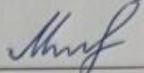


**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Максим ЩЕРБА

«__» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою

«Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: «Оптимізація ізоляційних систем високовольтного обладнання з
урахуванням перенапруг»

Виконав : студент IV курсу,
групи ЕВ-21

Брагинець Микола Владиславович

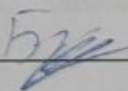
Керівник:

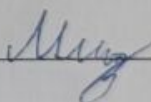
Кандидат технічних наук, доцент

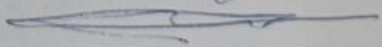
Михайленко Владислав Володимирович

Рецензент:

Халімовський Олексій. Модестович. _____

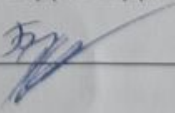






Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент



Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки

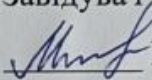
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Максим ЩЕРБА

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу

1. Тема Дипломного проєкту «Оптимізація ізоляційних систем високовольтного обладнання з урахуванням перенапруг», керівник проєкту Михайленко Владислав Володимирович, затверджені наказом по університету від «25» червня 2026 р. №1885.

2. Термін подання студентом роботи: 10.06.2026.

3. Вихідні дані до роботи: ізоляційні системи високовольтного електротехнічного обладнання; номінальні рівні напруги та перенапруг; характеристики повітряної, твердої, рідкої та газової ізоляції; параметри грозових, комутаційних, тимчасових і резонансних перенапруг; вимоги координації ізоляції та застосування обмежувачів перенапруг.

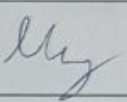
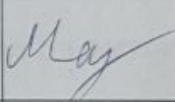
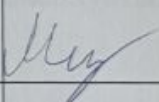
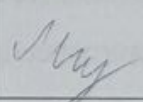
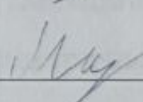
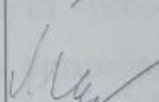
4. Зміст пояснювальної записки: вступ; аналітичний огляд ізоляційних систем високовольтного обладнання та перенапруг; розрахунок і моделювання електричних процесів в ізоляційній системі при дії перенапруг; оптимізація

ізоляційної системи та оцінка ефективності запропонованих технічних рішень;
загальні висновки; список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація доповіді (12 слайдів)

6. Дата видачі завдання: 03.05.2026.

Календарний план-графік

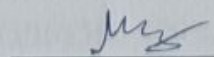
№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів проєкту	Примітк а
1	Аналіз теми, формування вступу, мети, об'єкта та завдань дослідження	01.05.2026–05.05.2026	
2	Підготовка розділу 1: аналітичний огляд ізоляційних систем високовольтного обладнання та видів перенапруг	06.05.2026–15.05.2026	
3	Розрахунок параметрів ізоляційної системи та базових рівнів перенапруг	16.05.2026–22.05.2026	
4	Моделювання грозового імпульсу, роботи обмежувача перенапруг і напруженості електричного поля	23.05.2026–29.05.2026	
5	Оптимізація ізоляційної системи, аналіз варіантів технічних рішень	30.05.2026–04.06.2026	
6	Підготовка загальних висновків, списку використаних джерел і графічних матеріалів	05.06.2026–08.06.2026	
7	Остаточне оформлення дипломної роботи відповідно до вимог	09.06.2026–10.06.2026	

Студент



Микола БРАГІНЕЦЬ

Керівник роботи



Владислав МИХАЙЛЕНКО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 49 сторінках, містить 8 рисунків, 7 таблиць та 7 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – ізоляційні системи високовольтного електротехнічного обладнання, що працюють в умовах дії робочих напруг і перенапруг різного походження.

Предмет дослідження – процеси впливу атмосферних, комутаційних, тимчасових і резонансних перенапруг на електричну міцність ізоляції, а також технічні рішення щодо зниження напруженості електричного поля та підвищення запасу електричної міцності.

Мета роботи – дослідити вплив перенапруг на ізоляційні системи високовольтного обладнання та розробити підходи до їх оптимізації з метою підвищення надійності, довговічності й економічності експлуатації електрообладнання.

У роботі виконано аналітичний огляд основ електричної міцності ізоляції, розглянуто механізми пробоя газових, рідких і твердих діелектриків, охарактеризовано основні види перенапруг та методи захисту ізоляційних систем. Проведено розрахунок рівнів перенапруг, напруженості електричного поля та коефіцієнтів запасу електричної міцності. Розглянуто роботу обмежувача перенапруг і виконано порівняльну оцінку варіантів оптимізації ізоляційної системи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих підходів під час проєктування, вибору та експлуатації високовольтного обладнання з урахуванням реальних експлуатаційних факторів і вимог координації ізоляції.

Ключові слова: ВИСОКОВОЛЬТНЕ ОБЛАДНАННЯ, ГРОЗОВИЙ ІМПУЛЬС, ЕЛЕКТРИЧНА МІЦНІСТЬ, ІЗОЛЯЦІЙНА СИСТЕМА, КООРДИНАЦІЯ ІЗОЛЯЦІЇ, НАПРУЖЕНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ, ОБМЕЖУВАЧ ПЕРЕНАПРУГ, ОПТИМІЗАЦІЯ ІЗОЛЯЦІЇ, ПЕРЕНАПРУГА.

ABSTRACT

The thesis consists of 49 pages, contains 8 figures, 7 tables, and 7 references.

Object of research – insulation systems of high-voltage electrical equipment operating under normal voltage conditions and overvoltages of different origin.

Subject of research – the influence of lightning, switching, temporary, and resonance overvoltages on the dielectric strength of insulation, as well as technical measures for reducing electric-field stress and increasing the dielectric strength margin.

Purpose of the study – to investigate the influence of overvoltages on insulation systems of high-voltage equipment and to develop approaches to their optimization in order to improve reliability, durability, and economic efficiency of electrical equipment operation.

The thesis presents an analytical review of the fundamentals of dielectric strength, considers breakdown mechanisms in gaseous, liquid, and solid dielectrics, and characterizes the main types of overvoltages and methods for protecting insulation systems. The calculation of overvoltage levels, electric-field intensity, and dielectric strength safety factors was performed. The operation of a surge arrester was analyzed, and a comparative assessment of insulation-system optimization options was carried out.

The practical value of the obtained results lies in the possibility of applying the proposed approaches in the design, selection, and operation of high-voltage equipment while taking into account real operating factors and insulation coordination requirements.

Keywords: INSULATION SYSTEM, HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT, OVERVOLTAGE, DIELECTRIC STRENGTH, ELECTRIC FIELD INTENSITY, SURGE ARRESTER, INSULATION COORDINATION, LIGHTNING IMPULSE, INSULATION OPTIMIZATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІЗОЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ПЕРЕНАПРУГ	12
1.1 Основи електричної міцності ізоляції	12
1.1.1 Пробій газів, твердих та рідких діелектриків	12
1.1.2 Основні характеристики ізоляції	14
1.2 Види перенапруг у електричних мережах	15
1.2.1 Атмосферні перенапруги	15
1.2.2 Комутаційні перенапруги	16
1.2.3 Тимчасові перенапруги	17
1.2.4 Резонансні явища та перенапруги	17
1.3 Ізоляційні системи високовольтного обладнання	18
1.3.1 Повітряна ізоляція	18
1.3.2 Тверда ізоляція	19
1.3.3 Газова ізоляція	20
1.4 Методи захисту ізоляційних систем від перенапруг	21
1.4.1 Обмежувачі перенапруг (ОПН)	21
1.4.2 Екранування електричного поля	22
1.4.3 Оптимізація міжелектродних відстаней	22
1.4.4 Градування ізоляції	23
1.4.5 Заземлення та вирівнювання потенціалів	23
Висновки до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ІЗОЛЯЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ПРИ ДІЇ ПЕРЕНАПРУГ	26
2.1 Вибір об'єкта дослідження та постановка розрахункової задачі	26
2.2 Вихідні дані для розрахунку	27
2.3 Розрахунок робочої напруги та базових рівнів перенапруг	28
2.4 Розрахунок напруженості електричного поля в ізоляційному проміжку	28

	7
2.5 Моделювання грозового імпульсу напруги	30
2.6 Розрахунок ефективності обмежувача перенапруг	31
2.7 Моделювання зміни напруженості електричного поля в часі	32
2.8 Аналіз впливу міжелектродної відстані на запас ізоляції	33
2.9 Порівняльна оцінка режимів роботи ізоляційної системи	34
Висновки до розділу 2	35
РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ІЗОЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	37
3.1 Вихідні дані для порівняння варіантів оптимізації	37
3.2 Вибір та перевірка обмежувача перенапруги	38
3.3 Оптимізація розподілу електричного поля	40
3.4 Раціоналізація міжелектродної відстані	42
3.5 Оцінка технічної ефективності запропонованих заходів	43
Висновки до розділу 3	46
ВИСНОВКИ	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	48

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВН – висока напруга

ВРП – відкритий розподільчий пристрій

ГІС – газоізолювана система / газоізолюваний розподільчий пристрій

ЕМ – електрична мережа

ЕМП – електромагнітне поле

ЕП – електричне поле

КЗ – коротке замикання

ОПН – обмежувач перенапруг нелінійний

ПЛ – повітряна лінія електропередавання

РП – розподільчий пристрій

ТП – трансформаторна підстанція

ЧР – часткові розряди;

IEC – International Electrotechnical Commission

SF₆ – гексафторид сірки, елегаз

ВСТУП

Сучасний етап розвитку електроенергетики характеризується значним зростанням рівнів напруги, ускладненням структури електричних мереж, а також підвищенням вимог до надійності та безпеки функціонування енергетичних систем. У цих умовах особливої актуальності набувають питання забезпечення довговічності та стійкості роботи високовольтного обладнання, яке є критично важливим елементом енергетичної інфраструктури. Відмова такого обладнання може призводити до масштабних аварій, порушення електропостачання споживачів та значних економічних втрат [1].

Одним із визначальних факторів надійної роботи високовольтного обладнання є ефективність його ізоляційної системи. Ізоляція виконує функцію електричного розділення струмоведучих частин, забезпечуючи необхідний рівень електричної міцності та запобігаючи виникненню пробою. У процесі експлуатації ізоляційні системи піддаються впливу електричних, теплових, механічних і кліматичних факторів, які з часом можуть призводити до їх деградації. Однак найбільш небезпечним чинником, що здатний викликати миттєвий вихід ізоляції з ладу, є перенапруги різного походження [2].

Перенапруги являють собою короточасні підвищення напруги в електричній мережі, рівень яких може суттєво перевищувати номінальні значення. Залежно від причин виникнення розрізняють атмосферні (грозові), комутаційні та тимчасові перенапруги. Атмосферні перенапруги виникають унаслідок дії блискавки та характеризуються високими амплітудами і надзвичайно крутим фронтом імпульсу. Комутаційні перенапруги пов'язані з процесами вмикання та вимикання елементів електричної мережі, а також із перехідними процесами в ній. Тимчасові перенапруги можуть виникати при аварійних режимах, наприклад, при замиканнях на землю або резонансних явищах [3].

Вплив перенапруг на ізоляцію має складний і багатфакторний характер. Під дією імпульсних перенапруг у матеріалі ізоляції виникають локальні перенапруження електричного поля, які можуть перевищувати допустимі

значення та спричиняти часткові розряди або повний пробій. Особливо небезпечними є неоднорідності електричного поля, що виникають у місцях конструктивних дефектів, на границях різних матеріалів або в зонах концентрації напруженості поля. З часом це призводить до поступового старіння ізоляції, зниження її електричної міцності та зростання ймовірності аварійних відмов [4].

З метою забезпечення надійної роботи високовольтного обладнання в умовах дії перенапруг застосовується концепція координації ізоляції, яка передбачає узгодження рівнів електричної міцності ізоляції з очікуваними максимальними значеннями перенапруг у мережі. Основні принципи такого підходу регламентуються міжнародними стандартами ІЕС, зокрема серією стандартів ІЕС 60071, які визначають методи вибору ізоляційних рівнів та вимоги до їх випробувань [5]. Координація ізоляції дозволяє досягти оптимального балансу між надійністю та економічністю електрообладнання.

Актуальність даної теми обумовлена тим, що традиційні підходи до проектування ізоляційних систем часто базуються на використанні значних коефіцієнтів запасу, що призводить до збільшення габаритів, маси та вартості обладнання. У сучасних умовах зростає потреба у більш раціональному використанні матеріалів та ресурсів, що вимагає оптимізації ізоляційних систем з урахуванням реальних експлуатаційних факторів, зокрема дії перенапруг. Оптимізація дозволяє не лише зменшити матеріальні витрати, але й підвищити ефективність використання обладнання, знизити рівень втрат та підвищити загальну надійність енергосистем [6].

Важливим напрямом у вирішенні цієї задачі є аналіз розподілу електричного поля в ізоляційних конструкціях, визначення критичних зон з підвищеною напруженістю та застосування технічних рішень, спрямованих на її вирівнювання. До таких рішень належать зміна геометрії електродів, використання екранів, градування ізоляції, а також застосування захисних пристроїв, що обмежують рівень перенапруг. Комплексне використання цих

заходів дозволяє суттєво знизити ризик пробою та підвищити довговічність ізоляційних систем [7].

Метою даної роботи є дослідження впливу перенапруг на ізоляційні системи високовольного обладнання та розробка підходів до їх оптимізації з метою підвищення надійності та економічності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих ізоляційних систем високовольного обладнання;
- дослідити природу та характеристики основних видів перенапруг;
- визначити вплив перенапруг на електричну міцність ізоляції;
- виконати розрахунок параметрів ізоляційних систем з урахуванням дії перенапруг;
- розробити заходи щодо оптимізації ізоляції;
- оцінити ефективність запропонованих технічних рішень.

Об'єктом дослідження є ізоляційні системи високовольного електротехнічного обладнання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проектуванні та експлуатації високовольного обладнання, що дозволить підвищити рівень його надійності, зменшити ризик аварійних ситуацій та оптимізувати витрати на ізоляційні матеріали.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІЗОЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ПЕРЕНАПРУГ

1.1 Основи електричної міцності ізоляції

Електрична міцність ізоляції є однією з ключових характеристик високовольтного обладнання, яка визначає його здатність витримувати дію електричних напружень без виникнення пробою. Надійність функціонування електроенергетичних систем значною мірою залежить від правильного вибору та проєктування ізоляційних систем, які повинні забезпечувати необхідний рівень електричної міцності в умовах дії як робочих напруг, так і перенапруг різного походження [1,2].

Ізоляційні системи високовольтного обладнання являють собою складні багатокомпонентні структури, що включають газові, рідкі та тверді діелектрики, які працюють у різних умовах електричного поля. Основним критерієм їх працездатності є здатність протистояти електричному пробою — процесу раптової втрати діелектричних властивостей матеріалу під дією електричного поля.

1.1.1 Пробій газів, твердих та рідких діелектриків

Пробій газів є найбільш дослідженим процесом і широко використовується як модель для аналізу електричної міцності ізоляції. У газах пробій виникає внаслідок іонізаційних процесів, коли під дією електричного поля вільні електрони набувають достатньої енергії для іонізації молекул газу, що призводить до лавинного зростання кількості заряджених частинок [1].

Залежність пробивної напруги від параметрів середовища описується законом Пашена:

$$V_{np} = f(pd) \quad (1.1)$$

де: p – тиск газу, Па;

d – відстань між електродами, м.

Цей закон показує, що електрична міцність газового проміжку залежить не окремо від тиску чи відстані, а від їх добутку. При певному значенні досягається мінімальна пробивна напруга, що має важливе значення при проектуванні ізоляції.

Розрізняють такі основні стадії пробою газу:

- початкова іонізація;
- розвиток електронних лавин;
- утворення стримерів;
- формування каналу пробою.

Особливу роль відіграє неоднорідність електричного поля. У місцях концентрації поля (гострі краї, дефекти) пробій може відбуватися при значно нижчих напругах, ніж у рівномірному полі.

Рідкі діелектрики, такі як трансформаторна олива, широко застосовуються у високовольтному обладнанні завдяки своїм ізоляційним і тепловідвідним властивостям. Механізм їх пробою є більш складним і залежить від багатьох факторів, серед яких:

- наявність домішок (волога, газові включення);
- температура;
- швидкість наростання напруги;
- стан електродів.

Пробій рідин може мати такі форми:

- електронний пробій;
- тепловий пробій;
- пробій через газові бульбашки.

Особливо небезпечним є наявність газових включень, у яких напруженість електричного поля значно вища, ніж у самій рідині. Це призводить до локального пробою та подальшого руйнування ізоляції.

Тверді діелектрики використовуються в ізоляції кабелів, трансформаторів, ізоляторів та інших елементів високовольтного обладнання. Механізми їх пробою значно складніші та можуть включати:

- електронний пробій;
- тепловий пробій;
- електромеханічний пробій;
- пробій внаслідок часткових розрядів.

Тепловий пробій виникає внаслідок локального нагріву матеріалу через діелектричні втрати, що призводить до зниження його електричної міцності. Часткові розряди, які виникають у порожнинах або на межах розділу матеріалів, є однією з основних причин старіння твердої ізоляції.

З часом під дією електричних напружень і часткових розрядів відбувається деградація структури матеріалу, що знижує його діелектричні властивості та може призвести до повного пробою.

1.1.2 Основні характеристики ізоляції

Для оцінки працездатності ізоляційних систем використовуються такі основні характеристики:

- електрична міцність;
- пробивна напруга;
- діелектричні втрати;
- стійкість до часткових розрядів;
- імпульсна міцність ізоляції.

Електрична міцність визначається максимальною напруженістю електричного поля, яку може витримати ізоляція без пробою:

$$E = \frac{U}{d} \quad (1.2)$$

де U – прикладена напруга, кВ;

d – відстань між електродами, м.

Пробивна напруга є критичним значенням напруги, при якому відбувається руйнування ізоляції. Вона залежить від:

- геометрії електродів;
- типу ізоляції;

- умов навколишнього середовища;
- характеру напруги (постійна, змінна, імпульсна).

Діелектричні втрати характеризують енергію, що розсіюється в ізоляції у вигляді тепла. Вони визначаються через тангенс кута діелектричних втрат. Зростання цього параметра свідчить про погіршення стану ізоляції.

Часткові розряди не призводять до негайного пробою, але викликають поступове руйнування ізоляції. Вони є важливим діагностичним показником стану ізоляції.

1.2 Види перенапруг у електричних мережах

Перенапруги є одним із найважливіших факторів, що впливають на надійність роботи електроенергетичних систем та визначають вимоги до ізоляційних систем високовольтного обладнання. Вони являють собою короточасні або тривалі підвищення напруги відносно номінального рівня, які можуть перевищувати допустимі значення та спричиняти пошкодження ізоляції, прискорене старіння матеріалів або повний пробій [1, 2].

Залежно від причин виникнення та характеру протікання, перенапруги поділяються на атмосферні (грозові), комутаційні, тимчасові та резонансні. Кожен із цих типів має свої фізичні механізми формування, часові характеристики та ступінь небезпеки для ізоляції.

1.2.1 Атмосферні перенапруги

Атмосферні перенапруги виникають внаслідок прямих або індукованих ударів блискавки в елементи електричної мережі або поблизу них. Вони є найбільш небезпечними з точки зору амплітуди напруги, яка може досягати сотень кіловольт і навіть мегавольт [1].

Основні джерела виникнення:

- прямий удар блискавки в лінію електропередачі;
- удар блискавки в землю поблизу лінії (індуковані перенапруги);
- зворотні перекриття ізоляції опор.

Типовою формою грозового імпульсу є стандартна хвиля $1,2/50$ мкс, що характеризується швидким наростанням і відносно повільним спадом напруги. Такі імпульси створюють надзвичайно високі градієнти електричного поля, що може призводити до пробоя ізоляції навіть при короткочасному впливі.

Особливості атмосферних перенапруг:

- дуже велика амплітуда;
- крутий фронт (висока швидкість зміни напруги);
- локальний характер впливу;
- випадковість виникнення.

Небезпека цих перенапруг полягає в тому, що вони можуть викликати пробій зовнішньої ізоляції (повітряних проміжків) і внутрішньої ізоляції обладнання. Для захисту від грозових перенапруг використовуються грозозахисні троси, заземлення та обмежувачі перенапруг.

1.2.2 Комутаційні перенапруги

Комутаційні перенапруги виникають у процесі перемикання елементів електричної мережі, зокрема при:

- включенні та відключенні ліній електропередачі;
- комутації трансформаторів;
- перемиканні реакторів і конденсаторних установок;
- ліквідації коротких замикань [2].

На відміну від атмосферних, комутаційні перенапруги мають меншу амплітуду, але значно більшу тривалість. Їх характер визначається перехідними процесами в електричних колах, які супроводжуються коливаннями напруги та струму.

Основні причини виникнення:

- накопичення енергії в індуктивних і ємнісних елементах;
- розрив струму в індуктивному колі;
- повторні запалювання дуги у вимикачах.
- Характерні особливості:

- середня або висока амплітуда;
- більша тривалість порівняно з грозовими імпульсами;
- значний вплив на внутрішню ізоляцію обладнання;
- залежність від режиму роботи мережі.

Комутаційні перенапруги є визначальними при проектуванні ізоляції для мереж високих і надвисоких напруг (220 кВ і вище), оскільки саме вони часто задають необхідний рівень ізоляції.

1.2.3 Тимчасові перенапруги

Тимчасові перенапруги виникають у результаті порушення нормального режиму роботи електричної мережі і можуть діяти протягом значно більшого часу, ніж імпульсні перенапруги. Вони зазвичай пов'язані з аварійними або ненормальними режимами [3].

Основні причини:

- однофазні замикання на землю;
- відключення навантаження;
- ферорезонансні явища;
- несиметрія фаз.

Тимчасові перенапруги характеризуються:

- відносно невеликою кратністю (зазвичай 1,2–2,5 від номінальної напруги);
- значною тривалістю (від кількох періодів до секунд);
- впливом на тепловий режим ізоляції.

Незважаючи на відносно невелику амплітуду, тривалість дії таких перенапруг може призводити до перегріву ізоляції, зростання діелектричних втрат та прискореного старіння матеріалів.

1.2.4 Резонансні явища та перенапруги

Резонансні перенапруги виникають у випадках, коли параметри електричної мережі (індуктивність і ємність) створюють умови для резонансу. У

таких умовах навіть при нормальних рівнях напруги можливе значне зростання амплітуди коливань [2].

Основні види резонансу:

- серійний резонанс;
- паралельний резонанс;
- ферорезонанс.

Ферорезонанс є особливо небезпечним явищем, яке виникає в нелінійних колах за участю магнітопроводів трансформаторів. Він може призводити до значних перенапруг і нестійких режимів роботи.

Особливості резонансних перенапруг:

- можливість тривалого існування;
- значна амплітуда;
- складний нелінійний характер;
- важкість прогнозування.

Такі перенапруги можуть виникати навіть у нормальних режимах роботи при певному поєднанні параметрів мережі, що робить їх особливо небезпечними для ізоляції.

1.3 Ізоляційні системи високовольтного обладнання

Ізоляційні системи високовольтного обладнання є одним із ключових елементів, що забезпечують надійність і безпечність роботи електроенергетичних установок. Вони призначені для електричного розділення струмоведучих частин, обмеження струмів витоку, а також запобігання пробою при дії робочих напруг і перенапруг різного характеру. Конструкція ізоляційних систем визначається рівнем напруги, умовами експлуатації, видом обладнання та вимогами до його надійності [1].

Ізоляція у високовольтному обладнанні, як правило, є комбінованою і включає різні типи діелектриків — газові, рідкі та тверді, які працюють спільно. Кожен тип ізоляції має свої фізичні властивості, переваги та обмеження, що визначає доцільність його використання в конкретних умовах.

1.3.1 Повітряна ізоляція

Повітряна ізоляція є найпростішим і найбільш широко застосовуваним видом ізоляції у високовольних установках. Вона використовується в повітряних лініях електропередачі, відкритих розподільчих пристроях (ВРП), а також у зовнішній ізоляції апаратів.

Основною перевагою повітряної ізоляції є:

- простота конструкції;
- відсутність необхідності у спеціальних ізоляційних матеріалах;
- здатність до самовідновлення після пробою;
- низька вартість.

Проте повітряна ізоляція має низку суттєвих недоліків:

- залежність електричної міцності від атмосферних умов (вологість, тиск, температура);
- значні габарити ізоляційних проміжків;
- чутливість до забруднення;
- підвищена ймовірність перекриття при грозових перенапругах.

Електрична міцність повітря визначається напруженістю електричного поля, при якій відбувається пробій. У реальних умовах важливу роль відіграє неоднорідність поля, яка виникає через геометрію електродів. Для зменшення концентрації поля застосовуються:

- округлення струмоведучих частин;
- використання коронних кілець;
- оптимізація відстаней між елементами.

Повітряна ізоляція є ефективною для зовнішніх умов, однак її використання обмежене при високих напругах через значні розміри установок.

1.3.2 Тверда ізоляція

Тверда ізоляція широко використовується у внутрішніх елементах високовольного обладнання, зокрема в кабелях, трансформаторах, ізоляторах, вимикачах та інших пристроях.

До основних матеріалів твердої ізоляції належать:

- паперово-масляна ізоляція;

- полімерні матеріали (поліетилен, епоксидні смоли);
- керамічні матеріали;
- композитні діелектрики [2].

Переваги твердої ізоляції:

- висока електрична міцність;
- компактність конструкції;
- стабільність параметрів при нормальних умовах;
- можливість використання у складних конструкціях.

Недоліки:

- незворотність пробою;
- схильність до старіння;
- чутливість до часткових розрядів;
- накопичення дефектів у матеріалі.

Особливо важливим є явище часткових розрядів, які виникають у мікропорожнинах або на межах розділу матеріалів. Вони не викликають миттєвого пробою, але поступово руйнують структуру ізоляції.

З часом у твердій ізоляції можуть розвиватися процеси:

- електричного старіння;
- теплової деградації;
- механічного руйнування.

Це вимагає ретельного контролю якості матеріалів і технології виготовлення.

1.3.3 Газова ізоляція

Газова ізоляція на основі гексафториду сірки (SF_6) широко використовується у сучасному високовольтному обладнанні, зокрема в газоізолюваних розподільчих пристроях (GIS), вимикачах і трансформаторах.

Основні переваги газової ізоляції

- висока електрична міцність (у 2–3 рази вища за повітря);
- висока електронегативність, що пригнічує розвиток розрядів;
- здатність до самовідновлення після пробою;

- компактність обладнання.

Газ SF₆ ефективно поглинає вільні електрони, що перешкоджає розвитку електронних лавин і підвищує стійкість ізоляції до пробою.

Однак використання SF₆ має ряд недоліків:

- висока вартість;
- складність герметизації обладнання;
- екологічна небезпека (SF₆ є сильним парниковим газом);
- утворення токсичних продуктів розкладу при пробой.

У газоізованих системах велике значення має рівномірність електричного поля. Для цього застосовуються спеціальні форми електродів, які мінімізують концентрацію напруженості.

Газова ізоляція дозволяє значно зменшити габарити обладнання, що особливо важливо в умовах обмеженого простору.

1.4 Методи захисту ізоляційних систем від перенапруг

Забезпечення надійного функціонування високовольтного обладнання неможливе без ефективного захисту ізоляційних систем від дії перенапруг. Як було розглянуто у попередньому підрозділі, перенапруги можуть мати різну природу та характеристики, однак їх спільною особливістю є здатність перевищувати допустимі рівні напруги та викликати пошкодження ізоляції.

З метою запобігання негативному впливу перенапруг застосовується комплекс технічних заходів, що включає як конструктивні рішення, так і використання спеціальних захисних пристроїв. Основною метою цих заходів є обмеження рівня напруги до безпечного значення та зниження напруженості електричного поля в ізоляційних системах.

1.4.1 Обмежувачі перенапруг (ОПН)

Одним із найбільш ефективних засобів захисту від перенапруг є обмежувачі перенапруг (ОПН), які широко застосовуються в електроенергетичних системах.

ОПН – це нелінійні електротехнічні пристрої, які в нормальному режимі мають дуже великий опір і практично не впливають на роботу мережі, але при перевищенні певного рівня напруги різко знижують свій опір, відводячи надлишкову енергію в землю.

Принцип роботи базується на використанні варисторів на основі оксиду цинку, які мають вольт-амперну характеристику нелінійного типу:

- при номінальній напрузі → високий опір;
- при перенапрузі → різке зниження опору;
- після зникнення перенапруги → відновлення початкового стану.

Основні переваги ОПН:

- висока швидкодія;
- ефективне обмеження імпульсних перенапруг;
- відсутність іскрових проміжків (у сучасних конструкціях);
- довговічність.

Основними параметрами ОПН є:

- номінальна напруга;
- залишкова напруга;
- енергоємність;
- струм пропускання.

Застосування ОПН дозволяє суттєво знизити рівень перенапруг, що діють на ізоляцію, і, відповідно, зменшити вимоги до її електричної міцності. Це є одним із ключових факторів оптимізації ізоляційних систем.

1.4.2 Екранування електричного поля

Екранування є ефективним методом зниження напруженості електричного поля в критичних зонах ізоляції. Воно полягає у використанні спеціальних провідних або напівпровідникових елементів, які перерозподіляють електричне поле.

Основні способи екранування:

- встановлення металевих екранів;
- використання коронних кілець;

- застосування градуйованих електродів.

Екранування дозволяє:

- зменшити локальні концентрації електричного поля;
- запобігти виникненню часткових розрядів;
- підвищити електричну міцність ізоляції.

Особливо важливе екранування у місцях переходу між різними матеріалами або на краях електродів, де можливе різке зростання напруженості поля.

1.4.3 Оптимізація міжелектродних відстаней

Одним із найпростіших і водночас ефективних способів підвищення електричної міцності є оптимізація відстаней між струмоведучими частинами.

Однак надмірне збільшення відстаней призводить до:

- зростання габаритів обладнання;
- збільшення вартості;
- ускладнення конструкції.

Тому оптимізація полягає у виборі такого значення відстані, яке забезпечує необхідний рівень електричної міцності при мінімальних витратах.

1.4.4 Градування ізоляції

Градування ізоляції – це метод вирівнювання розподілу електричного поля шляхом зміни властивостей або геометрії ізоляційного середовища.

Розрізняють:

- геометричне градування (зміна форми електродів);
- діелектричне градування (використання матеріалів з різною проникністю);
- резистивне градування (використання провідних покриттів).

Метою градування є:

- зменшити максимальну напруженість поля;
- уникнути локальних перевантажень ізоляції;
- підвищити ефективність використання матеріалу.

Градування особливо важливе для високовольтних кабелів, вводів і трансформаторів.

1.4.5 Заземлення та вирівнювання потенціалів

Система заземлення є невід’ємною складовою захисту високовольтного обладнання від перенапруг і виконує ключову роль у забезпеченні електричної безпеки, стабільності режимів роботи та надійності ізоляційних систем. Її основне призначення полягає у створенні ефективного шляху відведення струмів короткого замикання та перенапруг у землю, а також у вирівнюванні потенціалів між окремими елементами електроустановки [1].

Заземлення безпосередньо впливає на розподіл електричного поля в ізоляційних системах і визначає рівень напруги відносно землі, що є критично важливим при дії атмосферних і комутаційних перенапруг.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було проведено комплексний аналіз фізичних основ електричної міцності ізоляції, видів перенапруг у електричних мережах, а також конструктивних особливостей ізоляційних систем високовольтного обладнання та методів їх захисту.

Розглянуто механізми пробоя газових, рідких і твердих діелектриків, які визначають граничні можливості ізоляції при дії електричних напружень. Встановлено, що електрична міцність ізоляції залежить не лише від властивостей матеріалів, але й від геометрії електричного поля, умов експлуатації та характеру прикладеної напруги. Особливу роль у зниженні надійності ізоляції відіграють часткові розряди та процеси старіння, які призводять до поступової деградації діелектричних властивостей.

Проведений аналіз показав, що перенапруги є одним із основних факторів, які визначають вимоги до ізоляційних систем. Атмосферні перенапруги характеризуються високою амплітудою та крутим фронтом, комутаційні — значною тривалістю та впливом на внутрішню ізоляцію, а тимчасові та резонансні перенапруги можуть викликати тривале перевантаження ізоляційних матеріалів. Таким чином, кожен тип перенапруг

по-різному впливає на ізоляцію, що потребує їх комплексного врахування при проектуванні.

У розділі також було розглянуто основні типи ізоляційних систем, включаючи повітряну, тверду, газову та композитну ізоляцію. Визначено їхні переваги, недоліки та області застосування. Показано, що сучасні ізоляційні системи є комбінованими і вимагають комплексного підходу до оцінки їх ефективності. Особлива увага приділяється оптимізації конструкції ізоляції з метою зменшення габаритів обладнання та підвищення його експлуатаційної надійності.

Значну увагу приділено методам захисту ізоляції від перенапруг. Встановлено, що найбільш ефективним є комплексне застосування обмежувачів перенапруг, екранування електричного поля, оптимізації міжелектродних відстаней, градування ізоляції, а також правильного проектування систем заземлення та вирівнювання потенціалів. Особливо підкреслено, що ефективність роботи захисних пристроїв значною мірою залежить від параметрів заземлення, яке визначає рівень залишкових перенапруг.

Відповідно до рекомендацій ІЕС, проектування ізоляційних систем повинно базуватися на принципах координації ізоляції, що передбачає узгодження рівнів електричної міцності з можливими перенапругами в мережі. Такий підхід дозволяє забезпечити оптимальне співвідношення між надійністю та економічністю високовольтного обладнання.

РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ІЗОЛЯЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ПРИ ДІЇ ПЕРЕНАПРУГ

Метою другого розділу є виконання інженерного розрахунку навантаження ізоляційної системи високовольтного обладнання при дії робочої напруги, тимчасових, комутаційних та грозових перенапруг, а також моделювання зміни напруги і напруженості електричного поля в часі. Розрахунок виконано для обладнання класу напруги 110 кВ, що відповідає типовому рівню високовольтних мереж розподілу та передавання електричної енергії.

У першому розділі було встановлено, що перенапруги є одним із головних чинників, які визначають вимоги до електричної міцності ізоляції. Тому у цьому розділі ізоляційна система розглядається не лише за умов нормального режиму, а й за умов найбільш небезпечних короточасних впливів. Підхід до вибору розрахункових рівнів напруги відповідає загальній логіці координації ізоляції, згідно з якою електрична міцність обладнання має узгоджуватися з очікуваними перенапругами та характеристиками захисних пристроїв [1, 2].

2.1 Вибір об'єкта дослідження та постановка розрахункової задачі

Як об'єкт дослідження прийнято зовнішню ізоляційну систему високовольтного обладнання класу 110 кВ, наприклад ввід силового трансформатора або струмоведучу частину відкритого розподільчого пристрою, що має ізоляційний проміжок між високовольтним електродом і заземленою конструкцією. Така модель є спрощеною, але достатньою для оцінки впливу перенапруг на електричну міцність ізоляції та для порівняння варіантів захисту.

Розрахункова схема приймається у вигляді міжелектродного проміжку з еквівалентною відстанню d . У реальному обладнанні електричне поле є неоднорідним, оскільки на нього впливають форма електродів, наявність екранів, коронних кілець, забруднення поверхні ізоляторів та стан заземлення. У рамках бакалаврської роботи використано інженерну модель середньої

напруженості електричного поля, яка дозволяє оцінити запас електричної міцності та побудувати порівняльні графіки для різних режимів.

Розрахунок виконується для таких режимів: нормальний робочий режим; тимчасова перенапруга; комутаційна перенапруга; грозовий імпульс без обмеження; грозовий імпульс після встановлення обмежувача перенапруг. Окремо оцінюється вплив відстані між обмежувачем перенапруг та захищуваним обладнанням, оскільки при поширенні хвилі перенапруги вздовж ошиновки можливе додаткове підвищення напруги на ізоляції [2, 4].

2.2 Вихідні дані для розрахунку

Для обладнання номінальної напруги 110 кВ приймається найбільша робоча напруга для обладнання $U_m = 123$ кВ. Це значення використовується при координації ізоляції для вибору нормованих рівнів витримуваної напруги [1]. Розрахункові параметри наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Номінальна напруга мережі	U_n	110	кВ
Найбільша робоча напруга обладнання	U_m	123	кВ
Еквівалентна ізоляційна відстань	d	1.4	м
Розрахункова допустима напруженість поля для зовнішньої ізоляції	$E_{\text{доп}}$	500	кВ/м
Витримувана грозова імпульсна напруга	$U_{\text{вип}}$	550	кВ
Номінальна напруга обмежувача перенапруг	U_r	108	кВ
Тривало допустима робоча напруга ОПН	U_c	84	кВ
Залишкова напруга ОПН при імпульсному струмі	U_p	266	кВ
Відстань від ОПН до обладнання	l	20	м

Для спрощеної оцінки прийнято, що допустима середня напруженість електричного поля для зовнішньої ізоляції в умовах імпульсного впливу

становить 500 кВ/м. Це не є універсальною довідковою величиною для будь-якої конструкції, оскільки фактична електрична міцність залежить від форми електродів, вологості, забруднення, тиску повітря та коефіцієнта неоднорідності поля. Однак таке припущення є прийнятним для порівняльного інженерного розрахунку, метою якого є не сертифікація обладнання, а оцінка відносного впливу перенапруг та захисних заходів.

2.3 Розрахунок робочої напруги та базових рівнів перенапруг

Фазна діюча напруга для трифазної мережі визначається за виразом:

$$kB_{\phi} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} = \frac{123}{\sqrt{3}} = 71 \quad (2.1)$$

де U_m – прикладена напруга, кВ.

Для оцінки амплітудного навантаження ізоляції діюче значення фазної напруги переводиться у пікове:

$$kB_{\phi(\text{макс})} = U_{\phi(\text{макс})} \cdot \sqrt{2} = 71 \cdot \sqrt{2} = 100,4$$

Отримане значення 100,4 кВ є базовим піковим рівнем фазної напруги, відносно якого надалі оцінюються тимчасові та комутаційні перенапруги. Тимчасову перенапругу прийнято з кратністю 1,5 р.и., а комутаційну – з кратністю 2,5 р.и. Такі значення використовуються як розрахункові для порівняння режимів і демонстрації принципу впливу перенапруг на запас ізоляції [3, 4].

2.4 Розрахунок напруженості електричного поля в ізоляційному проміжку

Середня напруженість електричного поля в ізоляційному проміжку визначається як відношення прикладеної напруги до відстані між електродами:

$$E = \frac{U}{d} \quad (2.2)$$

де E – середня напруженість електричного поля, кВ/м;

U – прикладена напруга, кВ;

d – еквівалентна міжелектродна відстань, м.

Для прийнятого значення $d = 1,4$ м отримано такі результати:

Результати розрахунку напруженості електричного поля та коефіцієнта запасу електричної міцності для різних режимів роботи наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок напруженості поля та запасу електричної міцності

Режим	Максимальна напруга U , кВ	Напруженість E , кВ/м	Коефіцієнт запасу K_z
Нормальний режим	100,4	71,7	6,97
Тимчасова перенапруга 1,5 р.у.	150,6	107,6	4,65
Комутаційна перенапруга 2,5 р.у.	251,1	179,3	2,79
Грозовий імпульс без ОПН	550,0	392,9	1,27
Грозовий імпульс з ОПН	327,1	233,7	2,14

Коефіцієнт запасу електричної міцності визначається як відношення допустимої напруженості поля до розрахункового значення:

$$K_z = \frac{E_{\text{дон}}}{E_{\text{розр}}} \quad (2.3)$$

Для найбільш небезпечного випадку без обмежувача перенапруг, коли на ізоляцію діє грозовий імпульс 550 кВ, отримаємо:

$$E = \frac{kB}{dh} = \frac{550}{1,4} = 392,9 \text{ —}$$

$$K_z = \frac{E_{\text{дон}}}{E_{\text{розр}}} = \frac{500}{392,9} = 1,27$$

Отже, при обраній ізоляційній відстані 1,4 м запас електричної міцності для грозового імпульсу без додаткового обмеження є мінімальним серед розглянутих режимів. Це підтверджує, що саме грозові перенапруги є визначальними для вибору ізоляційних проміжків обладнання класу 110 кВ. Порівняння розрахункових рівнів напруги для різних режимів наведено на рисунку 2.1.

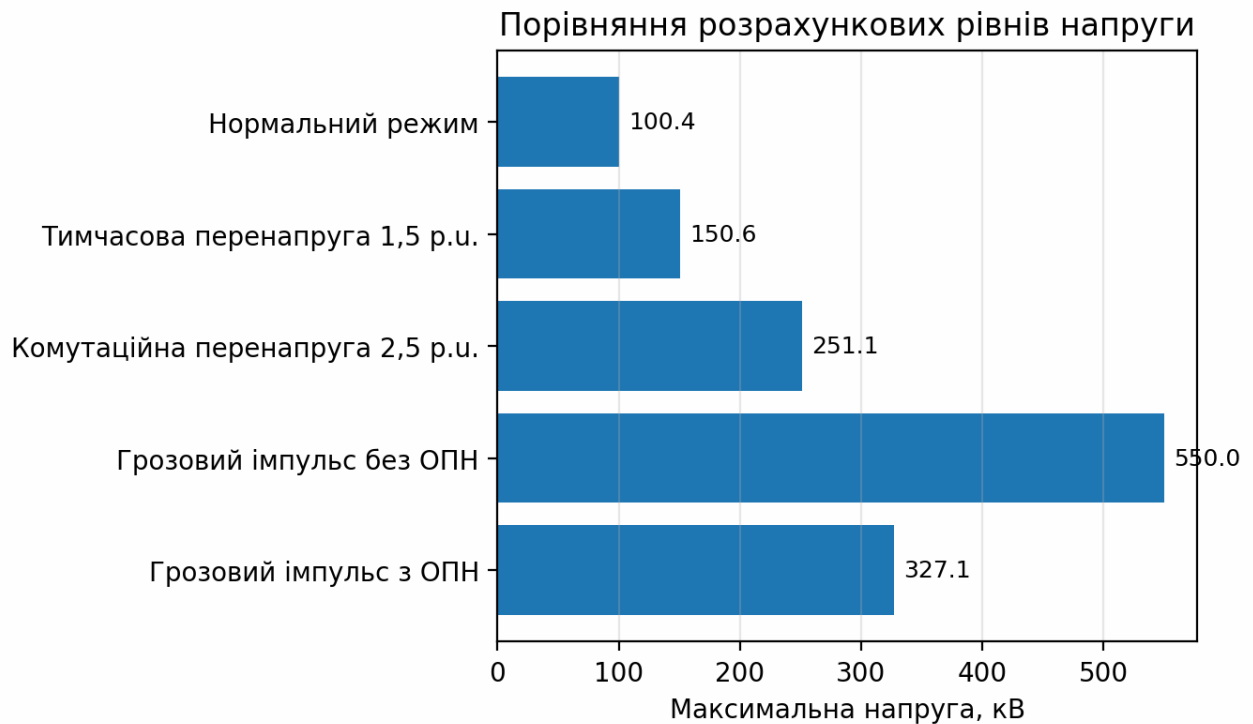


Рисунок 2.1 – Порівняння розрахункових рівнів напруги для різних режимів

2.5 Моделювання грозового імпульсу напруги

Для моделювання грозової перенапруги використано стандартну форму імпульсу 1,2/50 мкс. Перше число характеризує умовний час фронту імпульсу, друге – час спаду до половини амплітудного значення. Такий імпульс застосовується при випробуваннях ізоляції високовольтного обладнання та є типовим для оцінки грозової стійкості [1, 5].

Форму імпульсу можна наближено описати подвійною експоненційною залежністю:

$$U(t) = A \cdot U_m \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.4)$$

де U_m – амплітудне значення імпульсу, кВ;

A – нормувальний коефіцієнт;

α і β – коефіцієнти, що визначають спад і фронт імпульсу відповідно.

У розрахунку прийнято $U_m = 550$ кВ, що відповідає рівню грозової імпульсної витримуваної напруги для обладнання класу 110 кВ. Отримана крива наведена на рисунку 2.2.

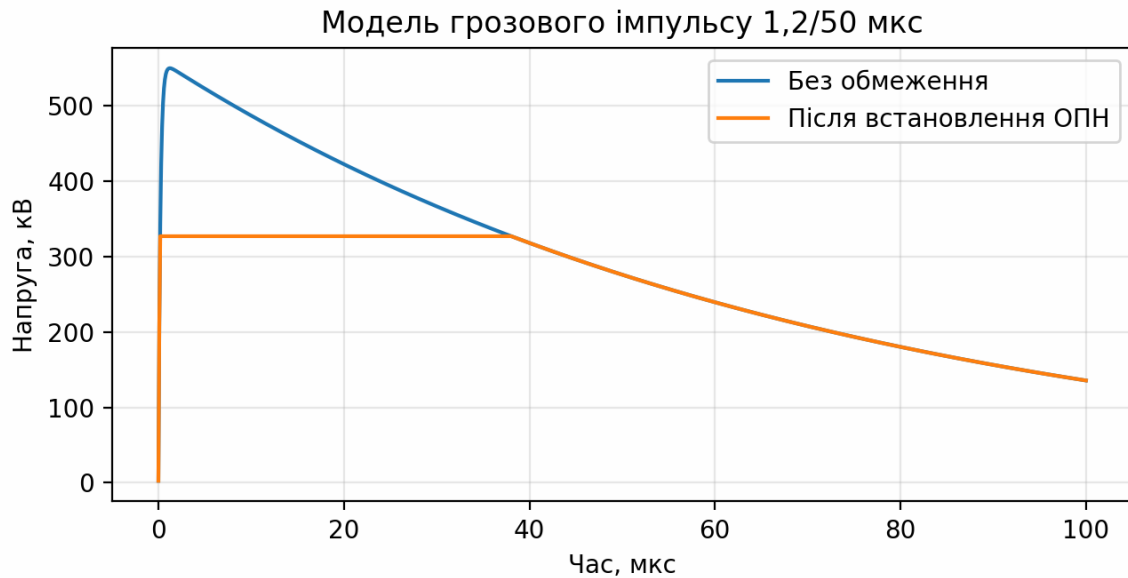


Рисунок 2.2 – Модель грозового імпульсу 1,2/50 мкс до та після обмеження ОПН

З рисунка 2.2 видно, що без застосування захисного пристрою амплітуда імпульсу досягає 550 кВ. Після встановлення обмежувача перенапруг максимальне значення напруги на ізоляції зменшується до розрахункового рівня, який враховує як залишкову напругу ОПН, так і додатковий приріст напруги через відстань між обмежувачем і обладнанням.

2.6 Розрахунок ефективності обмежувача перенапруг

Обмежувач перенапруг є нелінійним пристроєм, який при нормальній робочій напрузі має великий опір, а при появі імпульсної перенапруги різко знижує опір і відводить імпульсний струм у землю. Для обладнання класу 110 кВ обрано типовий ОПН із тривало допустимою робочою напругою $U_c = 84$ кВ, номінальною напругою $U_r = 108$ кВ та залишковою напругою $U_p = 266$ кВ при імпульсному струмі [6].

Оскільки ОПН не завжди встановлюється безпосередньо біля захищуваного обладнання, необхідно враховувати додаткову складову напруги, пов'язану з поширенням хвилі вздовж ошиновки. Для наближеної оцінки використовується вираз:

$$\Delta U = 2S \cdot \frac{l}{v} \quad (2.5)$$

де S – крутизна фронту імпульсу, кВ/мкс;

l – відстань від ОПН до обладнання, м;

v – швидкість поширення хвилі, м/мкс.

Крутизна фронту для грозового імпульсу оцінюється як:

$$S = \frac{kB_m}{m_{\phi \text{ мкс}}} = \frac{550}{1,2} = 458,3 \text{ —}$$

При $l = 20$ м та $v = 300$ м/мкс додаткова складова напруги становить:

$$\Delta kB = 2 \cdot 458,3 \cdot \frac{20}{300} = 61,1$$

Розрахункова максимальна напруга на ізоляції після встановлення ОПН дорівнює:

$$kB_{\text{з ОПН}} = U_p + \Delta U = 266 + 61,1 = 327,1$$

Таким чином, навіть з урахуванням відстані між обмежувачем і обладнанням рівень грозової перенапруги зменшується з 550 кВ до 327,1 кВ, тобто приблизно на 40,5 %.

Коефіцієнт захисного запасу відносно грозової імпульсної витримуваної напруги становитиме:

$$KB = \frac{U_{\text{вит}} - U_{\text{з ОПН}}}{U_{\text{з ОПН}}} \cdot 100\% = \frac{550 - 327,1}{327,1} \cdot 100\% = 68,1$$

Отриманий захисний запас свідчить про достатню ефективність ОПН для обмеження грозових перенапруг у розглянутій схемі. При цьому важливо, що фактичний запас може зменшуватися при збільшенні довжини ошиновки між ОПН та обладнанням, погіршенні заземлення або появі дуже крутих хвиль перенапруги.

2.7 Моделювання зміни напруженості електричного поля в часі

На основі розрахованої форми імпульсу визначено зміну середньої напруженості електричного поля в ізоляційному проміжку. Для кожного моменту часу напруженість визначається за виразом 2.2. Результати моделювання наведено на рисунку 2.3.

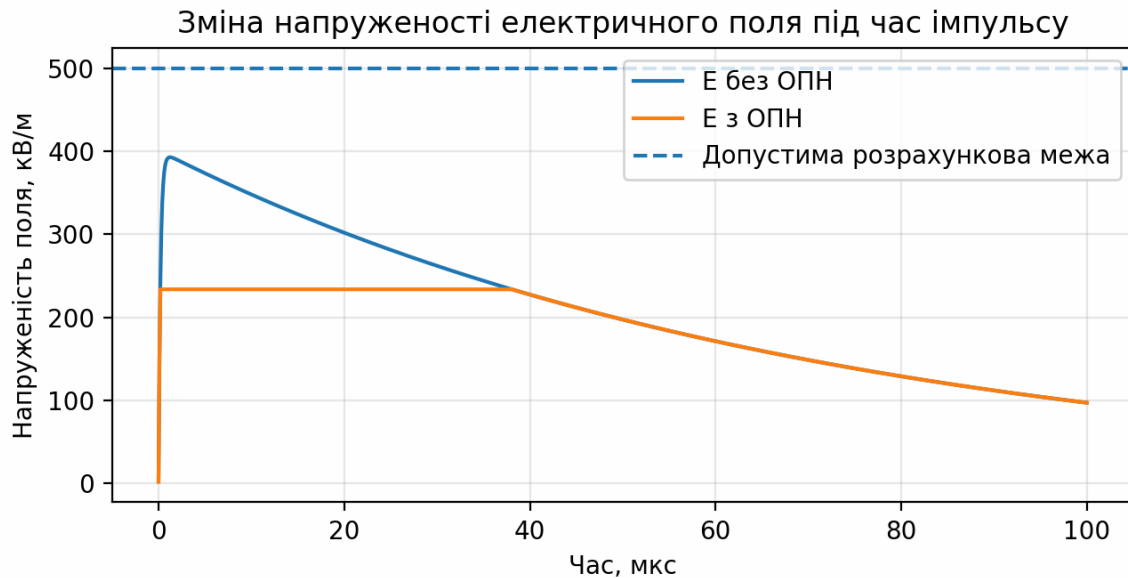


Рисунок 2.3 – Зміна напруженості електричного поля під час дії грозового імпульсу

Максимальна напруженість поля без ОПН становить 392,9 кВ/м, що є близьким до прийнятого допустимого рівня 500 кВ/м. Після встановлення ОПН максимальна напруженість знижується до 233,7 кВ/м. Це істотно підвищує коефіцієнт запасу електричної міцності та зменшує ймовірність розвитку часткових розрядів або перекриття зовнішньої ізоляції.

2.8 Аналіз впливу міжелектродної відстані на запас ізоляції

Одним із найважливіших конструктивних параметрів ізоляційної системи є відстань між струмоведучими та заземленими частинами. Збільшення ізоляційного проміжку знижує середню напруженість електричного поля, однак одночасно призводить до збільшення габаритів обладнання і вартості розподільчого пристрою. Тому доцільно визначити, як змінюється коефіцієнт запасу при зміні відстані d .

Для цього виконано розрахунок коефіцієнта запасу для діапазону відстаней від 0,8 до 2,2 м для двох випадків: дія грозового імпульсу без обмежувача та дія перенапруги після встановлення ОПН. Результати наведено на рисунку 2.4.

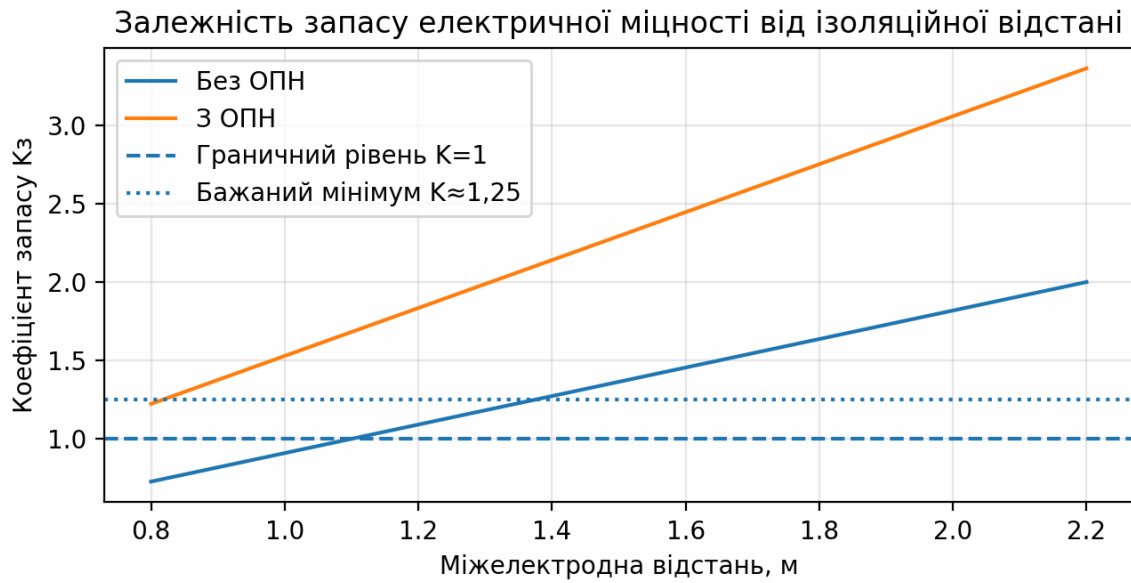


Рисунок 2.4 – Залежність коефіцієнта запасу електричної міцності від міжелектродної відстані

З графіка видно, що без застосування ОПН для забезпечення коефіцієнта запасу не менше 1,25 необхідна відстань близько 1,38 м. При використанні ОПН та збереженні тієї самої відстані запас збільшується приблизно до 2,14. Це означає, що обмеження перенапруг дозволяє або підвищити надійність існуючої ізоляційної конструкції, або за певних умов оптимізувати її габарити без зниження надійності.

2.9 Порівняльна оцінка режимів роботи ізоляційної системи

Для узагальнення результатів розрахунку проведено якісну оцінку небезпеки кожного режиму з точки зору електричного навантаження ізоляції. Результати наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняльна оцінка небезпеки розрахункових режимів

Режим	Рівень небезпеки	Основний вплив на ізоляцію	Висновок
Нормальний режим	Низький	Тривала дія робочої напруги	Запас електричної міцності значний
Тимчасова перенапруга	Середній	Підвищення теплового та електричного навантаження	Потребує контролю тривалості дії
Комутаційна перенапруга	Підвищений	Імпульсне навантаження внутрішньої та зовнішньої ізоляції	Необхідне врахування при координації ізоляції
Грозовий імпульс	Високий	Максимальна напруженість	Є визначальним для

без ОПН		поля, ризик перекриття	вибору ізоляційних проміжків
Грозовий імпульс з ОПН	Помірний	Обмежена імпульсна дія	Забезпечується достатній захисний запас

Порівняння показує, що в нормальному режимі та при тимчасових перенапругах ізоляційна система має достатній запас електричної міцності.

Комутаційні перенапруги створюють суттєвіше навантаження, проте в розглянутому прикладі не є критичними. Найбільш небезпечним режимом є дія грозового імпульсу без обмеження, оскільки саме в цьому випадку коефіцієнт запасу є найменшим.

Встановлення ОПН суттєво змінює характер навантаження ізоляції: амплітуда перенапруги знижується, максимальна напруженість поля зменшується, а запас електричної міцності збільшується. Це підтверджує доцільність використання обмежувачів перенапруг як одного з основних засобів оптимізації ізоляційних систем високовольтного обладнання.

Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано розрахунок та моделювання електричних процесів в ізоляційній системі високовольтного обладнання класу 110 кВ при дії робочої напруги, тимчасових, комутаційних і грозових перенапруг.

Встановлено, що для обладнання з найбільшою робочою напругою $U_m = 123$ кВ пікове значення фазної робочої напруги становить 100,4 кВ. При тимчасовій перенарузі 1,5 р.п. розрахунковий рівень напруги зростає до 150,6 кВ, а при комутаційній перенарузі 2,5 р.п. – до 251,1 кВ.

Для прийнятої еквівалентної ізоляційної відстані $d = 1,4$ м максимальна напруженість електричного поля при грозовому імпульсі 550 кВ становить 392,9 кВ/м, а коефіцієнт запасу електричної міцності дорівнює 1.27. Це показує, що грозовий імпульс є найбільш небезпечним розрахунковим впливом для зовнішньої ізоляції обладнання 110 кВ.

Після встановлення обмежувача перенапруг з залишковою напругою $U_p = 266$ кВ та врахуванням відстані 20 м до захищуваного обладнання розрахункова

напруга на ізоляції становить 327,1 кВ. У цьому випадку максимальна напруженість поля зменшується до 233,7 кВ/м, а коефіцієнт запасу зростає до 2,14.

Моделювання підтвердило, що застосування ОПН дозволяє суттєво знизити амплітуду імпульсної перенапруги та підвищити надійність ізоляційної системи. Отримані результати можуть бути використані у наступному розділі для розроблення заходів з оптимізації ізоляції, зокрема вибору захисних пристроїв, уточнення ізоляційних проміжків та оцінки доцільності застосування екранування або градування електричного поля.

РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ІЗОЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

У попередньому розділі було виконано розрахунок впливу перенапруг на ізоляційну систему високовольного обладнання та визначено, що найбільш небезпечним для ізоляції є режим дії імпульсної перенапруги з великою амплітудою та високою крутизною фронту. Отримані результати показують, що сам лише вибір підвищеного рівня ізоляції не завжди є раціональним, оскільки призводить до збільшення габаритів обладнання, витрат ізоляційних матеріалів та ускладнення конструкції. Тому завершальним етапом дослідження є вибір технічних заходів, які забезпечують необхідний запас електричної міцності при мінімально доцільних конструктивних параметрах.

Оптимізація ізоляційної системи у цій роботі розглядається як комплексне узгодження рівня перенапруг, електричної міцності ізоляції, геометричних параметрів ізоляційного проміжку та захисних пристроїв. Такий підхід відповідає загальній логіці координації ізоляції, згідно з якою рівень електричної міцності обладнання має бути узгоджений з очікуваними перенапругами та характеристиками засобів їх обмеження [1, 2].

3.1 Вихідні дані для порівняння варіантів оптимізації

Для порівняльної оцінки приймається ізоляційна система обладнання класу напруги 110 кВ з найбільшою робочою напругою обладнання $U_m = 123$ кВ. Як основний розрахунковий режим розглядається дія грозової імпульсної перенапруги, оскільки саме вона формує найбільше короткочасне електричне навантаження на зовнішню та внутрішню ізоляцію [5, 6].

Розрахунок виконується для чотирьох варіантів ізоляційної системи:

- базова ізоляційна система без додаткових заходів оптимізації;
- застосування обмежувача перенапруги;
- застосування обмежувача перенапруги та екрана вирівнювання електричного поля;

– застосування обмежувача перенапруги, екрана та раціоналізованої міжелектродної відстані.

Вихідні дані, прийняті для порівняльного оптимізаційного розрахунку ізоляційної системи, наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для оптимізаційного розрахунку

Параметр	Позначення	Прийняте значення	Одиниця
Клас напруги обладнання	$U_{\text{ном}}$	110	кВ
Найбільша робоча напруга обладнання	$U_{\text{м}}$	123	кВ
Розрахункова грозова перенапруга без ОПН	$U_{\text{гр}}$	650	кВ
Залишкова напруга ОПН при імпульсному струмі	$U_{\text{зал}}$	330	кВ
Допустима напруженість поля для прийнятої ізоляції	$E_{\text{доп}}$	10,0	кВ/см
Базова міжелектродна відстань	d_0	90	см
Оптимізована міжелектродна відстань	$d_{\text{опт}}$	80	см
Коефіцієнт неоднорідності поля без екрана	$k_{\text{н0}}$	1,35	-
Коефіцієнт неоднорідності поля з екраном	$k_{\text{н1}}$	1,15	-

Залишкова напруга ОПН приймається як максимальний рівень напруги, що залишається на затискачах обладнання після спрацювання обмежувача. Для високовольтних мереж вибір ОПН виконується з урахуванням найбільшої тривало допустимої робочої напруги, тимчасових перенапруг, класу енергоємності та захисного рівня пристрою [3, 4].

3.2 Вибір та перевірка обмежувача перенапруги

Обмежувач перенапруги є базовим елементом оптимізації, оскільки він безпосередньо знижує амплітуду перенапруги, що діє на ізоляційну систему. У нормальному режимі опір варисторних елементів ОПН є дуже великим, тому пристрій практично не впливає на режим мережі. У разі виникнення перенапруги опір різко зменшується, а енергія імпульсу відводиться в систему заземлення.

Перевірка можливості застосування ОПН виконується за умовою відповідності його тривало допустимої робочої напруги фазній напрузі мережі:

$$kU_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}} = \frac{123}{\sqrt{3}} = 71$$

Отже, для обладнання 110 кВ доцільним є застосування ОПН з тривало допустимою робочою напругою не нижче 71 кВ. У практичних умовах може бути прийнято ОПН з $U_c = 77$ кВ або близьким типовим значенням, що забезпечує запас відносно найбільшої фазної робочої напруги мережі.

Коефіцієнт запасу за тривало допустимою напругою становить:

$$K_{uc} = \frac{77}{71} = 1,08$$

Отримане значення показує, що ОПН може працювати в нормальному режимі без переходу в провідний стан. При цьому його захисний рівень має бути нижчим за допустимий імпульсний рівень ізоляції обладнання, що є основною умовою координації ізоляції [1, 3].

Основні результати перевірки прийнятого обмежувача перенапруги наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Перевірка прийнятого обмежувача перенапруги

Показник	Значення	Коментар
Найбільша фазна робоча напруга	71,0 кВ	Визначена за $U_m/\sqrt{3}$

Прийнята тривало допустима напруга ОПН	77 кВ	Типове значення для мережі 110 кВ
Коефіцієнт запасу за U_c	1,08	ОПН не працює у нормальному режимі
Залишкова напруга при імпульсі	330 кВ	Прийнята для розрахунку захисного рівня
Зниження перенапруги відносно базового режиму	49,2 %	Порівняно з $U_{гр} = 650$ кВ

Відносне зниження амплітуди перенапруги після встановлення ОПН визначається наступним чином:

$$\Delta U = \frac{(U_{zp} - U_{зал})}{U} \cdot 100\% = \frac{(650 - 330)}{650} \cdot 100\% = 49,2\%$$

Як показано на рисунку 3.1, застосування ОПН дозволяє майже вдвічі знизити амплітуду перенапруги, що безпосередньо зменшує електричне навантаження на ізоляцію.

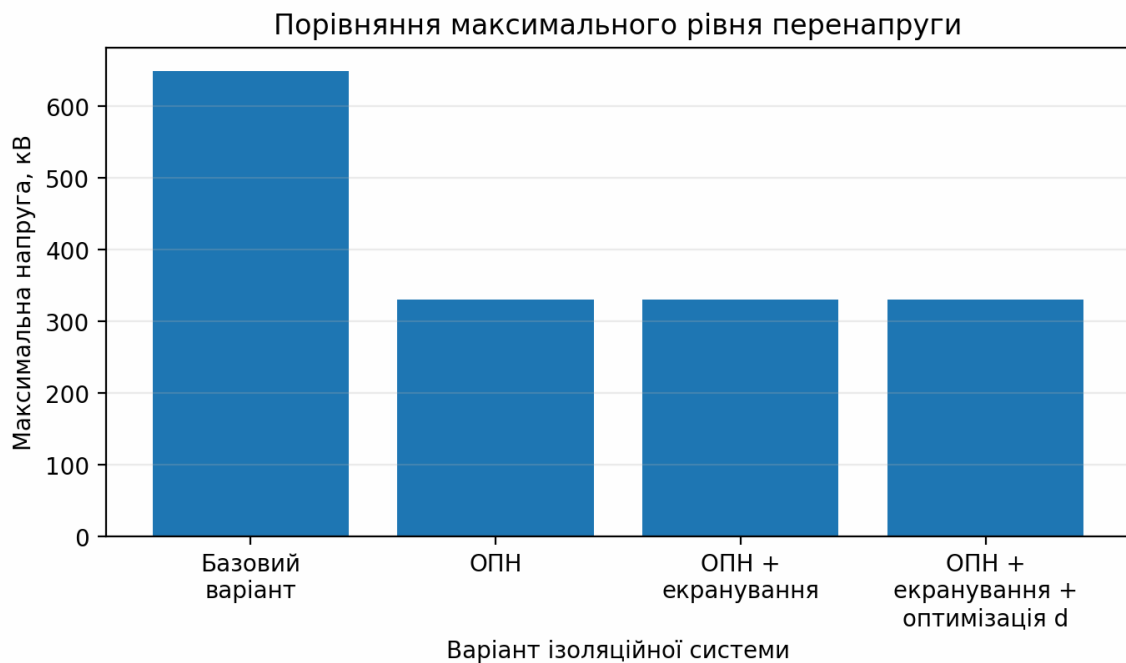


Рисунок 3.1 – Порівняння максимального рівня перенапруги для різних варіантів оптимізації

3.3 Оптимізація розподілу електричного поля

Навіть при ефективному обмеженні амплітуди перенапруги важливим залишається питання розподілу електричного поля. У реальній ізоляційній конструкції поле не є повністю рівномірним: у місцях різкої зміни геометрії

електродів, на краях екранів, біля введів, контактних з'єднань та дефектів ізоляції виникає локальна концентрація напруженості. Для врахування цього явища використовується коефіцієнт неоднорідності поля k_n .

Максимальна напруженість електричного поля визначається за формулою:

$$E_{\max} = k_n \cdot \frac{U}{d} \quad (3.1)$$

де U – напруга, що діє на ізоляційний проміжок В (Вольт);

d – міжелектродна відстань См;

k_n – коефіцієнт неоднорідності електричного поля.

Для базового варіанта без ОПН і без екрана:

$$E_{\max 0} = 1,35 \cdot \frac{650}{90} = 9,75 \frac{\kappa B}{\text{см}}$$

Коефіцієнт запасу становить:

$$K_{z0} = \frac{10}{9,75} = 1,03$$

Отже, базовий варіант формально знаходиться поблизу допустимої межі, однак його запас є недостатнім з урахуванням старіння ізоляції, можливих дефектів, забруднення поверхні та похибок розрахунку.

Після встановлення ОПН напруга на ізоляції обмежується залишковим рівнем 330 кВ:

$$E_{\max 1} = 1,35 \cdot \frac{330}{90} = 4,95 \frac{\kappa B}{\text{см}}$$

$$K_{z1} = \frac{10}{4,95} = 2,02$$

Застосування ОПН забезпечує суттєве підвищення запасу електричної міцності. Однак локальні зони підвищеної напруженості поля залишаються, тому додатково розглядається застосування екрана або коронного кільця.

При встановленні екрана вирівнювання поля коефіцієнт неоднорідності зменшується з 1,35 до 1,15:

$$E_{\max 2} = 1,15 \cdot \frac{330}{90} = 4,22 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$$

$$K_{32} = \frac{10}{4,22} = 2,37$$

Як видно з рисунка 3.2, екранування не змінює амплітуду перенапруги, але зменшує локальну концентрацію електричного поля. Це особливо важливо для введів, ізоляторів, кабельних муфт і ділянок з переходом між різними діелектричними матеріалами.

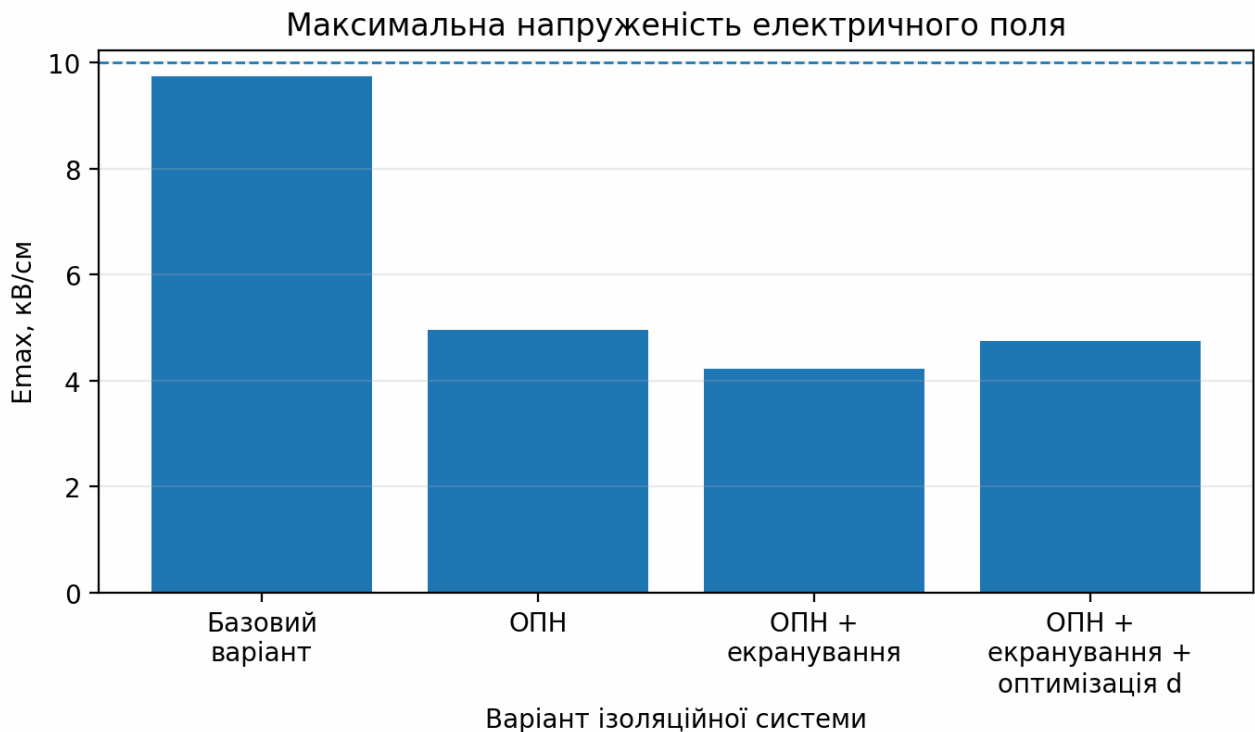


Рисунок 3.2 – Максимальна напруженість електричного поля для різних варіантів оптимізації

3.4 Раціоналізація міжелектродної відстані

Після застосування ОПН та екрана запас електричної міцності стає значним. Це створює можливість не просто підвищити надійність, а й раціоналізувати геометричні параметри ізоляційної системи. У межах дослідження розглянуто зменшення міжелектродної відстані з 90 до 80 см за умови збереження ОПН та екрана вирівнювання поля.

Для оптимізованої відстані $d_{\text{опт}} = 80$ см напруженість електричного поля та коефіцієнт запасу визначаються за формулами, наведеними нижче:

$$E_{\max 3} = 1,15 \cdot \frac{330}{80} = 4,74 \frac{\kappa B}{\text{см}}$$

$$K_{з3} = \frac{10}{4,74} = 2,11$$

Після підстановки $d_{\text{опт}} = 0,8$ м у формулу для максимальної напруженості електричного поля та подальшого визначення коефіцієнта запасу отримано, що навіть за зменшення ізоляційної відстані на 11,1 % коефіцієнт запасу залишається значно більшим за мінімально допустиме значення 1,2. Це підтверджує, що оптимізація ізоляції не обов'язково полягає у збільшенні розмірів обладнання. Навпаки, правильне застосування захисних пристроїв і конструктивних засобів вирівнювання поля дає змогу забезпечити надійність при більш раціональних габаритах. Порівняння розрахункових параметрів варіантів оптимізації наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняння розрахункових параметрів варіантів оптимізації

Варіант	U, кВ	d, см	k_n	$E_{\max}$, кВ/см	K_z	Висновок
0. Базовий	650	90	1,35	9,75	1,03	Запас недостатній
1. ОПН	330	90	1,35	4,95	2,02	Запас достатній
2. ОПН + екран	330	90	1,15	4,22	2,37	Найбільший запас
3. ОПН + екран + $d_{\text{опт}}$	330	80	1,15	4,74	2,11	Раціональний варіант

Значення коефіцієнту запасу електричної міцності для різних варіантів представлено на рис. 3.3.

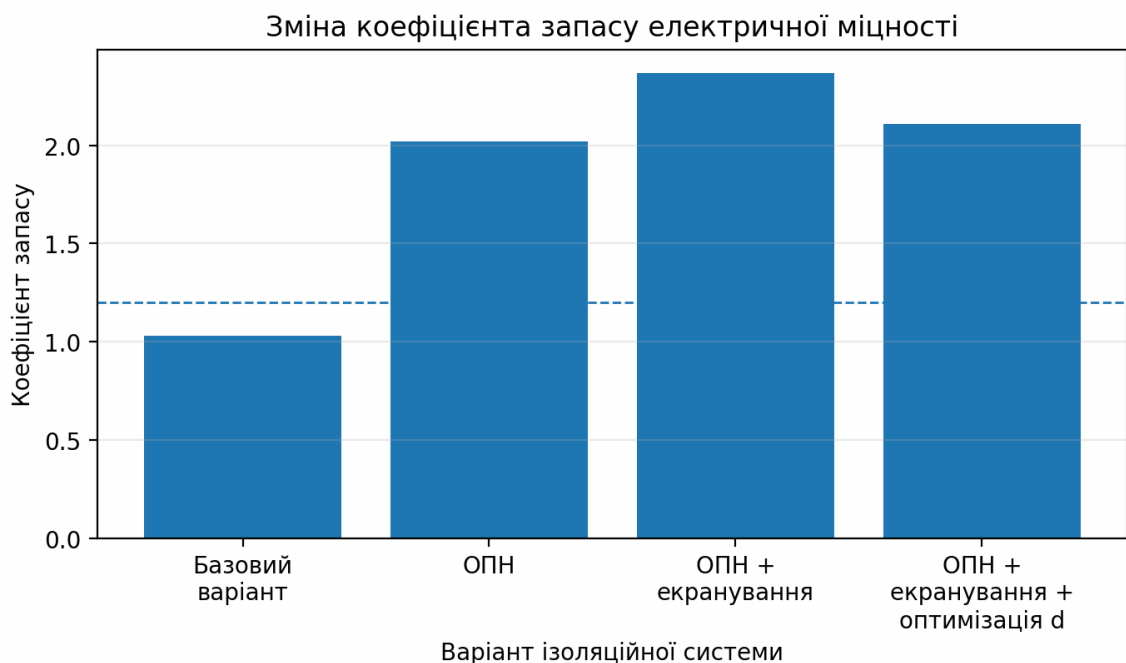


Рисунок 3.3 – Коефіцієнт запасу електричної міцності для різних варіантів

3.5 Оцінка технічної ефективності запропонованих заходів

Технічна ефективність оптимізаційних заходів оцінюється за зниженням максимальної напруженості електричного поля порівняно з базовим варіантом.

Відносне зниження визначається за формулою:

$$\delta E = \frac{(E_{\max 0} - E_{\max 0i})}{E_{\max 0}} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Для варіанта із застосуванням ОПН:

$$\delta E1 = \frac{(9,75 - 4,95)}{9,75} \cdot 100\% = 49,2\%$$

Для варіанта із застосуванням ОПН та екрана:

$$\delta E2 = \frac{(9,75 - 4,22)}{9,75} \cdot 100\% = 56,7\%$$

Для варіанта із застосуванням ОПН, екрана та оптимізованої відстані:

$$\delta E3 = \frac{(9,75 - 4,74)}{9,75} \cdot 100\% = 51,4\%$$

Результати показують, що найбільше зниження напруженості електричного поля забезпечує поєднання ОПН та екрана вирівнювання поля. Відносне зниження максимальної напруженості поля для кожного варіанта показано на рисунку 3.4. З точки зору співвідношення надійності, габаритів і технічної доцільності найбільш раціональним є третій варіант, у якому після обмеження перенапруги та вирівнювання поля допускається помірне зменшення міжелектродної відстані.

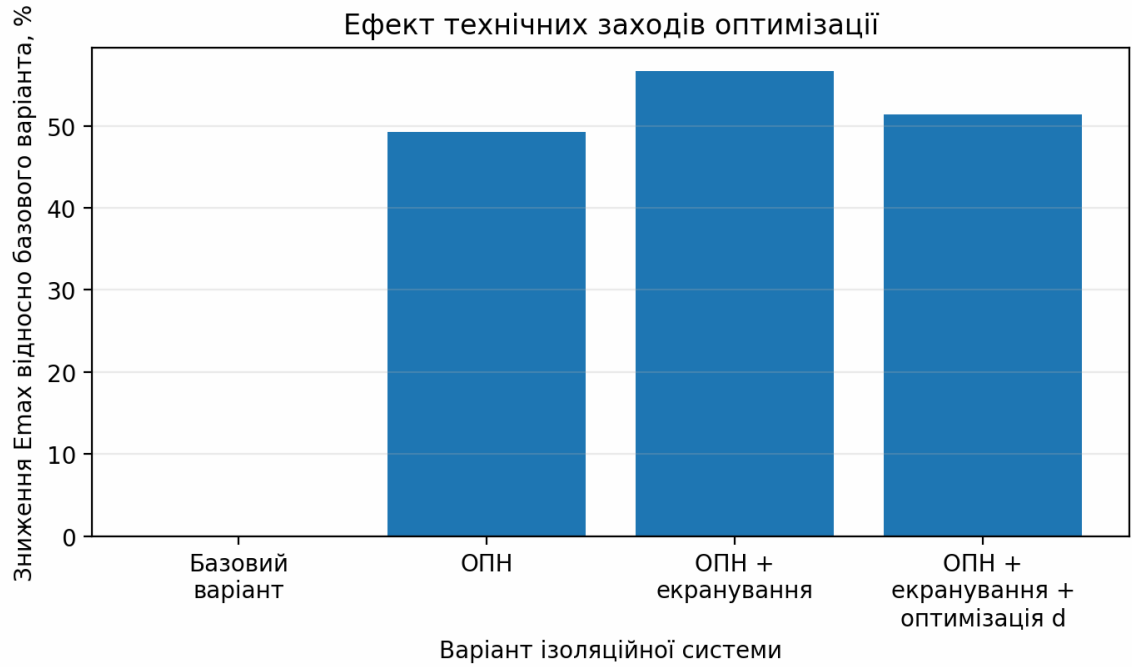


Рисунок 3.4 – Відносне зниження максимальної напруженості поля порівняно з базовим варіантом

Узагальнену порівняльну оцінку ефективності розглянутих заходів оптимізації наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняльна оцінка ефективності заходів оптимізації

Заходи оптимізації	Зниження U	Зниження $E_{\max}$	Зміна K_1	Технічна оцінка
ОПН	49,2 %	49,2 %	1,03 2,02 →	Основний захисний ефект
ОПН + екран	49,2 %	56,7 %	1,03 2,37 →	Найкраще вирівнювання поля
ОПН + екран + допт	49,2 %	51,4 %	1,03 2,11 →	Найкраще співвідношення надійності та габаритів

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано оптимізацію ізоляційної системи високовольтного обладнання з урахуванням дії перенапруг. Як основні заходи оптимізації розглянуто встановлення обмежувача перенапруги, застосування екрана вирівнювання електричного поля та раціоналізацію міжелектродної відстані.

Розрахунки показали, що базовий варіант ізоляційної системи без додаткових захисних заходів має недостатній запас електричної міцності. При розрахунковій грозовій перенарузі 650 кВ максимальна напруженість електричного поля становить 9,75 кВ/см, а коефіцієнт запасу дорівнює лише 1,03. Це свідчить про підвищений ризик пробою при несприятливих експлуатаційних умовах.

Встановлення ОПН дозволяє знизити рівень перенапруги до 330 кВ, що забезпечує зменшення максимальної напруженості поля на 49,2 % та збільшення коефіцієнта запасу до 2,02. Додаткове застосування екрана вирівнювання поля знижує максимальну напруженість до 4,22 кВ/см і підвищує коефіцієнт запасу до 2,37.

Найбільш раціональним за сукупністю технічних показників є варіант, що поєднує ОПН, екранування та оптимізовану міжелектродну відстань 80 см. За такого рішення коефіцієнт запасу становить 2,11, а ізоляційна відстань може бути зменшена на 11,1 % без втрати електричної надійності. Це підтверджує доцільність комплексного підходу до оптимізації ізоляції, коли підвищення

надійності досягається не лише збільшенням ізоляційних проміжків, а й раціональним обмеженням перенапруг і вирівнюванням електричного поля.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та експлуатації високовольтного обладнання, зокрема для вибору захисних пристроїв, перевірки ізоляційних відстаней, оцінки запасу електричної міцності та обґрунтування технічних рішень з підвищення надійності ізоляційних систем.

ВИСНОВКИ

У роботі було розглянуто теоретичні основи електричної міцності ізоляції, основні види перенапруг у високовольтних електричних мережах, а також методи захисту ізоляційних систем від їх негативного впливу. Встановлено, що перенапруги є одним із ключових факторів, які визначають вимоги до ізоляції високовольтного обладнання та впливають на його надійність.

Виконані розрахунки показали, що при дії імпульсних перенапруг ізоляційна система може працювати з недостатнім запасом електричної міцності, якщо не застосовуються спеціальні засоби захисту. Найбільш ефективним технічним рішенням є встановлення обмежувачів перенапруг, які знижують амплітуду перенапруги до безпечного рівня. Додаткове застосування екранів і конструктивне вирівнювання поля дозволяє зменшити локальні концентрації напруженості, що підвищує стійкість ізоляції до часткових розрядів і пробою.

Оптимізація ізоляційної системи повинна виконуватися комплексно: з урахуванням захисного рівня ОПН, розподілу електричного поля, геометрії ізоляційного проміжку, умов експлуатації та стану заземлення. Такий підхід дозволяє одночасно підвищити надійність обладнання та уникнути необґрунтованого збільшення його габаритів і вартості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kuffel E., Zaengl W. S., Kuffel J. High Voltage Engineering Fundamentals. – 2nd ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – 534 p.
2. Naidu M. S., Kamaraju V. High Voltage Engineering. – 5th ed. – New Delhi: McGraw-Hill Education, 2013. – 444 p.
3. Greenwood A. Electrical Transients in Power Systems. – 2nd ed. – New York: Wiley-Interscience, 1991. – 768 p. 5. IEC 60076. Power Transformers. – International Electrotechnical Commission.
4. Begamudre R. D. Extra High Voltage AC Transmission Engineering. – 3rd ed. – New Delhi: New Age International, 2006. – 432 p.
5. IEC 60071-1:2006 Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules. – IEC.
6. Gonen T. Electric Power Transmission System Engineering: Analysis and Design. – 3rd ed. – CRC Press, 2014. – 800 p.
7. Pansini A. J., Smalling K. D. Guide to Electric Power Distribution Systems. – 6th ed. – CRC Press, 2013.