

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра механічної та електричної інженерії

МЕТОДИЧНІ РОЗРОБКИ
для виконання самостійної роботи
з навчальної дисципліни:
«ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ»

Освітньо-професійна програма
Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
галузь знань 14 Електрична інженерія
рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Методичні розробки для виконання самостійної роботи з навчальної дисципліни «Техніка високих напруг» для здобувачів рівня вищої освіти перший (бакалаврський) ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної форми навчання. Семенов А. Полтава: ПДАУ, 2025. 51 с.

Автор: Семенов Анатолій, професор кафедри механічної та електричної інженерії, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

Рецензент:

Харак Руслан, доцент кафедри механічної та електричної інженерії, кандидат технічних наук.

Схвалено і рекомендовано до використання у навчальному процесі:

Кафедрою механічної та електричної інженерії:
Завідувач кафедри, к.т.н., доцент Станіслав ПОПОВ
«01» вересня 2025 р., протокол №1

Радою з якості вищої освіти спеціальності G3 Електрична інженерія:
Голова ради з якості вищої освіти, к.т.н., доцент Юлія БАСОВА
«01» вересня 2025 р, протокол №1

Технічний редактор: к. фіз.-мат., н., доцент кафедри А. Семенов

Комп'ютерна верстка: к. фіз.-мат., н., доцент кафедри А. Семенов

Усі права охороняються. Жодна частина цього видання не може бути відтворена у будь-якій формі без письмової згоди Полтавського державного аграрного університету

ЗМІСТ

Вступ	4
Мета та завдання вивчення навчальної дисципліни	5
Тема 1. Основні принципи техніки високих напруг.....	6
Тема 2. Електричні розряди у вакуумі та газах: механізми та характеристики	10
Тема 3. Електричні розряди у вакуумі та газах: механізми та характеристики.....	15
Тема 4. Перенапруги в електричних системах: причини та методи зменшення.....	21
Тема 5 . Комутаційні перенапруги та їх вплив на роботу електричних систем.....	27
Тема 6. Ізоляція повітряних ліній електропередач і відкритих розподільчих пристроїв: вимоги і технології.....	32
Тема 7. Ізоляційні матеріали для силових трансформаторів, конденсаторів, кабелів і високовольтних електричних машин.....	38
Тема 8. Випробування високовольтних систем: установки та методи перевірки надійності.....	43
Рекомендовані джерела інформації.....	51

ВСТУП

Рівень розвитку енергетики та електрифікації є критичним показником технічного та економічного потенціалу будь-якої країни. Надійне та безперебійне постачання електроенергії для промислових підприємств, сільськогосподарських об'єктів, транспорту та побутових споживачів є однією з найважливіших задач сучасного суспільства.

Дисципліна «Техніка високих напруг» займає центральне місце в спеціальній підготовці інженерів-електриків. Її мета – забезпечити знання про принципи генерування, розподілу та використання високих напруг, а також навчити основам безпечної експлуатації високовольтних систем. Курс націлений на вивчення механізмів пробоя в різних діелектриках, методів захисту від перенапруги та технічних рішень щодо ізоляційної координації.

Курс націлений на глибоке вивчення механізмів пробоя в різних діелектриках, методів захисту від перенапруги, а також технічних рішень щодо ізоляційної координації, що є критично важливим для запобігання аварійним ситуаціям та підвищення надійності енергетичних систем. Основні завдання курсу – надати студентам теоретичні та практичні знання про роботу високовольтного обладнання, навчити розрахункам електричних полів, захисту ізоляційних систем і розумінню принципів технічної безпеки під час експлуатації високовольтних установок.

Студенти отримають можливість ознайомитися з реальними викликами та рішеннями в області техніки високих напруг, що є необхідним для ефективної та безпечної роботи енергосистем. Зокрема, курс охоплює питання управління ризиками, пов'язаними з експлуатацією високовольтних установок, а також розробку систем моніторингу та діагностики, які дозволяють забезпечити своєчасне виявлення та усунення несправностей.

Курс спирається на знання фізики, електротехнічних матеріалів, основ теплотехніки, основ електропостачання, метрології та інших суміжних дисциплін. Це забезпечує студентам фундамент для подальшого професійного розвитку фахівців в електроенергетиці, дозволяючи їм стати кваліфікованими професіоналами, здатними ефективно вирішувати складні завдання в умовах швидко змінюваного технологічного середовища.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Мета – Опанувати знання з теорії електрофізичних процесів, сформувати уявлення про способи протидії негативному впливу перенапруг на функціональні характеристики високовольтного обладнання, методів контролю і випробування ізоляції різних типів енергетичного обладнання.

Завдання – вивчення принципів та особливостей застосування техніки високих напруг, основних характеристик ізоляційних матеріалів та їх поведінки під впливом високих напруг, а також засобів захисту від перенапруг. Студенти мають освоїти методи розрахунку електричних полів, аналізу процесів проббою в різних середовищах (газах, рідинах, твердих діелектриках), зрозуміти механізми перенапруг у системах, а також навчитися застосовувати засоби грозозахисту та комутаційні пристрої. В рамках курсу особливу увагу приділено вивченню методів випробування ізоляції та високовольтних випробувальних установок.

Студенти повинні оволодіти знаннями щодо стандартних рівнів напруг у різних країнах, впливу параметрів вакууму та газу на пробій ізоляції, основних характеристик ізоляцій повітряних ліній, трансформаторів, кабелів та електричних машин, а також методами захисту від грозових та комутаційних перенапруг.

Важливими аспектами є розгляд техніко-економічних рішень для проектування високовольтного обладнання, забезпечення безпечної експлуатації високовольтних систем, а також виконання завдань самостійної роботи у рамках освітньо-кваліфікаційної характеристики бакалавра.

Це завдання охоплює такі ключові теми:

1. Основні принципи техніки високих напруг.
2. Електричні розряди у вакуумі та газах: механізми та характеристики
3. Електричні розряди у рідких та твердих діелектриках: особливості і вплив на ізоляцію.
4. Перенапруги в електричних системах: причини та методи зменшення.
5. Комутаційні перенапруги та їх вплив на роботу електричних систем.
6. Ізоляція повітряних ліній електропередач і відкритих розподільчих пристроїв: вимоги і технології.
7. Ізоляційні матеріали для силових трансформаторів, конденсаторів, кабелів і високовольтних електричних машин.
8. Випробування високовольтних систем: установки та методи перевірки надійності.

Тема 1. Основні принципи техніки високих напруг.

Характеристика змісту матеріалу, що є предметом самостійного опрацювання

Предметом самостійного опрацювання є комплексна тема, пов'язана із основними принципами техніки високих напруг.

Ця тема охоплює декілька ключових аспектів:

1. Принципи генерації та використання високих напруг у різних галузях.
2. Вплив високих напруг на електричні мережі та обладнання.
3. Методи забезпечення електричної ізоляції в системах високих напруг.
4. Особливості використання і захисту обладнання при високих напругах.

Опрацювання цих аспектів допоможе зрозуміти важливість принципів техніки високих напруг.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Техніка високих напруг є окремою галуззю електротехніки, що вивчає закономірності утворення, передавання та використання електричної енергії при високих рівнях напруги, а також методи забезпечення електричної міцності та безпеки обладнання. Розвиток енергетики, збільшення потужності електричних мереж і зростання вимог до надійності енергопостачання зумовлюють необхідність глибокого розуміння фізичних процесів, що відбуваються при роботі з високими напругами.

1. Принципи генерації та використання високих напруг

Високі напруги застосовуються у широкому спектрі галузей — від енергосистем до технологічних процесів, медичного обладнання та дослідницьких установок.

Основними методами отримання високих напруг є:

1.1. Трансформація змінної напруги

- Використання силових трансформаторів дозволяє отримувати напруги від десятків до сотень кіловольт.
- Ефективність трансформації визначається якістю магнітопроводів, схемою з'єднання обмоток, типом ізоляції.

1.2. Множення напруги

- Застосовуються випрямлячі та каскади множення (схема Кокрофта — Волтона).

- Використовується в лабораторних установках, у системах електронних пристроїв, у прискорювачах частинок.

1.3. Генератори імпульсних напруг

- Генератор Маркса — основне джерело імпульсів 1–2 МВ для випробувань обладнання.

- Імпульсні високовольтні системи застосовуються для:

- моделювання грозових перенапруг,
- випробування ізоляції,
- дослідження пробою.

1.4. Використання високих напруг

Високі напруги необхідні для:

- передавання електроенергії на великі відстані (110–750 кВ і вище);
- роботи підстанцій та розподільчих пристроїв;
- зарядження конденсаторних батарей і накопичувачів енергії;
- електрофізичних процесів (електрофільтри, електроосадження, прискорювачі);
- рентгенівських установок та медичних апаратів.

2. Вплив високих напруг на електричні мережі та обладнання

Висока напруга визначає особливості функціонування мережі:

2.1. Зменшення струмів і втрат

Зі збільшенням напруги зменшується струм при тій же потужності:

$$I = P/U$$

Це знижує втрати потужності $P_{вт} = I_2 R$, що є основою передавання енергії на високій напрузі.

2.2. Електричне поле навколо провідників

- Висока напруга формує сильне електричне поле.
- При досягненні критичного значення на поверхні провідника може виникати корона.
- Корона призводить до втрат енергії, електромагнітних перешкод і прискореного старіння ізоляції.

2.3. Перенапруги та їх вплив

В електричних мережах можливі:

- грозові перенапруги;
- комутаційні перенапруги;
- ферорезонанс.

Перенапруги створюють імпульсні напруги, які можуть руйнувати ізоляцію, тому їх обмежують за допомогою:

- ОПН (обмежувачів перенапруг нелінійних);
- розрядників;
- заземлювальних пристроїв.

3. Методи забезпечення електричної ізоляції в системах високих напруг

Ізоляція — ключовий елемент будь-якого високовольтного обладнання.

3.1. Види ізоляції

- Газова (повітря, SF₆, азот);
- Тверда (епоксида, кераміка, паперова ізоляція);
- Рідинна (трансформаторна олива, синтетичні ефіри);
- Комбінована.

3.2. Параметри, що визначають електричну міцність

- пробивна напруга;
- електрична міцність (кВ/мм);
- вологість і температура;
- стан поверхні ізоляції;
- частота напруги та форма сигналу.

3.3. Процеси пробою

Пробій може бути:

- електричний (внаслідок перевищення міцності);
- тепловий (перегрів діелектрика);
- електрохімічний (старіння під дією вологи).

3.4. Випробування ізоляції

Проводяться відповідно до стандартів ІЕС/ДСТУ:

- випробування підвищеною змінною напругою;
- випробування імпульсною напругою;
- вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ($\tan \delta$);
- вимірювання опору ізоляції.

4. Особливості використання і захисту обладнання при високих напругах

4.1. Вимоги до високовольтного обладнання

Високовольтні апарати повинні забезпечувати:

- надійне включення/відключення струмів;
- роботу під дією високих електричних полів;

- стійкість до перенапруг;
- стабільну теплову роботу.

До таких апаратів належать:

- вимикачі (масляні, вакуумні, елегазові);
- роз'єднувачі;
- трансформатори напруги і струму;
- високовольтні вводи;
- ізолятори різних типів.

4.2. Методи захисту

- Захист від перенапруг: ОПН, ЗР, заземлення.
- Захист від пробоя ізоляції: вибір правильного класу ізоляції, контроль вологості, регулярні випробування.
- Захист персоналу: огороження, блокування, сигналізація, використання ЗІЗ (діелектричні рукавички, боти, штанги), дотримання правил безпеки.

4.3. Організаційні заходи

- допуск до роботи лише навченого персоналу;
- використання нарядів-допусків;
- перевірка відсутності напруги;
- заземлення робочого місця;
- контроль стану обладнання в процесі експлуатації.

Завдання

Підготувати відповіді на питання:

1. Охарактеризуйте основні джерела високих напруг, що використовують в енергетичних системах. Наведіть приклади їх використання.
2. Охарактеруйте різні типи електричної ізоляції для високовольтного обладнання. Розгляньте їх переваги та недоліки.
3. Проаналізуйте методи захисту високовольтного обладнання від перенапруги. Розгляньте приклади типових захисних пристроїв.
4. Проаналізувати переваги кожного типу ізоляції (наприклад, стійкість до високих напруг, низька вартість) та їх недоліки (наприклад, потреба в обслуговуванні, деградації і т.д.).
5. Поясніть роботу типів захисних пристроїв, таких як варістори, вентильні розрядники, комутаційні захисні пристрої.

Питання для самоконтролю

1. Які можливості можуть отримати високі напруги в електричних установках?
2. Що таке напруга і як вона впливає на ізоляцію обладнання?
3. Які матеріали використовують для ізоляції високовольтного обладнання і в чому їх особливості?
4. Що таке перенапруга, і які основні причини її виникнення в електричних системах.
5. Які пристрої призначені для захисту високовольтних мереж від перенапруги?
6. Які види електричних розрядів забезпечуються при високих напругах, і в яких умовах вони проявляються
7. Які правила безпеки техніки необхідно використовувати при роботі з високовольтним обладнанням?

Висновки

Опрацювання основних принципів техніки високих напруг дозволяє:

- розуміти фізичні процеси при утворенні та передачі високих напруг;
- усвідомлювати вимоги до ізоляції та високовольтного обладнання;
- оцінювати характер впливу перенапруг та електричних полів;
- застосовувати методи захисту та забезпечення надійної роботи електроустановок.

Ці знання є базовими для подальшого вивчення спеціальних розділів високовольтної техніки, електричних мереж і систем релейного захисту.

Тема 2. Електричні розряди у вакуумі та газах: механізми та характеристики

Характеристика змісту матеріалу, що є предметом самостійного опрацювання

Предметом самостійного опрацювання є комплексна тема, пов'язана з механізмами та характеристиками електричних розрядів у вакуумі та газах, що застосовуються до техніки високих напруг.

Ця тема охоплює кілька ключових аспектів:

1. Механізми виникнення та розвитку електричних розрядів у вакуумі.

2. Механізми електричних розрядів у газах
3. Відмінності характеристик розрядів у вакуумі та газах.
4. Вплив різних факторів, таких як тиск, температура, іонізація, на електричні розряди.
5. Практичне застосування високовольтних розрядів у техніці та промисловості.

Опрацювання цих аспектів допоможе зрозуміти важливість механізмів електричних розрядів у вакуумі та газах.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Електричні розряди у вакуумі та газових середовищах є фундаментальними процесами у техніці високих напруг та електрофізиці. Вони визначають електричну міцність ізоляції, роботу високовольтних апаратів, механізми пробую та поведінку електричних полів. Розуміння закономірностей розвитку розрядів дозволяє забезпечувати надійність електрообладнання, правильно підбирати ізоляційні матеріали та контролювати роботу високовольтних систем.

1. Механізми виникнення та розвитку електричних розрядів у вакуумі

Вакуум характеризується відсутністю молекул газу, а отже — відсутністю традиційних механізмів іонізації. Однак розряди у вакуумі можливі й зумовлені низкою фізичних явищ.

1.1. Електронна емісія

Утворення вільних електронів відбувається за рахунок:

- польової емісії — виривання електронів з металу під дією сильного електричного поля;
- термоелектронної емісії — при нагріві катода;
- емісії від мікрровиступів на поверхні металу.

1.2. Формування мікродуг

При високій напруженості поля електрони, прискорюючись, ударяють у катод і викликають локальні нагріті області. Це може призвести до:

- плавлення мікрочастинок,
- випаровування матеріалу,
- утворення плазми.

1.3. Процес пробую у вакуумі

Пробій відбувається за рахунок:

- автоелектронної емісії,
- утворення плазмових каналів,
- переходу від стадії мікророзрядів до стійкої вакуумної дуги.

Особливості вакуумного пробою:

- відсутність залежності від тиску газу (на відміну від газів);
- пробій сильно залежить від стану поверхонь електродів;
- мала довжина пробивного каналу (часто мікрони — міліметри).

2. Механізми електричних розрядів у газах

На відміну від вакууму, у газах присутні молекули, які можуть бути іонізовані електричним полем.

2.1. Первинна іонізація

Виникає завдяки:

- тепловим електронам,
- радіаційному фону,
- ультрафіолетовому випромінюванню,
- фотоіонізації.

2.2. Ударна іонізація

Основний механізм пробою:

- електрони, прискорені полем, ударяються в молекули газу;
- утворюють вторинні електрони та позитивні іони;
- запускають іонізаційні лавини.

2.3. Вторинні процеси

До них належать:

- емісія електронів з катода під дією іонів;
- фотоемісія під дією УФ-випромінювання;
- утворення іонізаційної хвилі (лавина Таунсенда).

2.4. Форми газових розрядів

Розряди у газах поділяють на:

- несамостійні розряди (існують лише при зовнішньому іонізаторі);
- самостійні розряди:
 - тліючий,
 - коронний,
 - іскровий,
 - дуговий,
 - ковзний,
 - стримерний.

2.5. Закон Пашена

Пробивна напруга газового проміжку залежить від добутку тиску на відстань:

$$U_b = f(pd)$$

Цей закон пояснює:

- мінімум пробивної напруги при певному pd ;
- необхідність контролю щільності газу.

3. Відмінності характеристик розрядів у вакуумі та газах

3.1. Наявність робочого середовища

Параметр	Газ	Вакуум
Наявність молекул	Є	Немає
Іонізація	Ударна, фото, електронна	Майже відсутня
Шлях електрона	Короткий, залежить від тиску	Дуже довгий

3.2. Характер пробою

- У газах — лавинний, стримерний, іскровий.
- У вакуумі — емісійний, мікроплазмовий, катодний.

3.3. Вплив тиску

- Газ: залежність від закону Пашена.
- Вакуум: чим кращий вакуум — тим вища міцність до певної межі.

3.4. Поведінка після пробою

- Газ: утворення дуги зі значним струмом.
- Вакуум: утворення вакуумної дуги з низьким падінням напруги на дуговому проміжку.

4. Вплив різних факторів на розвиток електричних розрядів

4.1. Тиск

- Високий тиск → більша густина молекул → вища напруга пробою.
- Низький тиск → електрони мають менше зіткнень → можливе зниження напруги пробою.

4.2. Температура

- Підвищення температури зменшує щільність газу, що змінює пробивну напругу.

- У вакуумі температура впливає на термоелектронну емісію.

4.3. Іонізація середовища

Ступінь іонізації визначає:

- концентрацію вільних носіїв заряду;
- швидкість розвитку лавини;
- появу стримерів.

4.4. Електроди

- Шорсткість поверхні збільшує локальні поля й знижує пробивну напругу.
- Матеріал та стан поверхні є критичними для вакуумних розрядників.

5. Практичне застосування високовольтних розрядів у техніці та промисловості

Електричні розряди використовуються в багатьох галузях техніки.

5.1. Енергетика

- Вакуумні вимикачі (використовують вакуумну дугу).
- Газові вимикачі SF₆ (завдяки високій електричній міцності газу).
- Обладнання підстанцій: розрядники, ОПН, ізолятори.

5.2. Електрофільтри

Розряди використовуються для:

- зарядження пилових частинок,
- їх осадження під дією електричного поля.

5.3. Радіотехніка та електроніка

- Електронні лампи та вакуумні діоди.
- Рентгенівські трубки.
- Радіолампи та генератори НВЧ.

5.4. Матеріалознавство та технології

- Плазмова обробка поверхонь.
- Напилення покриттів у вакуумі.
- Іонна імплантація.

5.5. Наукові дослідження

- Прискорювачі частинок.
- Генератори імпульсних напруг.
- Камери для дослідження плазми.

Завдання

Підготувати відповіді на питання:

1. Охарактеризуйте механізм виникнення стрімкого розряду та його розвиток у газах при високих напругах. Введіть приклади цього застосування явища.
2. Опиши іскровий розряд у газах. Які умови сприяють його виникненню та розвитку? Проаналізуйте, як збільшити напругу на цьому
3. Порівняйте стримерний та іскровий розряди за наступними критеріями: механізм виникнення, умови виникнення, інтенсивність струму, застосування.

4. Проаналізуйте вплив тиску на розвиток електричних розрядів у вакуумі та газах. Виконайте розрахунок пробивної напруги для одного з типів газів (на вибір) і для вакууму.

5. Практичне застосування іскрових розрядів у промислових установках. Введіть конкретні приклади технології, де використовуєте іскрові розряди (наприклад, системи запалювання, плазмова обробка).

Питання для самоконтролю

1. Що таке електричний розряд, і за якими умовами він відбувається у вакуумі?
2. Які чинники впливають на величину пробивної напруги у вакуумі.
3. Як змінюється характер електричного розряду в газах зі зміною тиску?
4. Чим відрізняються стримерний та іскровий розряди?
5. Які основні відмінності між електричними розрядами у вакуумі та газах.
6. Яке практичне застосування мають електричні розряди.
7. Які заходи безпеки необхідно використовувати при роботі з обладнанням, що використовує електричні розрядники.

Висновки

Вивчення механізмів електричних розрядів у вакуумі та газових середовищах є необхідним для розуміння процесів пробою, вибору типу ізоляції та забезпечення надійної роботи високовольтного обладнання. Газові розряди характеризуються лавинними та стримерними механізмами іонізації, тоді як у вакуумі провідна роль належить емісійним процесам та мікроплазмовим каналам. Знання закономірностей впливу тиску, температури та геометричних факторів дозволяє керувати електричними розрядами та використовувати їх у промислових і наукових застосуваннях.

Тема 3. Електричний розряд у рідких та твердих діелектриках: особливості і вплив на ізоляцію.

Характеристика змісту матеріалу, що є предметом самостійного опрацювання

Предметом самостійного опрацювання є комплексна тема, пов'язана з механізмами та характеристиками електричних розрядів у рідких та твердих діелектриках, що застосовуються до техніки високих напруг.

1. Механізми електричного пробою в рідких діелектриках. Фактори, що впливають на електричний пробій: чистота рідини, температура, наявність домішків.
2. Типові рідкі діелектрики: трансформаторне масло, синтетичні рідини.
3. Механізми електричного захисту в твердих діелектриках. Фактори, що впливають на розвиток пробою: наявність мікротріщин, неоднорідність структури, старіння
4. Типові тверді діелектрики: полімери, кераміка, композитні матеріали.
5. Порівняння рідких та твердих діелектриків. Час розвитку пробою у рідких і твердих матеріалах. Вплив зовнішніх факторів на пробій (тиск, температура, вологість).
6. Технічні рішення для покращення ізоляційних властивостей діелектрика.

Опрацювання цих аспектів допоможе зрозуміти важливість механізмів електричних розрядів у рідких та твердих діелектриках.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Рідкі та тверді діелектрики є ключовими елементами ізоляційних систем високовольтного обладнання — трансформаторів, кабелів, вимикачів, вводів, генераторів тощо. Їх електрична міцність визначає надійність роботи енергетичної системи, стійкість до перенапруг, рівень ізоляції та термін служби обладнання. На відміну від газів і вакууму, діелектрики у рідкому та твердому стані мають складні фізико-хімічні процеси пробою, тісно пов'язані з їх структурою, чистотою і умовами експлуатації.

1. Механізми електричного пробою в рідких діелектриках

Електричний пробій у рідких ізоляційних середовищах є складним багатостадійним процесом, який залежить від властивостей рідини та зовнішніх факторів.

1.1. Типові механізми пробою

1.1.1. Електронний (лавинний) пробій

- Розвиток електронно-іонізаційних лавин у рідині.
- Виникає при високій напруженості поля.
- Подібний до пробою газів, але перебіг повільніший через високу густину рідини.

1.1.2. Тепловий пробій

- Локальний перегрів рідини → утворення мікропорожнин → іскрові канали.
- Відбувається при тривалих діях напруги або наявності домішок.

1.1.3. Канальний (порожнинний) пробій

- У рідині виникають газові бульбашки, які мають малу електричну міцність.
- Електричний розряд розвивається всередині бульбашки — подібно до іскрового розряду у газах.

1.2. Фактори, що впливають на пробій у рідинах

1.2.1. Чистота рідини

- Механічні частинки та домішки різко знижують пробивну напругу.
- Металеві частинки — центри локального підсилення електричного поля.
- Вода — найнебезпечніша домішка, особливо у трансформаторній оливі.

1.2.2. Температура

- Зі зростанням температури збільшується рухливість молекул → знижується електрична міцність.
- У гарячій рідині легше утворюються бульбашки.

1.2.3. Домішки і газові включення

- Водяні мікрокраплі формують канали провідності.
- Газові порожнини мають пробивну напругу у 10–20 разів нижчу, ніж сама рідина.

2. Типові рідкі діелектрики

2.1. Трансформаторне масло

- Найпоширеніший рідкий діелектрик.
- Виконує функції ізоляції та охолодження.
- Властивості:
 - висока електрична міцність (10–20 кВ/мм),
 - низька вологість,
 - хімічна стабільність,
 - висока теплоємність.

2.2. Синтетичні рідини

- Силіконові рідини,

- Естерові рідини (натуральні та синтетичні),
- Фторовані діелектрики.

Переваги:

- екологічність (для естерів),
- краща термічна стабільність,
- повільне старіння.

Недоліки:

- висока вартість;
- іноді нижча електрична міцність порівняно з мінеральною оливою.

3. Механізми електричного пробою в твердих діелектриках

У твердих діелектриках розвиток пробою залежить від внутрішньої структури матеріалу та наявності дефектів.

3.1. Основні механізми пробою

3.1.1. Електронний пробій

Подібний до газового або рідкого, але проявляється лише при дуже високих напругах (десятки-сотні кВ/мм).

3.1.2. Тепловий пробій

- Розвиток пов'язаний із локальним перегрівом матеріалу.
- Якщо тепловиділення перевищує тепловідведення → утворюється термічний канал, який веде до руйнування ізоляції.

3.1.3. Електрохімічний пробій

- Утворюється під дією вологи, електролітичних процесів, старіння.
- Часто зустрічається у полімерних ізоляціях кабелів (утворення «дерева» — water treeing, electrical treeing).

3.1.4. Поверхневий пробій

Виникає по поверхні діелектрика при наявності забруднень або вологи.

3.2. Фактори, що впливають на пробій твердих діелектриків

3.2.1. Мікротріщини та дефекти

- Є центрами підсилення електричного поля.
- Дефекти спричиняють локальний пробій.

3.2.2. Неоднорідність структури

- Може призводити до нерівномірного розподілу напруженості поля.
- У композитах — різні діелектричні властивості компонентів.

3.2.3. Старіння матеріалу

Види старіння:

- термічне,
- електричне,
- екологічне (волога, ультрафіолет),
- механічне.

Результат — зниження електричної міцності.

4. Типові тверді діелектрики

4.1. Полімери

- Поліетилен (XLPE у кабелях),
- Поліпропілен,
- Епоксидні композити.

Переваги:

- висока електрична міцність,
- низька густина,
- гнучкість та простота формування.

4.2. Кераміка

- Порцеляна,
- Склокераміка.

Переваги:

- висока міцність та термостійкість,
- довговічність.

Застосування:

- лінійні та підстанційні ізолятори,
- вводи трансформаторів.

4.3. Композитні матеріали

- Склопластики,
- Полімерні ізолятори з сердечником.

Переваги:

- мала вага,
- стійкість до забруднень,
- підвищена гідрофобність.

5. Порівняння рідких та твердих діелектриків

5.1. Час розвитку пробою

- У рідких діелектриках пробій розвивається швидше через можливість утворення газових бульбашок.

- У твердих діелектриках пробій може бути тривалим процесом (години–роки), зокрема при електричному старінні.

5.2. Вплив зовнішніх факторів

Фактор	Рідкі діелектрики	Тверді діелектрики
Температура	Зменшує міцність	Прискорює старіння
Вологість	Дуже критична	Викликає поверхневий пробій
Тиск	Підвищує міцність	Вплив слабший
Забруднення	Утворює канали пробою	Спричиняє поверхневі розряди

6. Технічні рішення для покращення ізоляційних властивостей діелектриків

6.1. Для рідких діелектриків

- Фільтрація та дегазація оливи;
- Контроль вмісту води (менше ніж 10 ppm для трансформаторів);
- Стабілізація температури;
- Використання синтетичних естерів як екологічної альтернативи.

6.2. Для твердих діелектриків

- Вакуумне просочення полімерних композитів;
- Захисні покриття від вологи;
- Усунення дефектів та мікротріщин у процесі виробництва;
- Використання зшитих полімерів XLPE для силових кабелів;
- Поліпшення поверхневої гідрофобності полімерних ізоляторів.

6.3. Конструктивні рішення

- Оптимізація електродних систем;
- Рівномірний розподіл напруженості поля;
- Використання бар'єрної ізоляції;
- Використання комбінованих ізоляцій (оливо-паперова, полімер-композит).

Завдання

Підготувати відповіді на питання:

1. Охарактеризуйте механізми електричного захисту в рідких діелектриках. Описати, як відбувається процес розряду та які фактори впливають на його розвиток.

2. Охарактеризуйте процеси електричного розряду в твердих діелектриках. Розкрийте механізм пробою та опишіть вплив високої напруги на тверді ізоляційні матеріали.

3. Порівняйте механізми розвитку електричного розряду в рідких та твердих діелектриках за наступними параметрами: електрична міцність, час пробою, тип руйнування ізоляції, вплив зовнішніх факторів.

Питання для самоконтролю

1. Які фізичні процеси передують електричному розряду в рідких діелектриках?
2. Що таке електрична міцність рідких та твердих діелектриків?
3. Які фактори можуть спричинити електричний пробій у твердих діелектриках?
4. Які матеріали потрібно використовувати для ізоляції в рідких діелектриках?
5. Як можна підвищити надійність ізоляційних матеріалів у високовольтних установках?
6. Чим відрізняється механізм протидії рідким та твердим діелектрикам?
7. Які практичні приклади використання рідких та твердих діелектриків в енергетичних системах.

Висновки

Рідкі та тверді діелектрики відіграють ключову роль в ізоляційних системах високовольтного обладнання. Електричний пробій цих матеріалів має різні механізми — теплові, електронні, канальні, поверхневі та електрохімічні. Фактори, такі як температура, вологість, наявність домішок, дефекти структури та старіння, значно впливають на електричну міцність матеріалу. Використання сучасних композитних та синтетичних діелектриків, покращення технологій їх підготовки та контролю дозволяють підвищити надійність електроенергетичного обладнання та збільшити термін його експлуатації.

Тема 4. Перенапруги в електричних системах: причини та методи зменшення

*Характеристика змісту матеріалу,
що є предметом самостійного опрацювання*

Предметом самостійного опрацювання є комплексна тема, що використовує перенапругу в електричних системах, їх причини, наслідки та методи захисту.

Ця тема охоплює кілька ключових аспектів:

1. Визначення перенапруги: поняття перенапруги, типи перенапруг (імпульсні, стаціонарні) та їх значення в електричних системах.
2. Причини виникнення перенапруги. Аналіз основних причин виникнення перенапруги, таких як грозові розряди, комутаційні процеси та їх вплив на електричне обладнання.
3. Вплив перенапруг на електричне обладнання.
4. Дослідження наслідків перенапруг для трансформаторів, ізоляторів, електричних машин та інших компонентів систем.
5. Методи захисту від перенапруги. Огляд різних методів і засобів, захисту таких як варісторі, газорозрядні трубки, системи заземлення та інші рішення.
6. Стандарти та норми. Розгляд нормативно-правової бази, яка регулює питання захисту електричних систем від перенапруги.

Опрацювання цих аспектів допоможе зрозуміти механізми виникнення перенапруг в електричних системах та методи їх зменшення.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Тема 4. Перенапруги в електричних системах: причини та методи зменшення

Перенапруги — це напруги, що перевищують номінальні або допустимі рівні в електричних системах. Вони є однією з найбільш поширених і небезпечних причин відмов високовольтного обладнання. Перенапруги можуть виникати як під дією природних факторів (грозові розряди), так і внаслідок технологічних процесів у мережі (комутація, аварії, зміна режимів). Розуміння їх природи є ключем до захисту енергетичних систем і забезпечення безаварійної роботи обладнання.

1. Визначення перенапруги та їх типи

1.1. Поняття перенапруги

Перенапруга — це короточасне або тривале підвищення напруги в електричній мережі відносно її номінального рівня. Перенапруги можуть:

- виникати внаслідок зовнішніх або внутрішніх впливів;
- мати різну тривалість;

- мати різні форми сигналу (імпульсні, аперіодичні, коливальні).

1.2. Основні типи перенапруг

1) Імпульсні перенапруги

- Формуються при грозових ударах у лінії електропередачі.
- Характеризуються надзвичайно швидким фронтом (до декількох мкс).
- Рівні можуть досягати сотень кіловольт.

2) Комутаційні (внутрішні) перенапруги

Виникають унаслідок:

- вимкнення/увімкнення ліній;
- перемикання конденсаторних батарей;
- пуску трансформаторів під намагнічування;
- аварійних режимів.

Характеристики:

- тривалість від мілісекунд до секунд;
- амплітуда нижча, ніж при грозових ударах, але триваліша, що небезпечніше для ізоляції.

3) Стаціонарні перенапруги

- Підвищення напруги на тривалий час.
- Причина: несправності регулюючих пристроїв, неправильні режими мережі, асиметрія фаз.
- Можуть спричинити перевантаження ізоляції та прискорене старіння обладнання.

2. Причини виникнення перенапруг

2.1. Грозові перенапруги

- Удари блискавки в ЛЕП або поблизу неї.
- Індуковані перенапруги від каналів блискавки.
- Вплив фронту грозових хвиль на обладнання підстанцій.

Особливості:

- великий пік напруги;
- дуже короткий час дії;
- найбільш руйнівні для ізольованих ділянок.

2.2. Комутаційні процеси

До них належать:

- комутація довгих ліній;
- вимкнення трансформаторів за струмів намагнічування;
- перемикання реакторів чи конденсаторів;

- струмові перехідні у вимикачах, що викликають аперіодичні перенапруги.

2.3. Аварійні та нештатні режими

- Обрив нульового провідника у мережах з нейтралю;
- однофазні замикання на землю;
- перенапруга холостого ходу трансформатора;
- ферорезонанс — особливо небезпечний нелінійний режим, пов'язаний з взаємодією індуктивності та ємності.

3. Вплив перенапруг на електричне обладнання

Перенапруги можуть спричиняти:

3.1. Для трансформаторів

- пробій виткової та міжфазної ізоляції;
- пробій введів;
- локальні часткові розряди;
- прискорене старіння оливно-паперової ізоляції.

3.2. Для ізоляторів ЛЕП

- поверхневий пробій;
- іонізація повітря → коронні розряди;
- пошкодження ізоляторів у результаті імпульсної хвилі.

3.3. Для електричних машин

- пробій обмоток;
- перехід дуги по пазах статора;
- руйнування ізоляції при повторних імпульсах.

3.4. Для кабельних ліній

- пробій ізоляції XLPE або ПВХ;
- часткові розряди в муфтах і кінцевих термоусадках.

3.5. Для електронного обладнання

- вихід з ладу силової електроніки;
- порушення роботи мікроконтролерів;
- пошкодження перетворювачів та інверторів.

4. Дослідження наслідків перенапруг

Перенапруги можуть мати:

4.1. Короткострокові наслідки

- миттєвий пробій ізоляції;
- відмова вимикача;
- пошкодження обмоток трансформатора;

- аварійне відключення ділянок мережі.

4.2. Довгострокові наслідки

- прискорене старіння ізоляції;
- зростання часткових розрядів;
- ерозія контактів;
- поява мікротріщин і порушення гідрофобності полімерів.

Дослідження характеру перенапруг дозволяє розробляти захисні стратегії та прогнозувати стан обладнання.

5. Методи захисту від перенапруг

5.1. Обмежувачі перенапруг (ОПН)

- Використовують варістори на основі оксидів металів (ZnO).
- Мають нелінійну вольт-амперну характеристику.
- Ефективні проти імпульсних та комутаційних перенапруг.

5.2. Газорозрядники

- Металеві або скляні прилади, що пробиваються при фіксованій напрузі.
- Використовуються в телекомунікаціях, системах керування, слабкострумних колах.

5.3. Іскрові розрядники

- Прості та дешеві пристрої для захисту ЛЕП високої напруги.
- Забезпечують відведення грозових ударів у землю.

5.4. Системи заземлення

- Правильно організована система заземлення знижує потенціали перенапруг.
- Обов'язковий елемент захисту підстанцій.

5.5. Екранування та блискавкоприймачі

- Захист будівель і обладнання від прямих ударів блискавки;
- Зменшення індукованих перенапруг.

5.6. Реактори та фільтри

Застосовуються для:

- гасіння ферорезонансу;
- обмеження швидкості зміни струму;
- зниження високочастотних імпульсів.

6. Стандарти та норми щодо захисту від перенапруг

Захист від перенапруг регламентується міжнародними та національними стандартами:

6.1. Міжнародні стандарти ІЕС

- ІЕС 60071 – Координація ізоляції.
- ІЕС 62305 – Захист від блискавки (серія стандартів).
- ІЕС 60099 – ОПН (нелінійні обмежувачі перенапруг).
- ІЕС 60364 – Електроустановки низької напруги, захист від

перенапруг.

6.2. Національні стандарти України (ДСТУ)

- ДСТУ EN 62305 – Захист від блискавки.
- ДСТУ ІЕС 60071 – Координація ізоляції.
- ДСТУ ISO/ІЕС – стандарти для електронного обладнання та

мереж.

6.3. Галузеві нормативи

- Правила улаштування електроустановок (ПУЕ);
- Правила технічної експлуатації електричних станцій та мереж (ПТЕЕС);
- Вимоги «Укренерго» щодо координації ізоляції та блискавкозахисту.

Дотримання стандартів дозволяє мінімізувати ризик ушкоджень обладнання та забезпечити безпечну роботу енергетичних систем.

Завдання

Підготувати відповіді на питання:

1. Що таке перенапруга? Охарактеризуйте різні типи перенапруги та їх особливості.
2. Яке значення має розуміння перенапруги для проектування електричних систем?
3. Які причини виникнення перенапруги?
4. Вплив перенапруг на електричне обладнання.
5. Охарактеризуйте методи захисту від перенапруги.
6. Які нормативно-правові документи регулюють захист електричних систем від перенапруг?

Питання для самоконтролю

1. Що таке перенапруга і яка різниця між імпульсними та стаціонарними перенапругами?
2. Які фактори визначають ступінь небезпеки перенапруги в електричних системах?

3. Які основні причини виникнення перенапруг в електричних системах?
4. Як грозові розряди викликають перенапруги в електричних мережах?
5. Які комутаційні процеси можуть спричинити перенапругу?
6. Які наслідки перенапруг для роботи трансформаторів?
7. Як перенапруги впливають на ізолятори та їхню експлуатацію?
8. Які методи захисту від перенапруг використовуються в сучасних електричних системах?
9. Які нормативно-правові документи регулюють захист електричних систем від перенапруг?
10. Які стандарти використовуються для визначення рівнів допустимих перенапруг?

Висновки

Перенапруги в електричних мережах є одним із ключових факторів, що впливають на надійність та довговічність енергетичного обладнання. Їх виникнення пов'язане з грозовими процесами, комутацією, аваріями та технологічними режимами. Сучасні системи захисту — ОПН, газорозрядники, блискавкоприймачі, фільтри та заземлення — дозволяють ефективно зменшувати рівень перенапруг та забезпечувати безпеку мережі. Знання природи перенапруг і нормативних вимог є фундаментом для розробки, експлуатації та координації ізоляції високовольтних систем.

Тема 5. Комутаційні перенапруги та їх вплив на роботу електричних систем.

Характеристика змісту матеріалу, що є предметом самостійного опрацювання

Ця тема охоплює кілька ключових аспектів:

1. Процес виникнення перенапруг під час комутацій, таких як вмикання/вимикання ліній, вимикачів або інших електричних пристроїв.
2. Огляд основних причин комутаційних перенапруг, зокрема зміни електричних параметрів при вмиканні та вимиканні ланцюгів, вплив індуктивних і ємнісних елементів.

3. Розподіл перенапруг на різні типи, такі як перенапруги при ввімкненні та відключенні ненавантажених ліній, конденсаторів, а також при автоматичному повторному вмиканні.

4. Вплив на електричне обладнання. Аналіз наслідків комутаційних перенапруг для ізоляції трансформаторів, кабелів, електричних машин та іншого обладнання, включаючи ризик пробою та зниження експлуатаційного ресурсу.

5. Методи обмеження комутаційних перенапруг. Огляд методів та засобів зниження негативного впливу комутаційних перенапруг, таких як використання розрядників, демпфуючих пристроїв, а також плавне вмикання та відключення навантажень.

Опрацювання цих аспектів допоможе зрозуміти механізми виникнення комутаційних перенапруг та їх вплив на роботу електричних систем.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Комутаційні перенапруги — це внутрішні перенапруги, що виникають у процесі вмикання або вимикання електричного обладнання та ліній електропередачі. На відміну від грозових перенапруг, комутаційні мають меншу пікову амплітуду, але тривалішу дію, що робить їх небезпечними для ізоляції електричного обладнання. Вони можуть призводити до часткових розрядів, прискореного старіння та пробою ізоляції, а також до появи аварійних режимів у мережах.

1. Процес виникнення перенапруг під час комутації

Комутація — це зміна стану електричного кола, що супроводжується перехідними процесами.

Короткочасні коливання струму або напруги виникають унаслідок:

- раптового розриву струмового кола,
- вмикання напруги на елементи з ємністю або індуктивністю,
- відключення навантажених або ненавантажених ділянок мережі,
- відновлення напруги на вимикачах після гасіння дуги.

Ці процеси створюють коливальні або аперіодичні перенапруги, що залежать від параметрів кола.

2. Основні причини комутаційних перенапруг

2.1. Зміна електричних параметрів при комутації

При переключенні ланцюгів змінюються:

- струм (I),

- напруга (U),
- індуктивність (L),
- ємність (C),

що призводить до виникнення електромагнітних коливань.

2.2. Вплив індуктивних елементів

При вимкненні індуктивного навантаження:

- струм намагається зберегтися згідно з законом $I=U/L$;
- виникає перенапруга на контактах вимикача;
- формується дуга та аперіодичний імпульс напруги.

2.3. Вплив ємнісних елементів

При вмиканні ємнісного навантаження (кабелі, конденсаторні батареї):

- заряд ємності відбувається стрибкоподібно;
- виникає різкий імпульс струму;
- можливий ефект "вмикання на пік напруги", що створює

високі перенапруги.

2.4. Вплив дуги в апаратах комутації

Під час вимкнення вимикача:

- утворюється електрична дуга,
- після її гасіння напруга відновлюється стрибком, що також

викликає перенапругу.

3. Типи комутаційних перенапруг

Комутаційні перенапруги поділяють за умовами виникнення.

3.1. Перенапруги при ввімкненні ненавантажених ліній

У ненавантаженої ЛЕП виникають коливання напруги через її ємнісну природу:

- високий зарядний струм,
- можливі коливання типу «Ферранті».

3.2. Перенапруги при відключенні ненавантажених ліній

При вимкненні:

- виникає дуга на контактах;
- енергія поля ЛЕП перетворюється на імпульс напруги;
- можливий багаторазовий повтор дуги (повторне загорання).

3.3. Перенапруги при комутації конденсаторних батарей

Характерні:

- імпульсні струми великої амплітуди;
- можливість резонансних режимів;
- поява перенапруг на шині підстанції.

3.4. Перенапруги при АПВ (автоматичному повторному вмиканні)

Після автоматичного повторного вмикання:

- можливе ввімкнення на залишкову напругу лінії;
- фази можуть бути несиметричними;
- виникає складний коливальний перехідний процес.

4. Вплив комутаційних перенапруг на електричне обладнання

4.1. Трансформатори

- Імпульси перенапруг можуть пробивати міжвиткову ізоляцію.
- Виникають часткові розряди, що прискорюють старіння масла та паперу.
- Небезпечні перенапруги намагнічування при ввімкненні.

4.2. Кабельні лінії

- XLPE-ізоляція чутлива до стрімких імпульсів напруги.
- Можливе виникнення "електричного дерева" (electrical treeing).
- У кінцевих муфтах можливий прорив.

4.3. Електричні машини

- Перегрів та пробій ізоляції пазів статора;
- Руйнування ізоляційних прокладок;
- Дефекти колекторів та щіткових вузлів.

4.4. Високовольтні вимикачі

- Стрес на контактах та ізоляції при погашенні дуги;
- Ерозія та прискорене зношення контактної системи.

5. Методи обмеження комутаційних перенапруг

5.1. Застосування обмежувачів перенапруг (ОПН)

- Використовуються ZnO-варистори.
- Швидко обмежують пікові значення імпульсів.

5.2. Демпфуючі пристрої

- RC-ланцюги (R-C snubber) для гасіння коливань;
- RLC-фільтри для обмеження високочастотних компонентів;
- спеціальні резистори для нормування комутаційного струму.

5.3. Реактори та дроселі

Призначені для:

- зменшення струмів заряджання;
- зниження частоти коливань;
- запобігання резонансу.

5.4. Плавний пуск та плавне відключення

Реалізується за допомогою:

- тиристорних комутаційних пристроїв;
- пристроїв плавного пуску (soft-start);
- синхронізованого вмикання в моменти мінімальної напруги.

5.5. Удосконалені комутаційні алгоритми

- В АПВ використовується контроль залишкової напруги;
- Вимикачі з можливістю контролю моменту комутації (point-on-wave switching).

5.6. Конструктивні методи

- Вибір кабелів із товстішою або вирівняною ізоляцією;
- Поділ конденсаторних батарей на секції;
- Оптимізація параметрів індуктивності та ємності мережі.

Завдання

Підготувати відповіді на питання:

1. Що таке комутаційні перенапруги та в яких випадках вони виникають в електричних системах?
2. Які основні причини виникнення комутаційних перенапруг під час вмикання або вимикання електричних ліній та обладнання?
3. Які типи комутаційних перенапруг ви знаєте? Поясніть, як вони виникають у процесі автоматичного повторного ввімкнення лінії.
4. Як комутаційні перенапруги впливають на роботу електричних машин, трансформаторів та іншого обладнання?
5. Які існують методи обмеження комутаційних перенапруг? Наведіть приклади пристроїв або технічних рішень для їх зниження.
6. Які нормативні документи регламентують вимоги щодо захисту електричних систем від комутаційних перенапруг?
7. Яким чином плавне ввімкнення/вимкнення навантажень допомагає уникнути виникнення комутаційних перенапруг?

Питання для самоконтролю

1. Що таке комутаційні перенапруги і які їх основні види?
2. Які фактори впливають на виникнення комутаційних перенапруг в електричних мережах?
3. Як комутаційні перенапруги можуть вплинути на електричне обладнання та його працездатність?

4. Які методи використовуються для обмеження комутаційних перенапруг в електричних системах?
5. Як вимкнення ненавантажених ліній впливає на рівень комутаційних перенапруг?
6. Які пристрої застосовуються для захисту електричних систем від комутаційних перенапруг?
7. Які чинники потрібно враховувати при проектуванні захисту від комутаційних перенапруг?

Висновки

Комутаційні перенапруги є невід’ємною частиною роботи електричних систем і становлять серйозну загрозу для ізоляції та надійності обладнання. Їх виникнення пов’язане з індуктивними й ємнісними процесами в електричних колах, роботою дуги, заряджанням і розряджанням елементів, режимами АПВ та вмиканням довгих ліній. Застосування сучасних технічних методів обмеження перенапруг — ОПН, демпфуючих пристроїв, реакторів, фільтрів, а також оптимальних режимів комутації — дозволяє суттєво підвищити надійність електроенергетичних систем та продовжити термін служби високовольтного обладнання.

Тема 6. Ізоляція повітряних ліній електропередач та відкритих розподільчих пристроїв.

Характеристика змісту матеріалу, що є предметом самостійного опрацювання

Ця тема охоплює кілька ключових аспектів:

Розгляд різних типів ізоляційних матеріалів, використовуваних в повітряних лініях електропередач та відкритих розподільчих пристроях, таких як порцеляна, скло, композитні матеріали та ін.

1. Важливість правильної координації ізоляції для забезпечення безпечної та надійної роботи електричних систем, включаючи підрахунок напруги та визначення необхідної довжини ізоляції.

2. Аналіз різних факторів, які впливають на ефективність ізоляції, таких як вологість, температура, забрудненість, механічні навантаження та вплив атмосферних явищ.

3. Методи і технології, що використовуються для випробування та оцінки стану ізоляції, включаючи різні види електричних і механічних випробувань.

Опрацювання цих аспектів допоможе вивчити типи ізоляційних матеріалів в тому числі ізоляцію відкритих пристроїв та їх вплив на роботу електричних систем.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Ізоляція є важливою складовою конструкції повітряних ліній електропередач (ПЛ) та відкритих розподільчих пристроїв (ВРП). Вона забезпечує електричне відокремлення струмопровідних частин від опор, заземлених конструкцій і елементів навколишнього середовища, що гарантує безпеку, безаварійну роботу та надійність енергетичної системи. Якість і стан ізоляції визначають здатність устаткування витримувати робочі напруги, перенапруги, змінні атмосферні та механічні впливи.

1. Типи ізоляційних матеріалів для ПЛ та ВРП

У сучасних електроенергетичних системах використовують кілька основних груп ізоляційних матеріалів.

1.1. Порцелянові ізолятори

Переваги:

- висока механічна міцність;
- стійкість до ультрафіолету;
- довговічність.

Недоліки:

- крихкість;
- значна маса;
- ризик руйнування через мікротріщини.

Застосування:

- підвісні, опорні, штирьові ізолятори на ПЛ 6–750 кВ;
- конструктивні елементи ВРП.

1.2. Скляні ізолятори

Переваги:

- висока електрична міцність;
- самоконтроль (при пошкодженні скло руйнується на дрібні частини);
- стійкість до старіння.

Недоліки:

- вразливість до механічних ударів;
- ризик руйнування у зоні натягу.

1.3. Композитні (полімерні) ізолятори

Складаються з:

- склопластикового стрижня;
- силіконового або полімерного покриття;
- металевих арматур.

Переваги:

- мала маса;
- висока гідрофобність;
- стійкість до забруднень;
- краща поведінка під час ожеледі.

Недоліки:

- старіння полімеру;
- ризик проникнення вологи до стрижня;
- вищі вимоги до контролю якості.

1.4. Інші матеріали

- Епоксидні композити — для ВРП;
- Склокераміка — спеціальні конструкції ізоляторів;
- Гумові та пластикові елементи — допоміжні частини ізоляційних конструкцій.

2. Важливість координації ізоляції

2.1. Поняття координації ізоляції

Координація ізоляції — це вибір рівня електричної міцності ізоляційних елементів, який забезпечує:

- витримування робочої напруги;
- витримування комутаційних і грозових перенапруг;
- мінімізацію аварійних відмов.

Основні параметри:

- номінальна напруга системи;
- рівень ізоляції (BIL — Basic Insulation Level);
- імпульсна міцність (LIWL);
- комутаційна міцність (SIWL).

2.2. Підрахунок необхідної довжини ізоляції

Для визначення рівня ізоляції враховують:

- грозові та комутаційні перенапруги;
- відстані по повітрю;

- шлях витоку по поверхні ізолятора.

Типовий параметр — критична довжина шляху витоку (мм/кВ).

2.3. Роль координації ізоляції у ПЛ та ВРП

Правильний розрахунок ізоляції забезпечує:

- зниження кількості аварій;
- оптимізацію конструкції опор та ізоляторів;
- економічну ефективність будівництва;
- захист обладнання від перенапруг.

3. Фактори, що впливають на ефективність ізоляції

Ізоляція ПЛ та ВРП піддається значній кількості зовнішніх впливів.

3.1. Вологість та опади

- Зволожена поверхня ізолятора знижує його електричну міцність.
- Дощ, туман, роса створюють плівки провідності.
- У прибережних районах — соляні відкладення.

3.2. Температура

- Зміни температури викликають:
 - термічні деформації;
 - зміни діелектричних характеристик;
 - появу мікротріщин у порцеляні.

3.3. Забрудненість

Пил, солі, промислові викиди створюють шари провідності та сприяють поверхневим пробоям.

Забрудненість класифікується за рівнями (ІЕС 60815).

3.4. Механічні навантаження

- Натяг провідників на ПЛ;
- Налипання ожеледі;
- Вібрації від вітру;
- Термічні навантаження під час коротких замикань.

3.5. Атмосферні явища

- Удари блискавки;
- Корона та радіальні розряди;
- Перенапруги внаслідок грози.

3.6. Старіння матеріалів

- У порцеляні — ерозія глазури.
- У полімерних — деградація силікону та втрата гідрофобності.

4. Методи і технології випробування та оцінки стану ізоляції

Якісна оцінка ізоляції забезпечує надійну роботу енергетичного обладнання.

4.1. Електричні випробування

4.1.1. Випробування підвищеною змінною напругою

Застосовується для:

- визначення електричної міцності;
- перевірки стійкості до часткових розрядів.

4.1.2. Випробування імпульсною напругою

Проводяться за стандартами:

- для грозових перенапруг (1,2/50 мкс);
- для комутаційних перенапруг (250/2500 мкс).

Потрібні для координації ізоляції.

4.1.3. Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ($\tan\delta$)

Переважно для порцелянових та композитних ізоляторів.

4.1.4. Часткові розряди

Наявність часткових розрядів вказує на:

- дефекти матеріалу;
- старіння полімерів;
- мікротріщини.

4.2. Механічні випробування

4.2.1. Випробування на розтяг

Перевірка здатності ізоляторів витримувати натяг ліній.

4.2.2. Випробування на ударні навантаження

Переважно для скляних та порцелянових виробів.

4.3. Кліматичні випробування

- Робота під соляним туманом;
- Довгострокові цикли зволоження-висушування;
- Випробування під ультрафіолетом.

4.4. Технології дистанційного моніторингу

- Тепловізійний контроль;
- Діагностика часткових розрядів;
- Дрон-моніторинг ПЛ;
- Сенсори напруги та струму на лініях.

Завдання

Підготувати відповіді на питання:

1. Проведіть дослідження різних типів ізоляційних матеріалів, використовуваних в повітряних лініях електропередач. Порівняйте їх властивості, переваги та недоліки.
2. Розробіть таблицю, в якій будуть представлені різні типи ізоляційних конструкцій і їх співвідношення з напругою, використаною в електричних системах.
3. Визначте, які зовнішні фактори (вологість, забрудненість, температура) можуть вплинути на ефективність ізоляції. Проведіть аналіз впливу кожного з цих факторів.
4. Ознайомтеся з основними нормативно-правовими актами та стандартами, що регулюють ізоляцію повітряних ліній електропередач. Напишіть короткий звіт про їх вимоги.
5. Опишіть різні методи випробувань ізоляції, які використовуються для перевірки стану ізоляційних систем. Які параметри вимірюються під час цих випробувань?
6. Визначте основні ризики, пов'язані з виходом ізоляційних систем з ладу. Розробіть рекомендації щодо профілактичних заходів для запобігання цим ризикам.

Питання для самоконтролю

1. Які основні функції ізоляції в повітряних лініях електропередач?
2. Які типи ізоляційних матеріалів використовуються в повітряних лініях електропередач? Які їхні переваги та недоліки?
3. Які фактори можуть впливати на ефективність ізоляції?
4. Які вимоги висуваються до ізоляції відповідно до нормативно-правових актів?
5. Нормативи можуть включати мінімальні значення пробивної напруги, терміни експлуатації та методи випробувань.
6. Які методи випробувань ізоляції існують? Які параметри вимірюються під час цих випробувань?
7. Які ризики пов'язані з виходом ізоляційних систем з ладу? Які заходи можна вжити для їх запобігання?

Висновки

Ізоляція повітряних ліній електропередач і ВРП є критичним елементом для забезпечення безпеки та надійності енергосистем. Ефективність ізоляції залежить від властивостей матеріалів, умов експлуатації, якості виготовлення та регулярності діагностики. Важливу роль відіграє координація ізоляції, що

дозволяє визначити необхідні рівні стійкості до робочих і перенапруг. Своєчасне випробування, моніторинг і належна експлуатація забезпечують тривалий термін роботи ізоляційних систем у ПЛ та ВРП.

Тема 7. Ізоляційні матеріали для силових трансформаторів, конденсаторів, кабелів і високовольтних електричних машин.

Характеристика змісту матеріалу, що є предметом самостійного опрацювання

Ця тема охоплює кілька ключових аспектів:

1. Типи ізоляційних матеріалів для силових трансформаторів, конденсаторів та кабелів.
2. Електричні характеристики ізоляційних матеріалів.
3. Теплові характеристики ізоляційних матеріалів в процесі експлуатації трансформаторів і електричних машин.
4. Вплив вологості та навколишнього середовища на електричні характеристики ізоляційних матеріалів
5. Механічні властивості ізоляційних матеріалів при вібрації та ударах, що виникають під час експлуатації.

Опрацювання цих аспектів допоможе вивчити типи ізоляційних матеріалів, що використовуються для силових трансформаторів, високовольтних електричних машин, конденсаторів та кабелів.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Ізоляційні матеріали є ключовими елементами у конструкції електроенергетичного обладнання. Їх основне призначення — забезпечення електричного відокремлення частин з різними потенціалами та гарантування стабільної й безпечної роботи трансформаторів, конденсаторів, кабелів і високовольтних машин. Вибір типу ізоляції визначає надійність обладнання, його теплову стійкість, термін служби й здатність протистояти електричним, механічним та екологічним впливам.

1. Типи ізоляційних матеріалів для силових трансформаторів, конденсаторів та кабелів

1.1. Ізоляція силових трансформаторів

1.1.1. Тверді матеріали

- Целюлозні матеріали (електрокартон, пресшпан, крафт-папір):

- Використовуються для міжвиткової та міжфазної ізоляції.
- Просочуються трансформаторною оливою.
- Епоксидно-паперові композити — вводи трансформаторів.
- Деревоволокнисті матеріали — дистанційні елементи.

1.1.2. Рідкі ізоляційні матеріали

- Трансформаторна олива (мінеральна) — найпоширеніша.
- Синтетичні та натуральні естери — екологічні альтернативи.
- Виконують подвійні функції: електрична ізоляція + охолодження.

1.2. Ізоляція конденсаторів

Конденсатори високої напруги мають багат шарову структуру, де важлива висока електрична міцність і стабільність діелектрика.

- Поліпропіленові плівки (PP) — основний діелектрик для сучасних силових конденсаторів.
- Папір, просочений оливою — традиційний варіант.
- Поліестер (PET) — використовується в малогабаритних конденсаторах.

Вимоги:

- низький тангенс втрат;
- висока міцність на пробій;
- відсутність старіння під дією електричних полів.

1.3. Ізоляція силових кабелів

1.3.1. Полімерні діелектрики

- XLPE (зшитий поліетилен) — стандарт сучасних високовольтних кабелів.
- PE, PVC — для середніх і низьких напруг.

1.3.2. Паперова просочена ізоляція (ППІ)

- Папір + в'язкий просочувальний склад.
- Використовується в кабелях високої та надвисокої напруги.

1.3.3. Напівпровідникові екрани

Забезпечують рівномірний розподіл електричного поля в кабелі.

1.4. Ізоляція високовольтних електричних машин

- Епоксидно-мінеральні композити для пазової ізоляції.
- Слюда (міканіт) — основний матеріал для ізоляції обмоток у машинах високої напруги.
- Склотканини, епоксидні смоли — для створення теплостійких оболонок.

2. Електричні характеристики ізоляційних матеріалів

Основні параметри, що визначають якість ізоляції:

2.1. Електрична міцність (кВ/мм)

- Визначає здатність матеріалу протистояти пробою.
- Найвища — у полімерів та синтетичних естерів.

2.2. Діелектрична проникність

Характеризує накопичення електричної енергії:

- для кабелів важливо низьке значення (зменшує ємність).

2.3. Тангенс кута діелектричних втрат ($\tan\delta$)

Показує рівень внутрішніх втрат:

- низький $\tan\delta$ = висока якість ізоляції.

2.4. Стійкість до часткових розрядів

- XLPE має високу стійкість;
- папір та олива — чутливі до іонізаційних каналів.

2.5. Електричне старіння

Під впливом електричного поля виникають:

- мікротріщини,
- електричне дерево (в кабелях),
- деградація полімеру.

3. Теплові характеристики ізоляційних матеріалів у трансформаторах і електричних машинах

3.1. Класи теплостійкості

За стандартами ІЕС:

- Клас **A** (105 °C) — целюлоза, папір;
- Клас **B** (130 °C);
- Клас **F** (155 °C);
- Клас **H** (180 °C) — епоксиди, мікатканина.

3.2. Теплові процеси у трансформаторах

- Олива відводить тепло від обмоток до радіаторів.
- Паперова ізоляція прискорено старіє при температурі > 95 °C.
- Оливо-паперові системи мають тривалий перехідний процес нагріву.

3.3. Теплові процеси в електричних машинах

- Тепло утворюється внаслідок струмів у обмотках і втрат у сталі.

- Епоксидно-міканітова система витримує високі температури без деградації.
- Вентиляція та охолодження критично впливають на термін служби.

4. Вплив вологості та навколишнього середовища на ізоляційні матеріали

4.1. Вологість як критичний фактор

Волога знижує електричну міцність:

- целюлоза активно поглинає воду → втрати ростуть у 10–20 разів;
- вода в оливі спричиняє часткові розряди;
- полімери більш стійкі, але втрачають гідрофобність при старінні.

4.2. Вплив температури

- Висока температура пришвидшує хімічне старіння;
- Низька температура знижує еластичність полімерів.

4.3. УФ-випромінювання та озон

Особливо шкідливі для полімерних оболонок кабелів і ізоляторів.

4.4. Забруднення

- Солі, пил, промислові аерозолі збільшують поверхневу провідність.
- У трансформаторах забруднення оливи знижує її електричну міцність.

5. Механічні властивості ізоляційних матеріалів при вібрації та ударах

5.1. Вібраційні навантаження

Виникають у:

- великих трансформаторах;
- генераторах і турбогенераторах;
- кабельних лініях (від потоків повітря та ґрунтових деформацій).

Проблеми:

- розтріскування твердих ізоляційних матеріалів;
- розшарування композицій;
- ослаблення паперових прокладок.

5.2. Удари та механічні впливи

Особливо критично при транспортуванні великогабаритного обладнання.

5.3. Гнучкість полімерів

- XLPE та силіконові матеріали добре переносять вібрацію;
- керамічні та паперові — схильні до руйнування.

Завдання

Підготувати відповіді на питання:

1. Виберіть три основні типи ізоляційних матеріалів, які використовуються в силових трансформаторах, конденсаторах і кабелях. Опишіть їх основні фізичні та електричні характеристики, а також переваги та недоліки кожного матеріалу.
2. Розгляньте, як вологість впливає на характеристики ізоляційних матеріалів. Які методи використовуються для захисту ізоляції від впливу вологи?
3. Складіть план експерименту для тестування пробивної напруги паперових і полімерних ізоляторів. Які фактори слід врахувати під час проведення експерименту?
4. Визначте, як температура впливає на електричні характеристики ізоляційних матеріалів. Які матеріали є найбільш термостійкими, і в яких застосуваннях це особливо важливо?

Питання для самоконтролю

1. Що таке ізоляційні матеріали і які їх основні функції в електричних системах?
2. Які основні типи ізоляційних матеріалів використовуються в силових трансформаторах, конденсаторах та кабелях? Перерахуйте їх характеристики.
3. Яким чином вологість може вплинути на ефективність ізоляційних матеріалів? Які заходи захисту від вологи існують?
4. Як температура впливає на електричні характеристики ізоляційних матеріалів? Які матеріали є найбільш термостійкими?
5. Які методи випробування використовуються для оцінки якості ізоляції силових трансформаторів і кабелів?
6. Які нормативно-правові документи регулюють вимоги до ізоляційних матеріалів у електричних системах?

Висновки

Ізоляційні матеріали визначають надійність високовольтного обладнання та впливають на його електричні, теплові та механічні характеристики. Вибір відповідного матеріалу залежить від типу обладнання, режимів його роботи та умов експлуатації.

Целюлозні й рідкі ізоляції традиційно застосовуються у трансформаторах, полімерні — у кабелях та конденсаторах, а слоюні й композитні — в електричних машинах високої напруги.

Поведінка ізоляційних матеріалів визначається вологою, температурою, механічними впливами та електричним старінням. Правильний вибір матеріалів і контроль їхнього стану — ключ до тривалої та безаварійної роботи енергетичного обладнання.

Опрацювання цих аспектів допоможе вивчити установки та методи перевірки високовольтних систем на надійність та довговічність.

Тема 8. Випробування високовольтних систем: установки та методи перевірки надійності

Характеристика змісту матеріалу, що є предметом самостійного опрацювання

Ця тема охоплює кілька ключових аспектів:

1. Визначення основних типів випробувань високовольтних систем, таких як випробування на напругу, імітаційні випробування (системи тестування на перенапруги) іспити на механічну міцність та довговічність.
2. Огляд різних типів випробувальних установок, використовуваних для перевірки високовольтних систем, зокрема трансформаторів, кабелів, ізоляторів і електричних машин. Визначення їхніх технічних характеристик і функціональних можливостей.
3. Опис методів вимірювання, що використовуються для контролю параметрів високовольтних систем, таких як напруга, струм, опір, та інші електричні характеристики.
4. Розгляд міжнародних стандартів і нормативів, які регулюють процедури випробувань високовольтних систем, таких як ІЕС, ІЕЕЕ, та інші.
5. Важливість дотримання заходів безпеки під час випробувань, а також використання захисних засобів і обладнання для запобігання небезпечним ситуаціям.
6. Методи аналізу і оцінки результатів випробувань для визначення надійності та ефективності високовольтних систем, а також виявлення можливих дефектів.
7. Оцінка довговічності ізоляційних матеріалів і компонентів систем у процесі тривалих випробувань, які можуть включати циклічні навантаження і впливи навколишнього середовища.

Опрацювання цих аспектів охоплює комплекс питань, пов'язаних із забезпеченням надійності, безпеки та довговічності електроенергетичного обладнання, яке працює під дією високих напруг.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Випробування високовольтних систем відіграють ключову роль у забезпеченні безпечної, надійної та довговічної роботи електроенергетичного обладнання. Всі елементи високовольтних мереж — трансформатори, кабелі, вимикачі, ізолятори, розподільчі пристрої, електричні машини та інші компоненти — повинні відповідати високим вимогам за електричними, механічними та термічними характеристиками.

Система високовольтних випробувань включає лабораторне і натурне тестування, застосування різноманітних випробувальних установок, використання міжнародних стандартів і суворе дотримання вимог безпеки.

1. Основні типи випробувань високовольтних систем

Випробування поділяються за призначенням та типом впливу на обладнання.

1.1. Випробування на електричну міцність

Передбачають подачу підвищеної напруги для оцінки здатності ізоляції витримувати робочі та аварійні режими:

- змінна напруга промислової частоти;
- постійна напруга;
- імпульсна грозова напруга (1,2/50 мкс);
- імпульсна комутаційна напруга (250/2500 мкс).

1.2. Імітаційні випробування на перенапруги

Включають:

- імітування грозових розрядів;
- моделювання комутаційних перенапруг;
- випробування на часткові розряди.

Ці методи дозволяють оцінити поведінку ізоляції в реальних екстремальних режимах.

1.3. Механічні випробування

Оцінюють стійкість обладнання до:

- вібрацій;
- ударних навантажень;
- розтягувальних сил (для ізоляторів і проводів);
- циклічного навантаження.

1.4. Теплові випробування

Перевіряють:

- нагрів та тепловідведення;
- стійкість ізоляції до тривалих температурних режимів;
- ефективність систем охолодження.

1.5. Довготривалі (ресурсні) випробування

Передбачають роботу обладнання під навантаженням тривалий час:

- випробування «старіння»;
- циклічні режими;
- вплив температури, вологості, електричних полів.

2. Випробувальні установки для високовольтних систем

Для проведення випробувань використовують спеціальні стенди та установки, здатні створювати напруги від сотень кіловольт до кількох мегавольт.

2.1. Трансформатори високої напруги

- Забезпечують напруги 100–1000 кВ і більше.
- Використовуються для випробування ізоляції трансформаторів, кабелів, апаратів.

2.2. Імпульсні генератори

Види:

- генератор грозових імпульсів (ГІН);
- генератор комутаційних імпульсів.

Параметри:

- напруги до 2–4 МВ;
- тривалість фронту 0,25–2 мкс.

2.3. Установки для випробування кабелів

- Резонансні установки (ВЧ резонансні системи);
- Установки для випробування постійною напругою;
- Обладнання для часткових розрядів.

2.4. Установки для ізоляторів

- Стенди для випробування на розтяг;
- Камери соляного туману;
- Стенди для імпульсних випробувань.

2.5. Установки для випробування електричних машин

- Теплові стенди;
- Вібраційні установки;
- Імпульсні тестові комплекси для ізоляції обмоток.

2.6. Кліматичні камери

Дозволяють моделювати:

- високу/низьку температуру;
- вологість;
- атмосферні умови;
- забруднення ізоляції.

3. Методи вимірювання параметрів високовольтних систем

3.1. Вимірювання напруги

- Електростатичні вольтметри;
- Подільники напруги (резистивні та ємнісні);
- Високовольтні пробники.

3.2. Вимірювання струму

- Трансформатори струму;
- Кліщові датчики;
- Оптичні вимірювачі струму (на принципі Фарадея).

3.3. Вимірювання опору ізоляції

Методи:

- мегомметри;
- вимірювання поляризаційного індексу;
- метод RVM (Recovery Voltage Method).

3.4. Вимірювання часткових розрядів

Дозволяють визначити:

- дефекти в ізоляції;
- локальне старіння;
- пробої провідників.

Проводяться за допомогою:

- високочастотних датчиків;
- УВЧ-датчиків;
- акустичних сенсорів.

3.5. Тепловізійні методи

Визначають перегрів кабелів, трансформаторів, контактних з'єднань.

4. Міжнародні стандарти та норми

Найбільш важливі стандарти, що регулюють випробування:

4.1. Стандарти ІЕС

- ІЕС 60060 — методи випробування високою напругою;
- ІЕС 60071 — координація ізоляції;
- ІЕС 60270 — часткові розряди;

- IEC 60383 — ізолятори для ПЛ;
- IEC 60502 — кабельні лінії;
- IEC 60076 — трансформатори.

4.2. Стандарти IEEE

- IEEE Std 4 — висока напруга та випробування;
- IEEE Std 48 — вводи;
- IEEE Std 400 — кабелі та часткові розряди.

4.3. Національні стандарти (ДСТУ)

Більшість адаптовані з IEC.

5. Заходи безпеки під час високовольтних випробувань

Безпека — ключовий аспект, оскільки високовольтні установки становлять загрозу життю.

5.1. Організаційні заходи

- допуск лише підготовленого персоналу;
- заборона працювати одному;
- використання систем блокування та сигналізації.

5.2. Електрозахисні засоби

- діелектричні штанги;
- рукавички;
- ізолювальні підставки;
- огороження робочої зони.

5.3. Заземлення

Усі переносні елементи повинні бути заземлені після випробувань для розряду ємності.

5.4. Безпечна дистанція

Визначається згідно зі стандартами, залежить від рівня напруги.

6. Методи аналізу та оцінки результатів випробувань

Після проведення тестів необхідно оцінити:

6.1. Відповідність стандартам

Порівняння фактичних значень із нормативними вимогами IEC та IEEE.

6.2. Поведінка ізоляції під навантаженням

Оцінюється:

- наявність часткових розрядів;
- опір ізоляції;
- рівень втрат.

6.3. Виявлення дефектів

Методи:

- УВЧ-діагностика;
- акустична емісія;
- тепловізія;
- хроматографічний аналіз газів в оливі (для трансформаторів).

6.4. Оцінка ресурсу обладнання

Передбачає прогнозування старіння:

- електричного;
- теплового;
- механічного;
- екологічного.

7. Оцінка довговічності ізоляційних матеріалів у процесі тривалих випробувань

7.1. Старіння ізоляції

Ізоляційні матеріали під дією:

- електричного поля;
- температури;
- вологи;
- механічних факторів старіють і втрачають міцність.

7.2. Циклічні навантаження

Включають:

- теплові цикли;
- електричні навантаження;
- механічні коливання.

7.3. Прискорені випробування

Проводяться для прогнозу довговічності:

- прискорене термічне старіння (на 200–300 годин);
- прискорене електричне старіння;
- випробування «вологе тепло».

7.4. Моделювання ресурсу

Методи:

- моделі Арреніуса;
- експоненціальні моделі деградації;
- комп'ютерні методи аналізу напружень.

Завдання

Підготувати відповіді на питання:

1. Напишіть короткий опис трьох основних типів випробувань, які проводяться на високовольтних системах. Які їх основні цілі та характеристики?
2. Проведіть аналіз двох різних типів випробувальних установок, що використовуються для перевірки високовольтних трансформаторів. Вкажіть їхні основні функції та принципи роботи.
3. Опишіть методи вимірювання, що використовуються для контролю електричних параметрів високовольтних систем. Які прилади застосовуються для цих вимірювань?
4. Припустимо, ви провели випробування високовольтного кабелю, і отримали дані про його напругу пробою та опір. Які висновки можна зробити на основі цих результатів щодо надійності кабелю?
5. Опишіть процедуру випробування на довговічність ізоляційних матеріалів у високовольтних системах. Які фактори слід враховувати при проведенні таких випробувань?

Питання для самоконтролю

1. Що таке випробування високовольтних систем, і які їх основні цілі?
2. Які основні типи випробувань проводять на високовольтних трансформаторах?
3. Які методи вимірювання використовуються для контролю параметрів високовольтних установок?
4. Назвіть три основні міжнародні стандарти, що регулюють випробування високовольтних систем, і коротко опишіть їх значення.
5. Які основні заходи безпеки потрібно дотримуватися під час проведення випробувань високовольтних систем?
6. Які фактори впливають на надійність ізоляційних матеріалів у високовольтних системах?
7. Які результати випробувань можуть вказувати на можливу несправність високовольтного кабелю?
8. Що таке випробування на довговічність, і чому воно важливе для високовольтних систем?

Висновки

Випробування високовольтних систем — це комплексний процес, що включає електричні, механічні, теплові та кліматичні тестування, а також аналіз результатів відповідно до міжнародних стандартів. Вони забезпечують високу надійність та довговічність обладнання, дозволяють виявляти дефекти на ранніх стадіях, прогнозувати ресурс та гарантувати безпечну роботу енергетичних систем.

Коректне проведення випробувань, застосування сучасних вимірювальних приладів, дотримання стандартів і правил безпеки є основою для надійної експлуатації високовольтного обладнання.

Рекомендовані джерела інформації

1. Техніка високих напруг: Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. Р. Проценко. Електронні текстові дані (1 файл: 8,95 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 345с.
2. Розрахунок втрат потужності на корону та гірлянд ізоляторів на високовольтних лініях електропередачі. Комплексна розрахункова робота : методичні вказівки з дисципліни «Техніка високих напруг» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укл. : О. О. Вакуленко. Тернопіль : ТНТУ, 2023. 36 с.
3. Бондаренко В.О. Конфігурації ліній електропередачі : навч. посібн. / В.О. Бондаренко, В.В. Черкашина. Харків : Вид-во «Факт», 2020. 174 с.
4. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика: навчальний посібник / Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А., Колісник М.А. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. 332 с.
5. Електропостачання : підручник / П. О. Василега. Суми : Сумський державний університет, 2019. 521 с.
6. Квітка С.О. Силові електронні пристрої в системах керування: навчальний посібник для здобувачів вищої освіти. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2021. 180 с.
7. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Схвалено Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. 145 р. [Електронний ресурс]. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/145-2006-%D1%80>
8. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 Норми випробування електрообладнання (нова редакція 2020 р.). Київ, 2020, 262 с.
9. International Energy Agency. – U.S. Energy Information Administration | International Energy Outlook 2021. 386 p. URL: <http://www.iea.org/weo>.