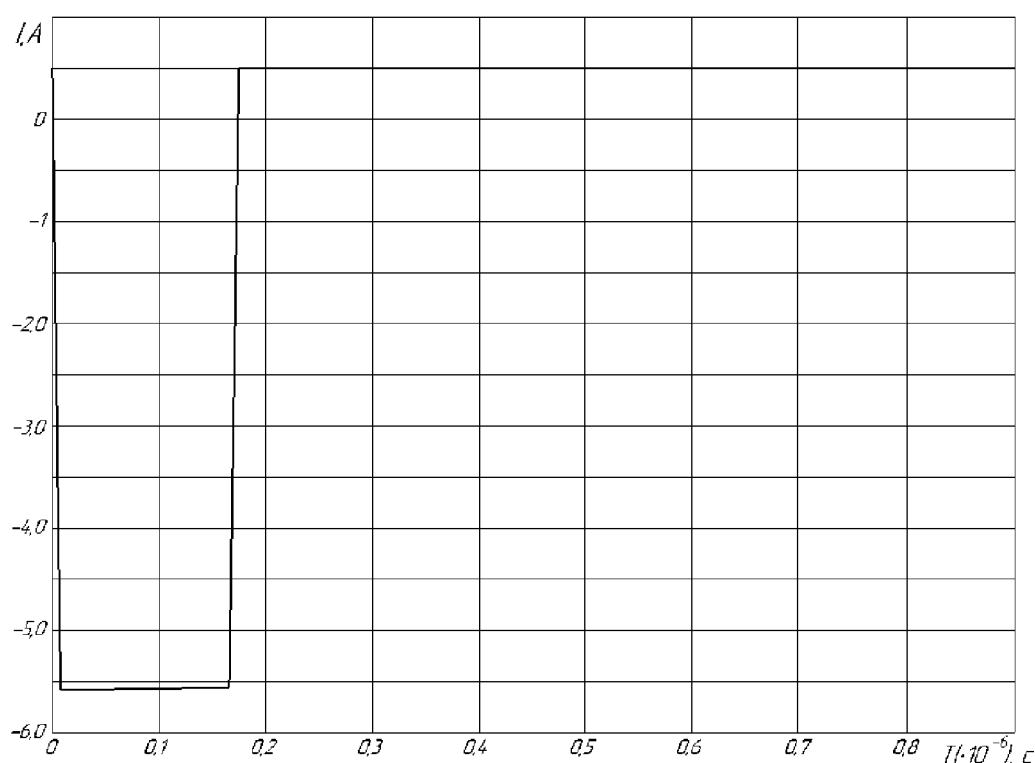


Рисунок 4.9 – Наведений нестационарним магнітним полем струм у екрануючій мідній пластині

Дослідження, що охоплюють моделювання електромагнітних явищ при екрануванні електричного обладнання, демонструють значну роль прикладних програм у цій галузі. Застосування комп'ютерного моделювання дозволяє глибоко аналізувати взаємодію магнітних полів з

різними матеріалами і структурами, що екранують, що є ключовим аспектом у розробці ефективних рішень для захисту електричного обладнання.

Використання програмного забезпечення дозволило точно моделювати і передбачати розподіл магнітного поля та індукованих струмів у різних умовах, що сприяє більш глибокому розумінню фізичних процесів, що відбуваються в областях, що екрануються. Особливо важливим є аналіз коефіцієнта екранування та оцінка ефективності різних матеріалів та конструкцій. Комп'ютерне моделювання дозволяє оцінити, як зміни у конструкції екрана чи виборі матеріалу впливають рівень захисту від магнітних полів. Це особливо актуально при роботі з магнітом'якими матеріалами та надпровідниками.

ВИСНОВКИ

У роботі було здійснено широке дослідження електромагнітної сумісності на електричних підстанціях і підкреслена її критична важливість у підтримці якісного та надійного енергопостачання.

Завдяки детальному аналізу та емпіричним дослідженням були висвітлені питання складної взаємодії різних електромагнітних явищ на підстанціях та їхній потенційний вплив як на обладнання підстанції, так і на електричну мережу.

Дослідження показали, що нехтування електромагнітною сумісністю може призвести до значних збоїв у роботі, починаючи від збоїв у роботі обладнання та закінчуючи серйозною нестабільністю та невизначеністю роботи електричних мереж.

Були розкриті нові виклики, пов'язані з інтеграцією сучасних технологій, таких як відновлювані джерела енергії та інтелектуальні мережеві системи, до існуючої інфраструктури. Нові джерела електромагнітних перешкод вимагає застосування передових стратегій по досягненню електромагнітної сумісності. І дана робота сприяла розробці таких стратегій, пропонуючи інноваційні рішення для пом'якшення електромагнітних перешкод і забезпечення безперебійної роботи енергосистем.

Іншим важливим аспектом дослідження є наголос на необхідності здійснення безперервного моніторингу та тестування на відповідність ЕМС. Було продемонстровано ефективність найсучасніших діагностичних інструментів і методів у виявленні та вирішенні проблем, пов'язаних з ЕМС, на підстанціях. Ці інструменти є незамінними в постійних зусиллях щодо підтримки цілісності та надійності енергетичних систем перед обличчям постійно зростаючих електромагнітних викликів. Майбутні дослідження повинні бути зосереджені на вдосконаленні стандартів

електромагнітної сумісності, розробці більш складних діагностичних інструментів і вивченні інноваційних підходів до проектування для подальшого захисту підстанцій від електромагнітних перешкод.

У ході досліджень були розглянуті різні сценарії, включаючи вплив грозових розрядів, моделювання екранування та аналіз одно- та багатошарових структур, що екранують. Використання програмного забезпечення дозволило точно моделювати і передбачати розподіл магнітного поля та індукованих струмів у різних умовах, що сприяє більш глибокому розумінню фізичних процесів, що відбуваються в областях, що екрануються.

Застосування прикладних програм для дослідження електромагнітних явищ при екрануванні електричного обладнання відкриває нові можливості для розробки більш ефективних і надійних рішень. Точність і глибина аналізу, що досягаються за допомогою комп'ютерного моделювання, значно покращують розуміння взаємодії магнітних полів з матеріалами, що екранують, що є ключовим для забезпечення захисту та безпеки електричних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кравченко В.І. Електромагнітна сумісність у техніці високих напруг.// у навч. посібнику Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – 930 с.
2. Жежеленко І.В. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саєнко. – Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – 319 с.
3. Півняк Г.Г., Шидловський А.К., Кігель Г.А., Рибалко А.Я., Хованська О.І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
4. Henry W. Ott. Electromagnetic compatibility engineering .– John Wiley & Sons, 2009. – 862 p.
5. ДСТУ ІЕС/TR 61000-1-2:2008. Національний стандарт України «Електромагнітна сумісність» Частина 1-2. Загальні положення. Методологія досягнення функційної безпечності електричного та електронного обладнання стосовно електромагнітних явищ (ІЕС/TR 61000-1-2:2001, IDT).
6. Жежеленко І.В., Рабінович М.Л., Божко В.М. Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.
7. Перехідні процеси в системах електропостачання / Півняк Г.Г., Винославський В.Н., Рибалко А.Я., Несен Л.І. и др. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. – 600 с.
8. ДСТУ ІЕС 61000-4-16:2007. Національний стандарт України «Електромагнітна сумісність» Частина 4-16. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до кондуктивних несиметричних завад у діапазоні частот від 0 Гц до 150 кГц.(ІЕС 61000-4-16:2002, IDT).

9. ДСТУ EN 61000-3-2:2015 Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми на емісію гармонік струму (для сили вхідного струму обладнання не більше ніж 16 А на фазу) (EN 61000-3-2:2014, ГОТ).

10. Silva D.T., Silvino J.L., de Melo, J.C.D. Detection and location of direct lightning strokes to overhead power transmission lines by measuring currents from shield wires. 2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010.

11. Canova A., Freschi F., Repetto M., Tartaglia M. Identification of power frequency industrial magnetic field sources for shielding purposes. Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004.

12. Hasselgren L., Moller E., Hamnerius Y. Calculation of magnetic shielding of a substation at power frequency using FEM. IEEE Transactions on Power Delivery, 9(3), p. 1398–1405.

13. Xuehai G., Jinliang H. Electromagnetic Interference on Secondary Systems of Substation Caused by Incoming Lightning Stroke. 2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility.

14. Keikko T., Kotiniitty J., Korpinen L. Calculations of magnetic fields from indoor distribution substation busbars. 2000 Power Engineering Society Summer Meeting.

15. Istenic M. Some aspects of magnetic shielding of a transformer substation using alternative shielding techniques. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. 2001.

16. Ioannidis A.I., Tsovilis T.E. Shielding Failure of High-Voltage Substations: A Fractal-Based Approach for Negative and Positive Lightning. IEEE Transactions on Industry Applications, 57(3), 2021. p. 2317–2325.

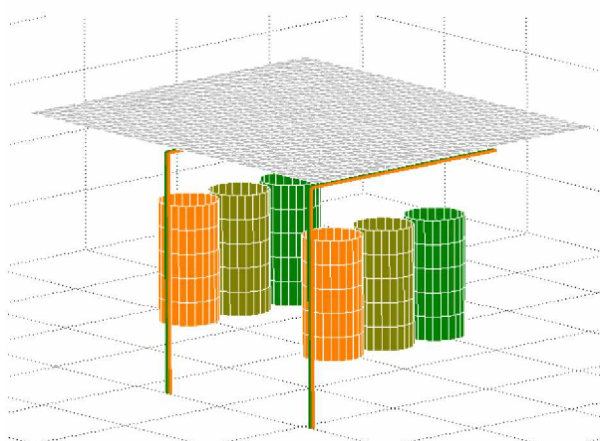
17. Desideri D., Guarnieri M., Maschio A., Moro F. Magnetic shielding of MV/LV substations: Numerical modeling and experimental validation. 43rd International Universities Power Engineering Conference. 2008.

18. Garzia F., Geri A. Active shielding design in full 3D space of indoor MV/LV substations using genetic algorithm optimization. IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record. 2003.
19. Trevino R., Guardado J.L., Molina E. A Model For Surge Distribution Studies on Substation Grounding Grids. IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC). 2019.
20. Hasselgren L., Moller E., Hamnerius Y. Three dimensional FEM calculations on shielding of power frequency magnetic fields from a substation. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 1993.
21. Lei Qi, Xiang Cui, Xuesong Gu. A simple method for measuring complex transfer impedance and admittance of shielded cable in substations. 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2006.
22. Бардик Є.І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання / Є.І. Бардик, М.П. Лукаш / К.: «Політехніка» НТУУ "КПІ" 2012. – 250 с.
23. Панова О.В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Панова Олена Василівна – К., 2014. – 151с.
24. Кветний Р.Н., Богач І.В., Бойко О.Р., Софіна О.Ю., Шушура О.М. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 1: Навчальний посібник, Вінниця: ВНТУ, – 2012.
25. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [Соловей О.І., Розен В.П., Плешков П.Г. та ін.]; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015, – 316 с.
26. Бахор З.М., Журахівський А.В. Проектування підстанцій електричних мереж: – Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 308 с.

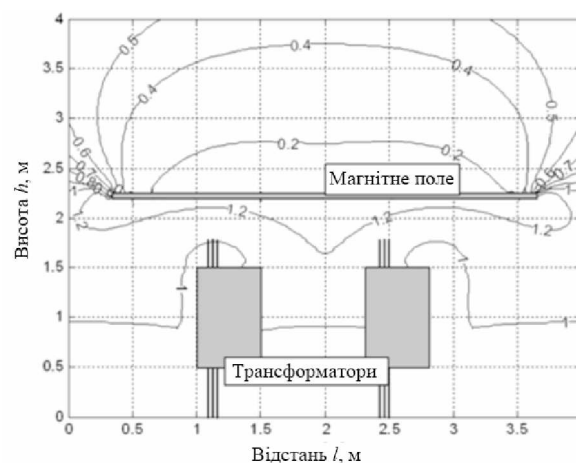
27. Бахор З.М. Основи проектування підстанцій та ліній електричних мереж: Конспект лекцій для студентів напрямку 6.050701 «Електротехніка та електротехнології». – Львів: В-во НУЛП, 2015. – 235 с.
28. Костишин, В. С. Електрична частина станцій та підстанцій : навч. посіб. / В.С. Костишин, М.Й. Федорів, Я.В. Бацала. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 243 с.
29. Електричні мережі та системи. Режим роботи розімкнених мереж: Навчальний посібник з дисципліни для всіх форм навчання та студентів іноземців напрямку підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»/Уклад. В.В.Кирик. – К.: НТУУ «КПІ». 2014. – 130 с.
30. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [Соловей О.І., Розен В.П., Плешков П.Г. та ін.]; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015, – 316 с.
31. L. Sevgi, Electromagnetic Modeling and Simulation, IEEE Press - John Wiley & Sons, Apr 2014.
32. Володарський Є.Т. Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання / Є.Т. Володарський, А.В. Волошко // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2014. – №. 318 (69). С. 10-18.
33. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015 Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. Київ: Мінрегіон, 2016. – 79 с.
34. ДНАОП 0.00-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – К.: ВП «ГРАНМНА», 2001. – 117 с.
35. Костишин, В.С. Електрична частина станцій та підстанцій: навчальний посібник / В.С. Костишин, М.Й. Федорів, Я.В. Бацала. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 243 с.

36. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навчальний посібник / М.Й. Бурбело, О.О. Бірюков, Л.М. Мельничук – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 204 с.
37. [Електронний ресурс]: <https://www.ansys.com/>
38. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень: навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2013.
39. Технічний регламент з електромагнітної сумісності обладнання, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2015 р. № 1077.
40. Dugan R.C., McGranaghan M.F., Santoso S., Beaty W.H. Electrical Power System Quality. - McGraw-Hill.-2004 – 521 p.
41. Francesco Lattarulo. Electromagnetic Compatibility in Power Systems. – ELSEVIER, London, 2007.
42. Правила улаштування електроустановок. – 2-ге вид., переробл., і допов. – Харків: Форт, 2009. – 736 с.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

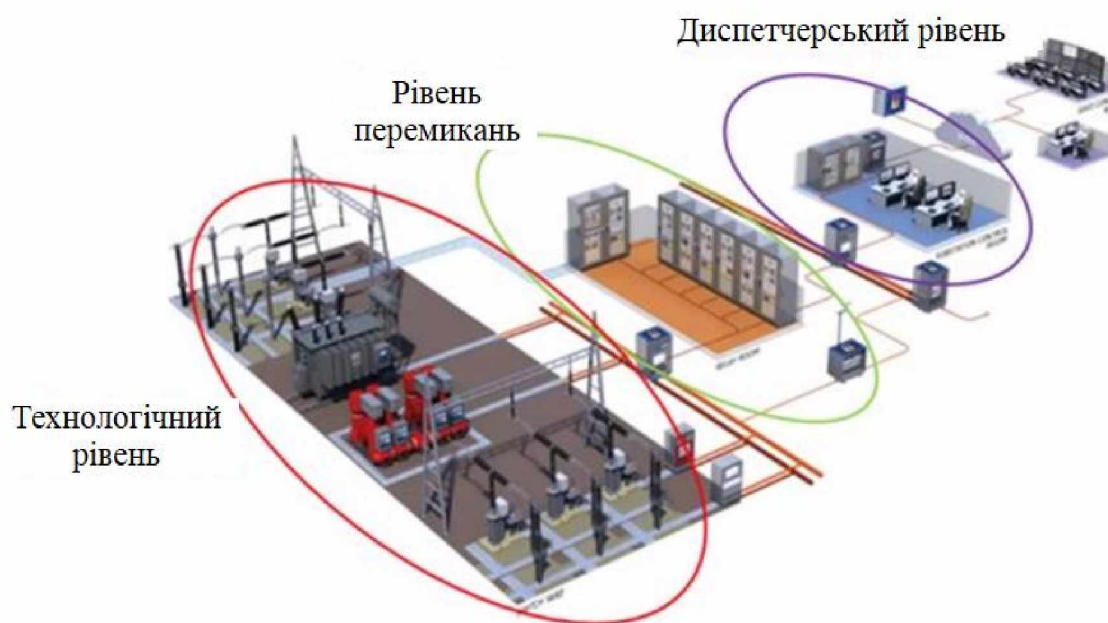


а)



б)

Схема екранування трансформаторів на підстанції: *а* – розташування екрану над трансформаторами, *б* – розподіл напруженості магнітного поля



Зонування на електричній підстанції

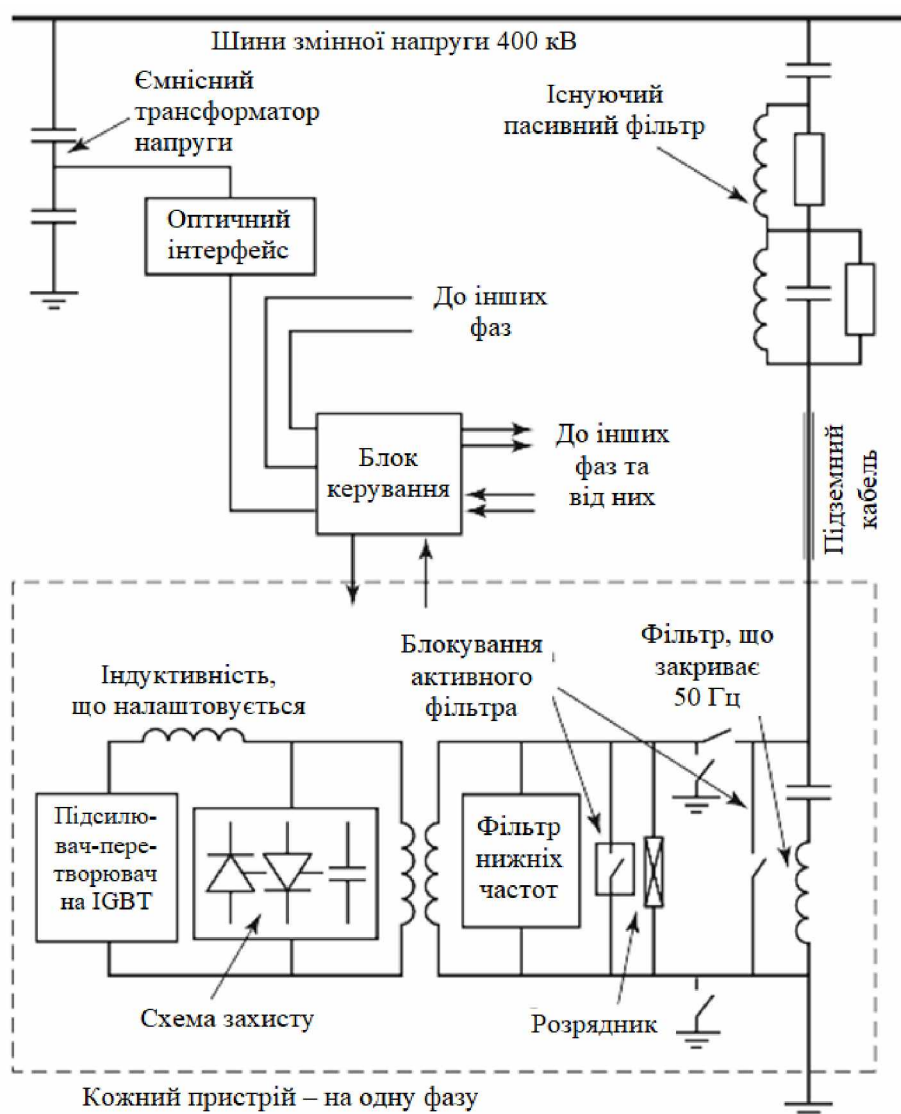
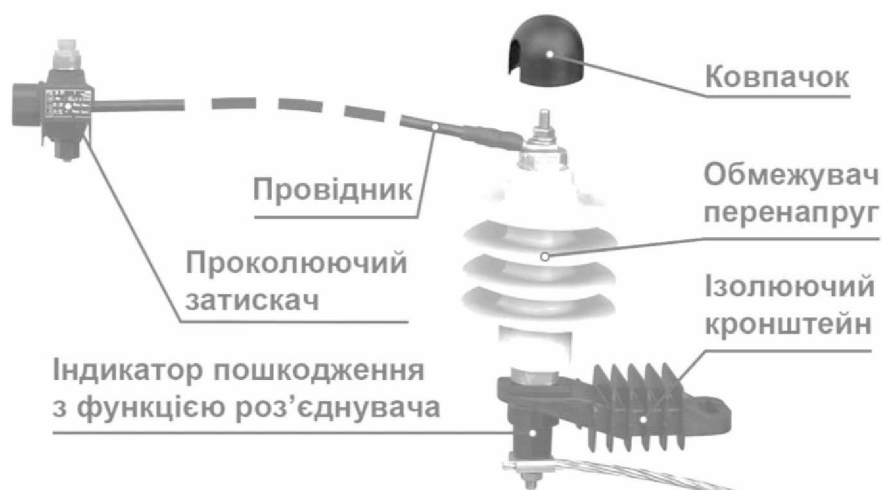
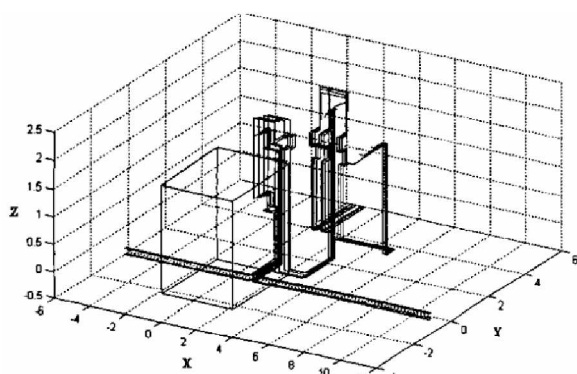


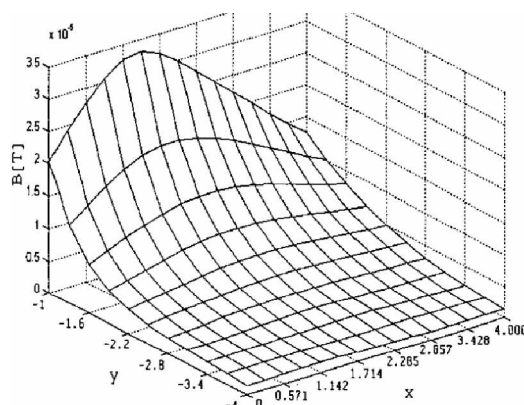
Схема активного фільтра змінного струму на перетворювальній підстанції



Комплект для монтажу обмежувача перенапруг



а)



б)

3D-видео розташування обладнання для аналізу (а) і розподіл густини магнітного потоку, що генерується в цільовому об'ємі (б)

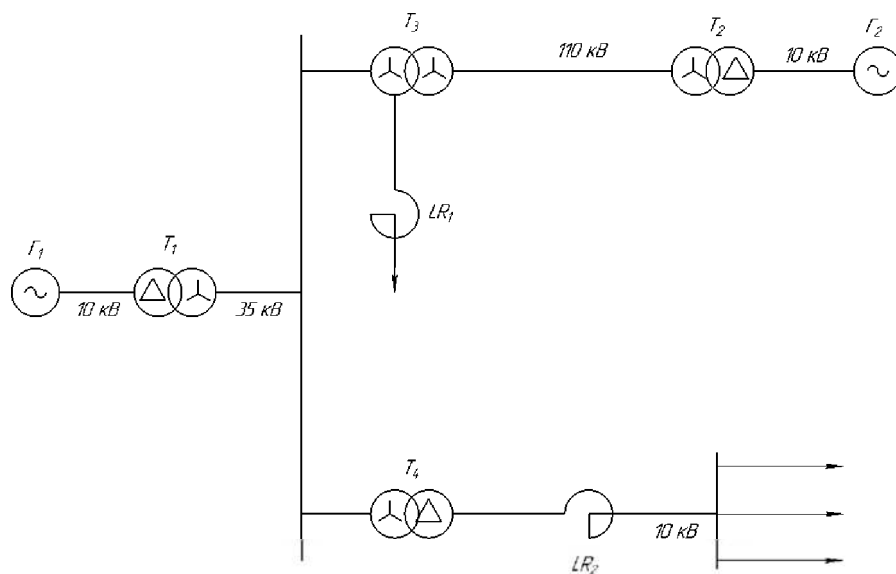
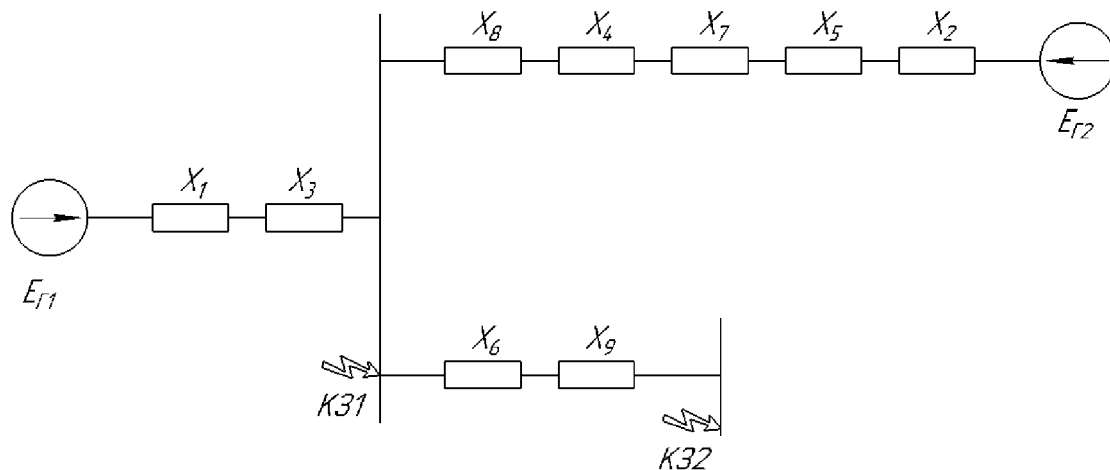
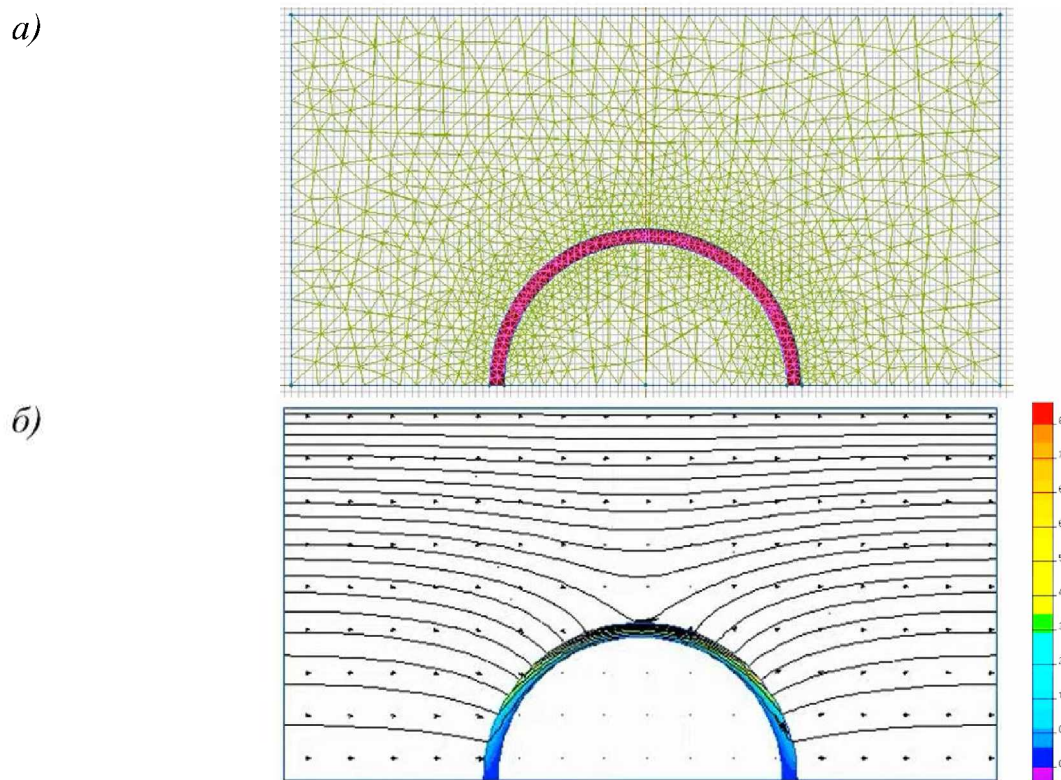


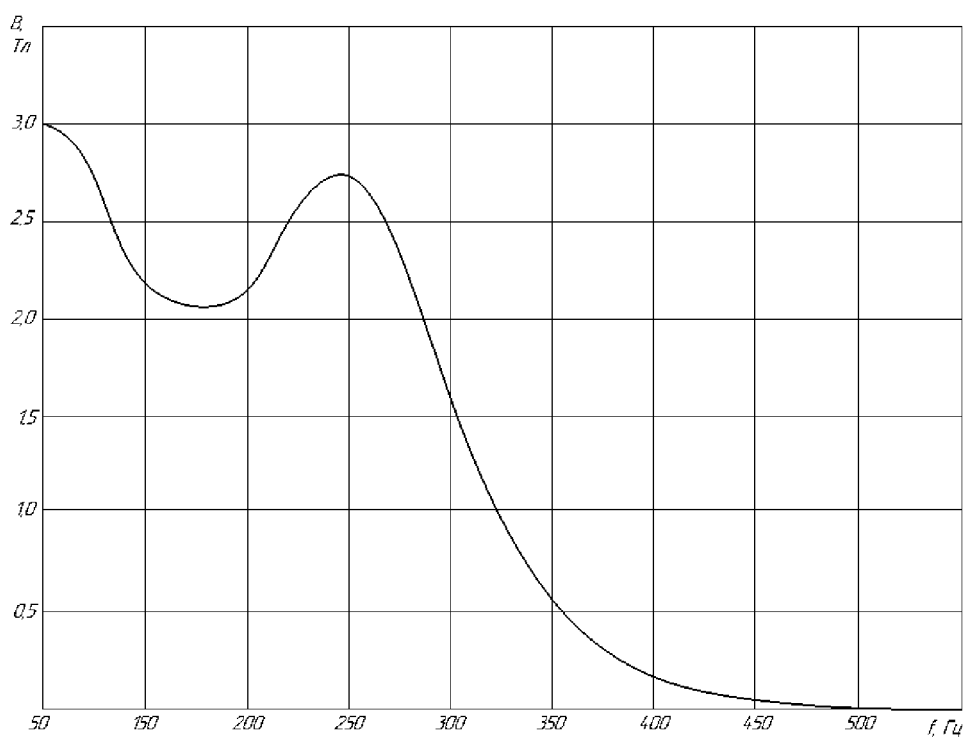
Схема підключення підстанції до енергосистеми



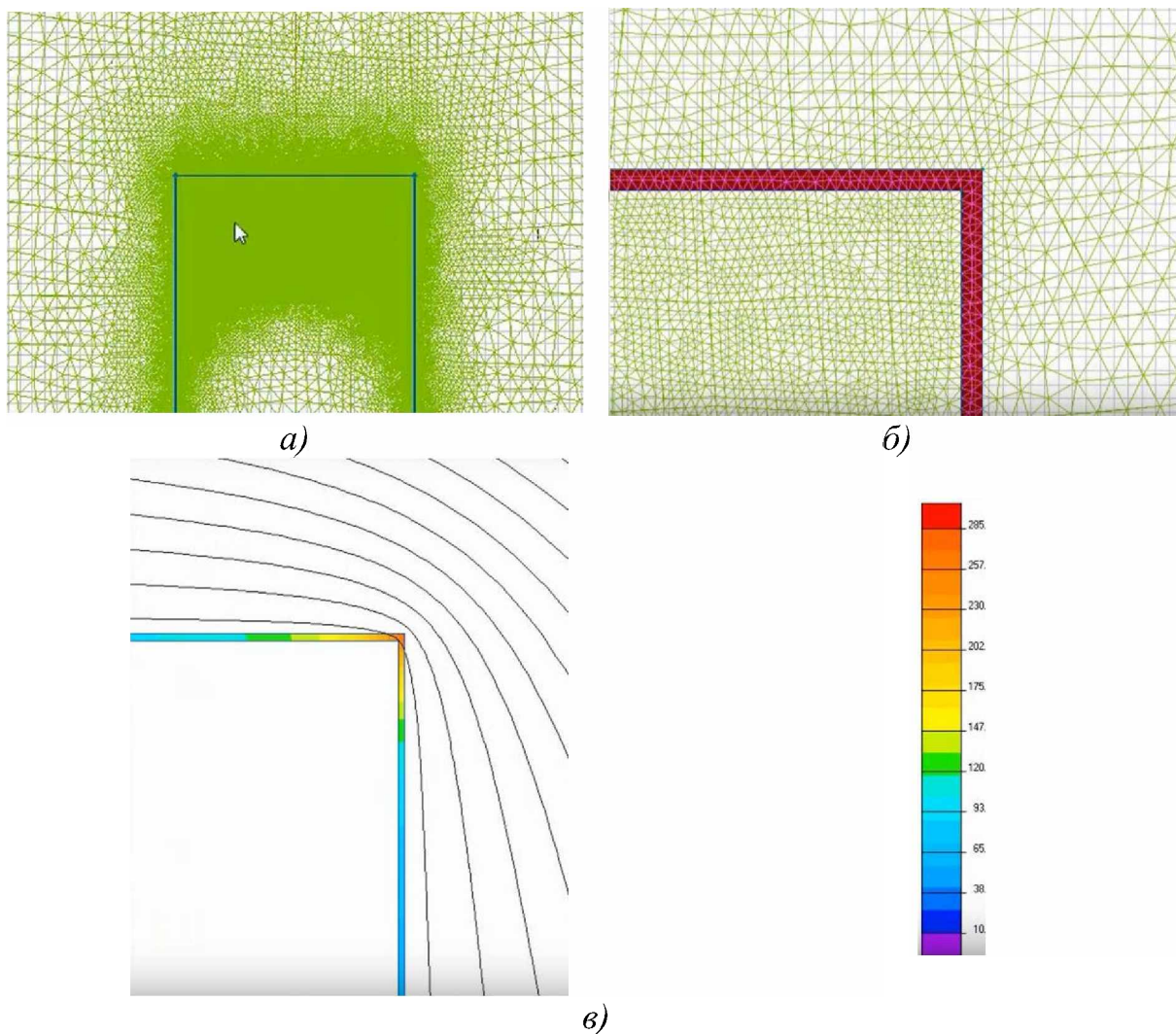
Однолінійна схема заміння



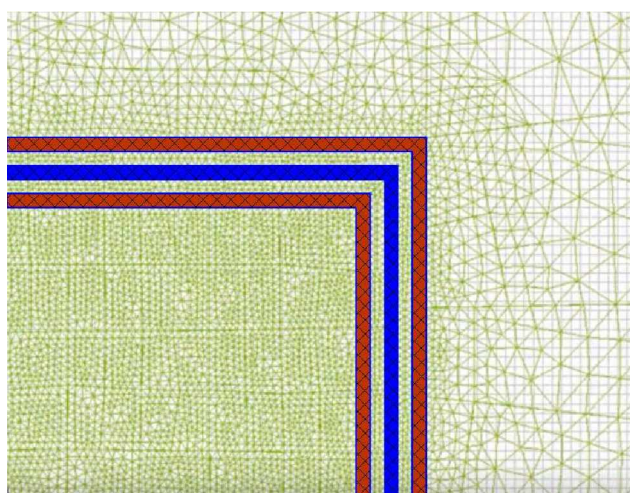
Визначення впливу магнітного поля змінного струму: *a* – картина магнітного поля навколо екрану, *б* – силові лінії магнітного поля та розподіл щільності струму в екрані



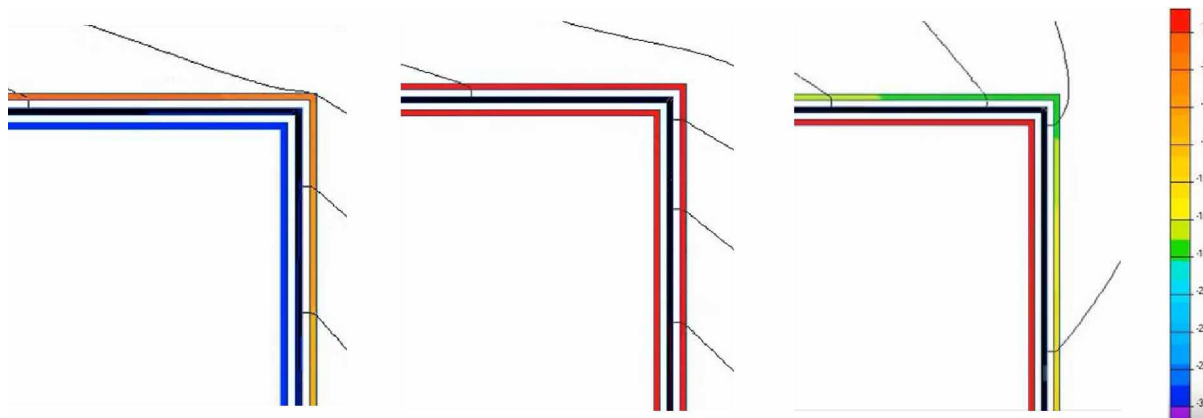
Зміна величини магнітної індукції всередині області, що захищається, в залежності від частоти зовнішнього магнітного поля



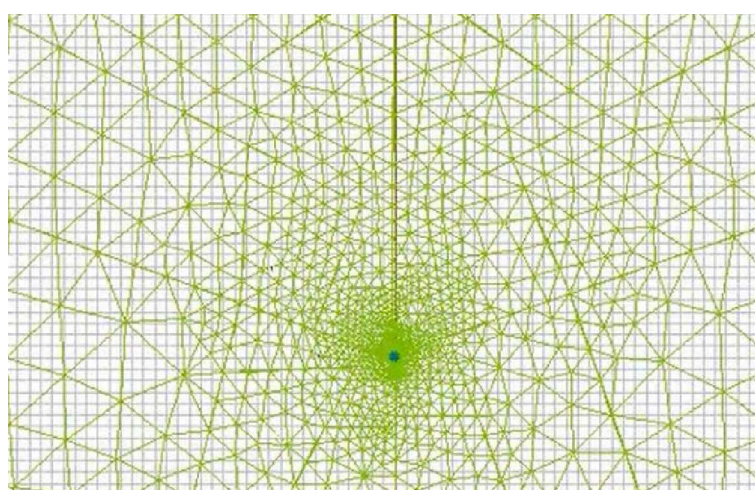
До визначення впливу магнітного поля змінного струму: *a* – картина магнітного поля навколо прямокутного екрану з міді, *б* – збільшена частина екрану, що демонструє його одношаровість, *в* – положення силових ліній магнітного поля та розподіл щільності струму на мідному екрані



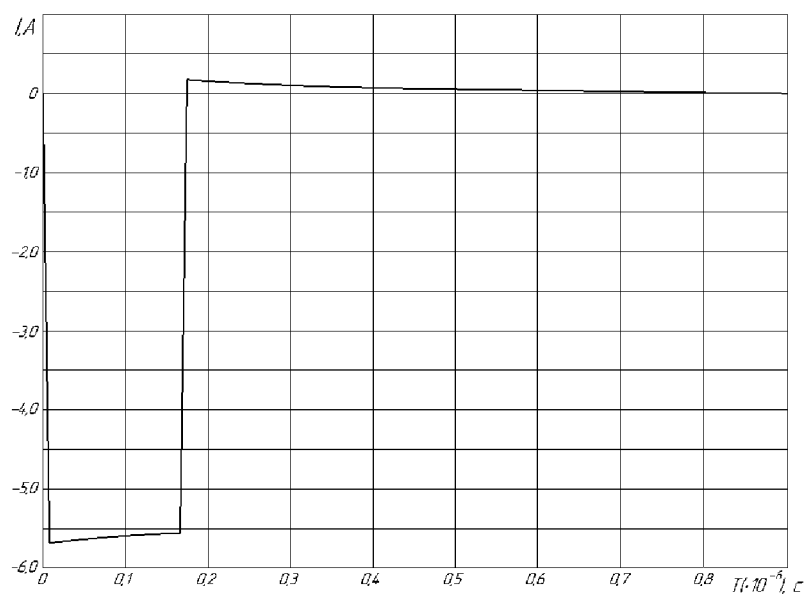
Багатошарова структура екрану



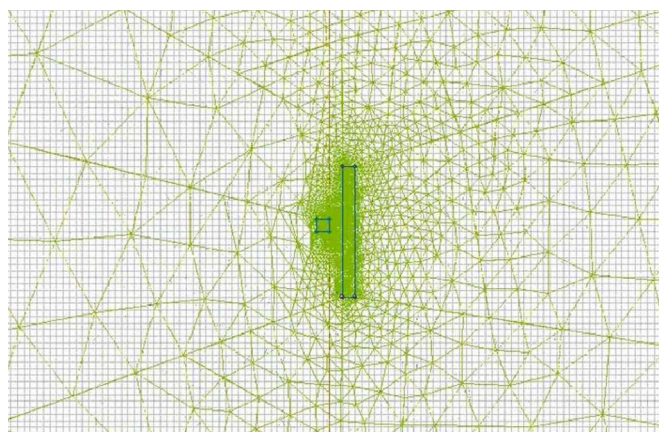
Положення силових ліній магнітного поля та розподіл щільності струму в шарах багатошарового екрану в різні моменти часу



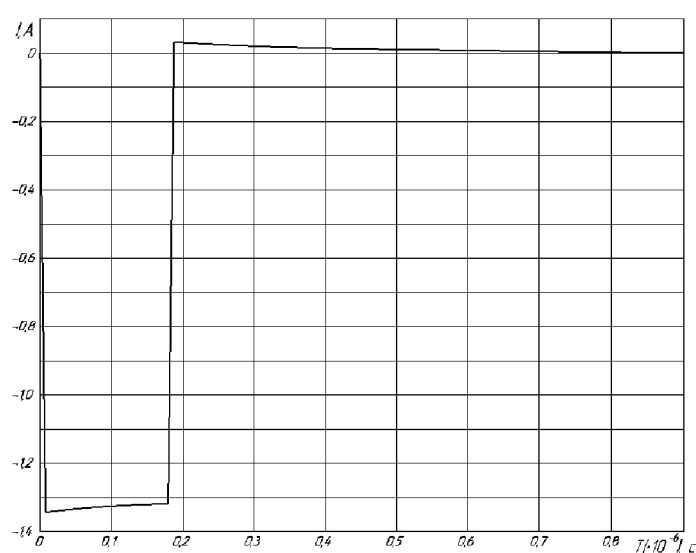
Розташування одиночного металевго провідника у нестаціонарному магнітному полі, що згенеровано зовнішнім імпульсом



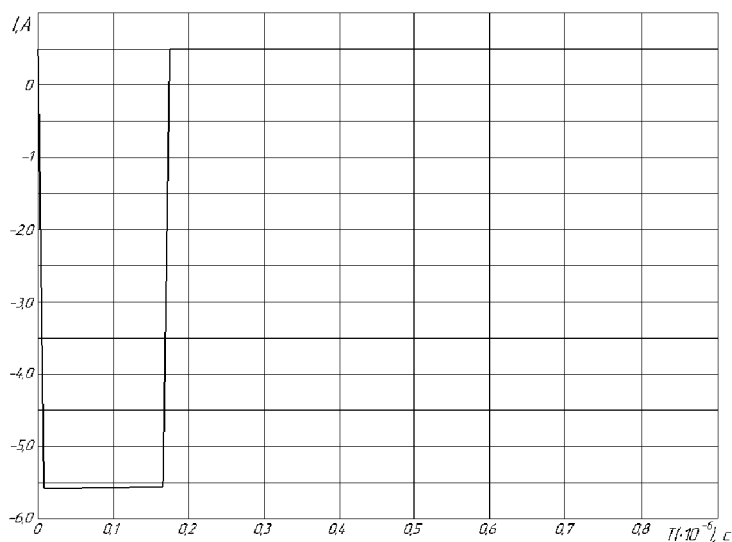
Наведений нестаціонарним магнітним полем струм у одиночному провіднику



Екранування одиночного провідника мідною пластиною з одного боку



Наведений нестаціонарним магнітним полем струм у одиночному провіднику при екранування цього провідника мідною пластиною з одного боку



Наведений нестаціонарним магнітним полем струм у екрануючій мідній пластині

ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____