

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Касьян Даниїл Анатолійович

УДК 621.311.42

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування високовольтних випробувань з метою попередження
пошкодження обладнання електропідстанцій
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело

Касьян Д.А.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський Олег Феліксович
(прізвище, ім'я, по батькові)
к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Касьян Д. А. Обґрунтування високовольтних випробувань з метою попередження пошкодження обладнання електропідстанцій. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня Магістр за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

В даній кваліфікаційній роботі проведено аналіз високовольтних випробувань, досліджено їх вплив на термін служби ізоляції електричного обладнання підстанцій та визначено основні засоби високовольтних випробувань та їх ефективність по збереженню працездатності електрообладнання .

Ключові слова: Високовольтне випробування, ерозія, ізоляція, електрообладнання, напруга, дефект, аварійність.

ANOTATION

Kasyan D. A. Justification of high-voltage tests to prevent damage to electrical substation equipment. – Qualification work in the form of a manuscript. Qualification work for the degree of Master in specialty 141 “Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics”. – Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

This qualification work analyzes high-voltage tests, investigates their impact on the service life of electrical substation equipment insulation, and identifies the main means of high-voltage tests and their effectiveness in maintaining the operability of electrical equipment.

Keywords: High-voltage test, erosion, insulation, electrical equipment, voltage, defect, failure rate.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЯК ІНСТРУМЕНТУ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ІЗОЛЯЦІЇ	7
1.1 Дослідження видів високовольтних випробувань.	7
1.2 Характеристика дефектів ізоляції як першопричини високовольтних випробувань.	14
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ТЕРМІН СЛУЖБИ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	18
2.1. Аналіз механізмів впливу високовольтних випробувань на ізоляцію електрообладнання	18
2.2. Аналіз типів ізоляції та їх чутливості до зовнішніх впливів	25
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИПРОБУВАНЬ ТА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ ПО ЗБЕРЕЖЕННЮ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	28
3.1. Обґрунтування ефективності високовольтних випробувань з метою збереження працездатності електрообладнання	28
3.2. Аналіз наявних засобів високовольтних випробувань	32
3.3. Аналіз новітніх засобів високовольтних випробувань	36
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	42

Вступ

В даній дипломній роботі провів дослідження для обґрунтування високовольтних випробувань з метою попередження пошкодження обладнання електропідстанцій.

Актуальність теми – Електропідстанції є ключовими елементами енергетичної інфраструктури, що забезпечують стабільне постачання електроенергії споживачам. Надійність їхньої роботи значною мірою залежить від технічного стану обладнання, особливо високовольтної ізоляції. Пошкодження ізоляції часто стає причиною аварій, що призводить до перебоїв у електропостачанні та значних фінансових втрат. Саме тому своєчасне виявлення дефектів і попередження пошкоджень має вирішальне значення, що обумовлює актуальність проведення високовольтних випробувань.

Мета дослідження – обґрунтувати методи високовольтних випробувань як ефективний інструмент попередження пошкодження обладнання електропідстанцій.

Завдання дослідження:

1. Провести аналіз існуючих методів високовольтних випробувань.
2. Оцінити вплив високовольтних випробувань на стан ізоляції обладнання.
3. Обґрунтувати ефективність застосування високовольтних випробувань для підвищення надійності роботи електропідстанцій.
4. Дослідити інженерні рішення для оптимізації процесу високовольтних випробувань.

Об'єкт дослідження – ізоляційна система обладнання електропідстанцій, та устаткування для проведення високовольтних випробувань.

Предмет дослідження – вплив високовольтних випробувань на технічний стан ізоляції та їх ефективність у забезпеченні надійності обладнання.

Практичне значення полягає у підвищенні надійності функціонування електропідстанцій завдяки розробці оптимальних методик високовольтних випробувань, що дозволяють своєчасно виявляти та усувати дефекти ізоляції. Запропоновані інженерні рішення сприятимуть зменшенню ризиків аварійних ситуацій і підвищенню економічної ефективності експлуатації енергетичного обладнання.

У рамках дослідження буде проведено:

- **аналіз методів високовольтних випробувань** із акцентом на їх вплив на ізоляцію обладнання;
- **оцінка стану ізоляції після випробувань** для визначення їхньої безпечності;
- **обґрунтування ефективності випробувань**, зокрема їхньої ролі у зниженні ризиків пошкодження обладнання.

Це дослідження може стати основою для вдосконалення технологій діагностики та профілактики несправностей у енергетичному секторі, збільшення обізнаності в процесі високовольтних випробувань та їх впливу на стан ізоляції обладнання підстанцій.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

1. Касьян Д.А. «Дослідження та аналіз засобу високовольтних випробувань АІД-70». Збірник тез доповідей «Наукові читання – 2024» ПНУ м. Житомир. Житомир: Поліський національний університет, 2024.
2. Касьян Д.А. «Обґрунтування високовольтних випробувань як інструменту раннього виявлення дефектів ізоляції». Збірник тез доповідей «Наукові читання – 2024» ПНУ м. Житомир. Житомир: Поліський національний університет, 2024.

3. Касьян Д.А. «Аналіз впливу високовольтних випробувань на термін служби ізоляції електричного обладнання» Збірник тез доповідей «Наукові читання – 2024» ПНУ м. Житомир. Житомир: Поліський національний університет, 2024.

Обсяг та структура роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 44 сторінках машинописного тексту, містить 11 рисунків, списку використаних джерел з 30 найменування.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЯК ІНСТРУМЕНТУ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ІЗОЛЯЦІЇ

1.1 Дослідження видів високовольтних випробувань

Високовольтні випробування є невід'ємною частиною діагностики і моніторингу технічного стану електрообладнання. Вони спрямовані на виявлення дефектів ізоляції, оцінку її електричної міцності та стійкості до різних впливів. Розглянемо основні види високовольтних випробувань, їх призначення та особливості.

1. Випробування змінним струмом (АС)

Цей вид випробувань передбачає подачу високої напруги змінного струму на об'єкт для перевірки електричної міцності ізоляції. Змінний струм — електричний струм, сила та напрямок якого періодично змінюються з часом, його діаграма представлена на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – графічне зображення постійного та змінного струму.

Випробування високою напругою змінного струму (АС) є одним із ключових методів перевірки ізоляції електрообладнання, що широко застосовується для діагностики та контролю якості. Основною метою цих випробувань є перевірка електричної міцності ізоляції при дії напруги, близької до робочої або перевищуючої її [2].

Під час випробувань на об'єкт подається змінна напруга промислової частоти (зазвичай 50 або 60 Гц) або частота може бути змінена для специфічних випробувань. Напруга поступово підвищується до заданого рівня, який зазвичай перевищує робоче значення на 50-300%. Такий підхід дозволяє імітувати реальні умови роботи обладнання, забезпечуючи при цьому оцінку його надійності та стійкості до перевантажень.

Однією з важливих особливостей випробувань змінним струмом є їх здатність виявляти слабкі місця в ізоляції, такі як мікротріщини, дефекти у матеріалі, забруднення або вологість. У процесі випробувань ці недоліки можуть призводити до часткових розрядів, які стають сигналом для подальшого аналізу. Водночас часткові розряди можуть бути недоліком методу, оскільки вони спричиняють локальне старіння ізоляції[30].

Випробування АС є більш реалістичними у порівнянні з випробуваннями постійним струмом, оскільки більшість електричних мереж та обладнання працюють саме зі змінним струмом[18]. Це дозволяє моделювати умови експлуатації та оцінювати ефективність ізоляції в робочих режимах. Однак проведення таких випробувань вимагає значної потужності джерел живлення для створення високої напруги, що може бути технічно складним для великих об'єктів, наприклад, кабельних ліній великої довжини.

Особливу увагу при проведенні випробувань змінним струмом приділяють контролю параметрів напруги та струму. Напруга повинна залишатися стабільною протягом випробувань, а струм витоку через ізоляцію ретельно вимірюється[29]. Збільшення струму витоку може свідчити про деградацію ізоляційного матеріалу або про наявність дефектів.

Узагальнюючи, випробування змінним струмом є ефективним і широко застосовуваним методом діагностики, що дозволяє забезпечити високу якість та надійність електрообладнання. Проте для мінімізації ризиків старіння ізоляції внаслідок часткових розрядів та економії енергоресурсів слід ретельно планувати параметри випробувань та використовувати сучасне обладнання для їх проведення.

2. Випробування постійним струмом (DC)

Високовольтна напруга постійного струму застосовується для перевірки електричної міцності ізоляції. Постійний струм – це спрямований в один бік потік електричних зарядів, його графічне зображення наведено на рисунку 1.1.

Випробування високою напругою постійного струму (DC) є важливим методом діагностики ізоляційних систем електрообладнання, який широко використовується для оцінки довговічності та надійності. Основною метою такого випробування є визначення стійкості ізоляції до впливу високих напруг протягом тривалого часу, що дозволяє виявити дефекти, невидимі при звичайних робочих умовах.

При випробуванні постійним струмом на об'єкт подається висока напруга, яка поступово збільшується до певного значення, що перевищує номінальну робочу напругу[22]. Об'єкт піддається такому навантаженню протягом заданого часу, зазвичай від кількох хвилин до кількох годин, залежно від цілей випробування та стандартів.

Під час випробувань вимірюється струм витоку, який є ключовим параметром для оцінки стану ізоляції. Збільшення струму витоку може свідчити про наявність дефектів, таких як мікротріщини, пробої або інші пошкодження ізоляційного матеріалу. Особливістю випробувань постійним струмом є їх менший вплив на старіння ізоляції порівняно зі змінним струмом[7]. Це пов'язано з тим, що відсутність змінних електричних полів знижує ймовірність виникнення часткових розрядів, які є основним фактором деградації ізоляції. Завдяки цьому випробування DC часто використовуються для чутливих систем, таких як кабелі великої довжини або обладнання зі складною ізоляційною структурою.

Метод випробувань постійним струмом має ще одну важливу перевагу – він дозволяє виявляти локальні дефекти, що залишаються непомітними при змінному струмі. Це пояснюється тим, що напруга постійного струму створює постійний електричний стрес, який підкреслює слабкі місця в ізоляції[30]. Однак слід враховувати, що результати таких випробувань можуть не повністю відповідати реальним умовам експлуатації обладнання, оскільки в більшості випадків воно працює зі змінною напругою.



Рисунок 1.2 – «АІД-70 обладнання для високовольтних випробувань змінного та постійного струму»

Для проведення випробувань постійним струмом використовуються спеціалізовані джерела високої напруги, які забезпечують стабільність параметрів випробувань, до прикладу АІД-70 який зображено на рисунку 1.2 – «АІД-70 обладнання для високовольтних випробувань змінного та постійного струму». Важливою умовою є забезпечення високого рівня ізоляції самого обладнання для випробувань, оскільки навіть незначні витoki струму можуть спотворити результати[13].

Важливо також зазначити, що після проведення випробувань постійним струмом іноді спостерігається залишкова зарядженість ізоляції, що потребує додаткових заходів з розрядки, щоб уникнути небезпеки для персоналу та обладнання.

Таким чином, випробування постійним струмом є ефективним інструментом для діагностики ізоляційних систем, який забезпечує високу точність у виявленні дефектів[6]. Однак для отримання повної картини стану обладнання їх часто комбiнують із випробуваннями змінним струмом та іншими методами, щоб врахувати всі аспекти роботи ізоляції в реальних умовах.

3. Імпульсні випробування

Використовуються для перевірки стійкості ізоляції до короткочасних перенапруг (грозових або комутаційних). Імпульсні випробування є ключовим методом оцінки стійкості ізоляційних систем електрообладнання до короткочасних перенапруг, які можуть виникати внаслідок грозових явищ, комутаційних процесів або інших аномалій в електричних мережах[25]. Метою таких випробувань є перевірка здатності ізоляції витримувати високовольтні імпульси без руйнування, що гарантує її надійність у реальних умовах експлуатації.

Під час імпульсних випробувань на ізоляцію подається високовольтний імпульс із заданими параметрами. Найбільш поширеними є два види імпульсів: грозові (наприклад, хвиля 1,2/50 мкс, де 1,2 мкс – час фронту, а 50 мкс – час спаду до половини амплітуди) та комутаційні (хвиля 250/2500 мкс), вони зображені на рисунку 1.3[16]. Грозові імпульси моделюють вплив блискавки, а комутаційні – вплив перенапруг, викликаних перемиканням у мережі. Такі хвилі створюються спеціальними генераторами імпульсів, які забезпечують стабільність параметрів та контроль їх форми.

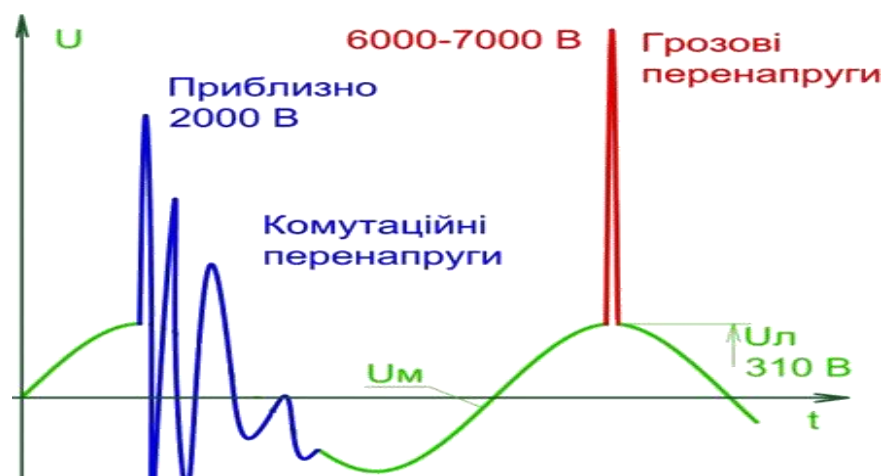


Рисунок 1.3 – Грозові та комутаційні перенапруги

Важливою особливістю імпульсних випробувань є їхня здатність точно імітувати умови, що виникають під час перенапруг у мережах, що робить їх незамінними для випробувань трансформаторів, кабелів, вимикачів, ізоляторів та інших елементів енергетичної інфраструктури[29]. Зазвичай під час випробувань об'єкт піддається серії імпульсів, кожен з яких характеризується чітко визначеним піковим значенням напруги. Це дозволяє перевірити стійкість ізоляції при різних рівнях перенапруг.

Контроль результатів випробувань здійснюється шляхом аналізу електричних сигналів, що виникають у системі у відповідь на імпульс. Одним із важливих критеріїв є відсутність пробую або аномального струму витоку[10].

Пробій ізоляції при заданій напрузі сигналізує про її неспроможність витримувати імпульсні навантаження, що може свідчити про дефекти у матеріалі, деградацію або невідповідність конструкції.

Проведення імпульсних випробувань вимагає використання спеціального обладнання, такого як генератори імпульсів, системи вимірювання високовольтних сигналів і аналізатори хвиль. Важливим аспектом є забезпечення безпеки персоналу, оскільки напруги, що застосовуються, можуть бути надзвичайно високими (до тисяч кіловольт і більше)[19]. Тестування зазвичай проводиться у лабораторних умовах або у спеціально обладнаних випробувальних установках, де можливо забезпечити необхідні заходи безпеки.

Перевагою імпульсних випробувань є їх висока інформативність і здатність виявляти дефекти, які проявляються лише під час короточасних перевантажень тому імпульсні випробування є невід'ємною частиною діагностики електрообладнання, що дозволяє перевірити його стійкість до аварійних режимів та гарантувати безпечну і надійну роботу в енергосистемі. Цей метод є особливо важливим для обладнання електростанцій, що експлуатується в умовах підвищеного ризику грозових і комутаційних перенапруг[28].

4. Частотні випробування

Проводяться за допомогою змінного струму із частотою, що відрізняється від стандартної[4]. Дослідження впливу низькочастотних (до 0,1 Гц) або високочастотних сигналів на ізоляцію – низькочастотні випробування дозволяють зменшити споживання енергії, високочастотні методи використовуються для аналізу специфічних видів ізоляції (наприклад, для трансформаторів).

5. Прискорені випробування старіння

Проводяться для оцінки довговічності ізоляційних матеріалів шляхом впливу екстремальних умов сукупності чинників (температура, вологість, перенапруги).

- **Мета:** прогнозування ресурсу роботи ізоляції.
- **Особливості:** Експозиція високої напруги та температури протягом визначеного часу. Використовуються для визначення надійності ізоляційних систем у тривалому періоді, зазвичай проводяться заводом виробником для прогнозування ресурсу обладнання підстанцій[16].

1.2 Характеристика дефектів ізоляції як першопричини високовольтних випробувань.

Дефекти ізоляції є однією з основних причин порушення роботи електрообладнання, що може призводити до аварій, перебоїв в енергопостачанні та значних фінансових втрат. Для ефективної діагностики та профілактики необхідно розуміти природу цих дефектів, які класифікуються за походженням, типом та характером впливу[20].

1. За походженням дефекти можна характеризувати на:

- Вроджені дефекти виникають на етапі виробництва ізоляційного матеріалу або обладнання. Вони можуть бути пов'язані з нерівномірністю товщини ізоляції, наявністю сторонніх включень, пористістю або іншими недоліками технологічного процесу. Такі дефекти часто залишаються непомітними на ранніх етапах, але з часом можуть стати причиною пробою.

- Експлуатаційні дефекти утворюються під час використання обладнання. Вони викликані впливом робочих умов, таких як електричне, теплове або механічне навантаження, а також старінням матеріалів.
- Випадкові пошкодження виникають через зовнішні фактори: механічні удари, вплив вологи, забруднення або аварії.

2. За типом дефекту можна виділити:

- Механічні дефекти: до них належать тріщини, проколи, порізи та інші пошкодження, спричинені зовнішнім впливом або надмірними механічними навантаженнями, приклад наведено на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Приклад механічного дефекту ізоляції струмовідних частин.

- Електричні дефекти: такі як пробої, локалізовані нагрівання та часткові розряди, які виникають через перевищення допустимих електричних параметрів.
- Хімічні дефекти: включають деградацію матеріалу ізоляції під дією хімічних речовин, корозію або вологу, яка проникає всередину матеріалу.
- Теплові дефекти: виникають через перегрів, який спричиняє старіння або руйнування ізоляційного матеріалу, приклад наведено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Дефект ізоляції в наслідок дії високих температур

3. За характером впливу на ізоляцію дефекти поділяють на:

- Локальні дефекти: невеликі пошкодження, які можуть бути непомітними при поверхневій діагностиці, але є небезпечними через можливість поширення або перетворення на пробій.
- Системні дефекти: мають більш глобальний характер, наприклад, рівномірне старіння ізоляції по всій її площі або значне зниження механічної міцності матеріалу.

4. Особливі види дефектів

- Часткові розряди: мікроскопічні електричні пробої в ізоляції, які не проходять через весь матеріал, але викликають його поступове руйнування. Це один із найбільш поширених та небезпечних дефектів.
- Вологість та забруднення: проникнення вологи або накопичення пилу на поверхні ізоляції знижує її електричну міцність і може стати причиною струмів витоку та пробіїв.

Наявність дефектів ізоляції призводить до зниження її електричної міцності, підвищення струмів витoku та збільшення ймовірності повного пробою[8]. Часткові розряди стають сигналом про початок деградації ізоляції, тоді як тривала дія теплових або електричних навантажень прискорює процес старіння.

Висновок до першого розділу

Кожен вид випробувань має свою сферу застосування, переваги та обмеження. Їхнє комплексне використання дозволяє забезпечити високу точність виявлення дефектів електрообладнання, в той же час класифікація дефектів ізоляції дозволяє ефективніше розробляти методи їх виявлення, діагностування та профілактики[11]. Знання типу та характеру дефекту допомагає у виборі відповідних високовольтних випробувань та забезпечує надійну роботу електрообладнання.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИПРОБУВАНЬ НА ТЕРМІН СЛУЖБИ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

2.1 Аналіз механізмів впливу високовольтних випробувань на ізоляцію електрообладнання.

Високовольтні випробування є важливим етапом оцінки стану ізоляції електричного обладнання, однак їх вплив на термін служби ізоляційних матеріалів є складним і багатограним. З одного боку, такі випробування дозволяють виявити потенційні дефекти, що допомагає уникнути аварійних ситуацій, а з іншого — при неправильному підході вони можуть призводити до додаткового зношування ізоляції.

Вплив високовольтних випробувань на ізоляцію електрообладнання визначається фізичними процесами, що відбуваються під дією електричних полів високої напруги. Розглянемо основні механізми, які можуть впливати на ізоляційні матеріали[1]:

1. Електричний пробій – є одним із ключових механізмів, які впливають на ізоляцію електрообладнання під час високовольтних випробувань.

Цей процес виникає, коли напруга, що подається на ізоляцію, перевищує її критичний рівень міцності, внаслідок чого ізоляційний матеріал перестає виконувати свої діелектричні функції і стає провідником струму.

Механізм електричного пробою залежить від кількох факторів. По-перше, важливу роль відіграє величина прикладеної напруги. Якщо напруга перевищує рівень електричної міцності матеріалу, в ізоляції починають виникати часткові розряди[30]. Ці локалізовані розряди можуть поступово руйнувати структуру матеріалу, особливо в місцях із високою неоднорідністю,

таких як повітряні включення, мікротріщини або зони з підвищеною вологістю, приклад пробою керамічного ізолятора наведено на рисунку 2.1, пробій відбувся в місці постійної концентрації вологи, та місцях де були наявні незначні дефекти ще з виробництва ізолятора.



Рисунок 2.1 – « Електричний пробій ізолятора»

По-друге, тривалість впливу високої напруги також суттєво впливає на розвиток пробою. Навіть якщо напруга трохи перевищує межу електричної міцності, тривале випробування може призвести до накопичення тепла і поступового руйнування матеріалу[17]. Це явище характерне для термічного пробою, коли висока температура спричиняє плавлення або розшарування ізоляції.

Пробій може також розвиватися внаслідок електромеханічних процесів. Під дією сильного електричного поля в ізоляції виникають сили, які можуть спричинити механічні напруження і тріщини, особливо в багат шарових системах. Такі пошкодження послаблюють здатність ізоляції витримувати подальші впливи високої напруги.

Важливо зазначити, що електричний пробій не лише руйнує ізоляцію, але й може спричинити серйозні аварії в електрообладнанні, зокрема короткі замикання, пожежі або навіть вибухи. Тому високовольтні випробування, які імітують екстремальні умови експлуатації, проводяться з метою виявлення слабких місць ізоляції та оцінки її залишкової міцності.

2. Часткові розряди є одним із найбільш важливих механізмів впливу на ізоляцію електрообладнання під час високовольтних випробувань.

Вони виникають у місцях із локальними неоднорідностями в ізоляційному матеріалі, таких як повітряні включення, тріщини, мікропорожнини або зони підвищеної вологості. Ці розряди не проходять через всю товщину ізоляції, а локалізуються в певних ділянках, але при цьому можуть значно погіршувати її стан.

Механізм часткових розрядів полягає у створенні локального електричного пробію в слабких точках ізоляції, де електричне поле перевищує критичну напругу. У таких умовах відбувається іонізація молекул у порожнинах чи включеннях, що супроводжується короткочасними імпульсами струму[12]. Ці імпульси створюють локальне теплове та механічне навантаження, яке з часом призводить до деградації матеріалу.

Електромеханічний вплив часткових розрядів також має значення. Виникнення розряду супроводжується акустичними хвилями та локальними вібраціями, які можуть викликати мікротріщини у матеріалі. Ці тріщини поступово розширюються, сприяючи подальшому розвитку часткових розрядів і створюючи умови для повного пробію, приклад пробію в наслідок дії часткових розрядів зображено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – «Руйнування ізоляції електрообладнання в наслідок впливу часткових розрядів»

Високовольтні випробування створюють умови, за яких часткові розряди проявляються особливо інтенсивно. Це дозволяє їх виявити і оцінити рівень деградації ізоляції. Для цього використовуються спеціальні методи діагностики, такі як вимірювання електричних імпульсів, акустичних сигналів або радіочастотного випромінювання, які генеруються під час часткових розрядів[24]. Завдяки цим методам можна ідентифікувати зони з дефектами і визначити необхідність ремонту чи заміни ізоляції.

Таким чином, часткові розряди відіграють подвійну роль. З одного боку, вони є серйозною загрозою для довговічності ізоляції, з іншого — виступають індикатором її стану, дозволяючи вчасно виявляти проблеми і проводити профілактичні заходи. Контроль і моніторинг часткових розрядів є важливим компонентом забезпечення надійної роботи електрообладнання.

3. Тепловий ефект є одним з механізмів впливу на ізоляцію електрообладнання під час високовольтних випробувань.

Він виникає через діелектричні втрати в ізоляційному матеріалі, які перетворюються на тепло під дією високої напруги. Це тепло може мати значний вплив на стан ізоляції, сприяючи її деградації та скороченню терміну служби.

Під час випробувань на ізоляцію діє електричне поле, яке викликає зміщення молекул і диполів у матеріалі. Це призводить до появи внутрішніх струмів у діелектрику, які через опір ізоляції спричиняють виділення тепла. Якщо напруга є високою, а ізоляція має дефекти чи нерівномірну структуру, тепловий ефект може стати значним і спричинити локальний перегрів матеріалу.

Перегрів небезпечний для багатьох видів ізоляційних матеріалів. У полімерних і паперових ізоляторах тривала дія підвищеної температури викликає хімічну деградацію, наприклад, окислення або розпад молекулярних зв'язків. Це призводить до втрати еластичності, зниження електричної міцності та утворення мікротріщин. Утворення вуглецевих доріжок є ще одним негативним наслідком, який створює потенційні струмопровідні шляхи.

Тепловий ефект також може викликати розшарування багат шарових ізоляційних систем, оскільки різні матеріали в складі таких систем мають різні коефіцієнти теплового розширення. Нерівномірне нагрівання може призвести до появи механічних напружень, що сприяють утворенню тріщин і розривів у шарі ізоляції.

Високовольтні випробування можуть посилювати ці явища, особливо якщо тестування проводиться тривалий час або з перевищенням допустимих рівнів напруги.

У таких умовах тепловий ефект може призводити до лавиноподібного пошкодження матеріалу, коли перегрів у одній зоні сприяє поширенню деградації на інші ділянки.

4. Хімічна деградація важливий механізм впливу на ізоляцію електрообладнання під час високовольтних випробувань.

Вона виникає внаслідок фізико-хімічних процесів, що активізуються під дією електричних полів, високої напруги, температурних ефектів і часткових розрядів. Цей механізм особливо небезпечний, оскільки він спричиняє незворотні зміни в структурі матеріалів.

Під час високовольтних випробувань у матеріалі ізоляції можуть утворюватися активні хімічні сполуки, зокрема іони, радикали та озон. Ці речовини реагують з молекулами ізоляції, викликаючи їх розрив і формування нових структур із гіршими діелектричними властивостями[27]. Наприклад, у полімерних матеріалах можуть утворюватися вуглецеві домішки, які знижують електричну міцність і сприяють пробою.

Волога, яка проникає в ізоляцію, також відіграє важливу роль у хімічній деградації. Під дією високої напруги вода розкладається на кисень і водень, що можуть утворювати агресивні сполуки, такі як кислоти. Це особливо критично для паперово-масляної ізоляції, де утворення кислот значно прискорює старіння матеріалу.

Іонізаційні процеси, викликані частковими розрядами, також сприяють хімічній деградації. Іонізовані молекули та атоми вступають у реакції з матеріалом ізоляції, утворюючи слабкі місця у структурі. У результаті зростає ймовірність електричного пробою в таких зонах.

Хімічна деградація супроводжується зміною фізичних властивостей ізоляції. Матеріал втрачає еластичність, зменшується його стійкість до механічних навантажень і впливу температури. У багатьох випадках це призводить до утворення тріщин, розшарування або руйнування матеріалу.

Хоча високовольтні випробування необхідні для виявлення дефектів ізоляції, вони можуть самі сприяти хімічній деградації, якщо виконуються неправильно або занадто інтенсивно[20]. Тому під час тестування важливо контролювати умови, щоб мінімізувати цей вплив і продовжити термін служби електрообладнання.

5. Електрична ерозія — це поступове руйнування поверхні або структури ізоляційного матеріалу через тривалий вплив електричних полів або електричних розрядів [1].

Чинники виникнення електричної ерозії включають вологість, механічні дефекти та забруднення поверхні ізоляції. Вологість значно знижує електричну міцність ізоляції, оскільки вода є провідником струму і може утворювати електрохімічно активні зони. Забруднення, наприклад пил або солі, створює нерівномірний розподіл електричного поля, що сприяє виникненню локальних точок нагріву і розрядів.

Матеріал ізоляції також відіграє важливу роль у схильності до ерозії. Органічні ізоляційні матеріали, такі як папір або полімери, більш чутливі до теплового і хімічного руйнування. Неоднорідності у структурі, наявність домішок або включень можуть слугувати каталізаторами ерозії. Тривалість і частота впливу високовольтних випробувань також є важливими чинниками[20]. Повторні тестування або випробування за підвищеної напруги можуть прискорювати процес ерозії, особливо якщо не дотримано регламенту часу тестування чи перевищено допустимі параметри.

2.2 Аналіз типів ізоляції та їх чутливості до зовнішніх впливів

Різні типи ізоляційних матеріалів мають різну чутливість до зовнішніх впливів, зокрема до високовольтних випробувань. Ця чутливість залежить від фізико-хімічних властивостей матеріалів, їхньої структури та умов експлуатації. Розуміння особливостей кожного типу ізоляції дозволяє краще оцінювати ризики та адаптувати методи випробувань.

Паперово-масляна ізоляція є традиційним типом, що широко використовується в трансформаторах та іншому силовому обладнанні. Вона складається з електротехнічного паперу, просоченого трансформаторним маслом, яке виконує роль діелектрика та охолоджувача, приклад такої ізоляції наведено на рисунку 2.3. Паперово-масляна ізоляція чутлива до вологості та теплових навантажень, оскільки волога значно знижує її діелектричну міцність і прискорює процес старіння. Високовольтні випробування можуть викликати часткові розряди у мікропорожнинах, утворених через втрату однорідності паперу або деградацію масла[3].



Рисунок 2.3 – «Трансформатор ТМ-10кВА»

1 – керамічна ізоляція, 2 – Паперово-масляна ізоляція

Полімерна ізоляція, зокрема ізоляція на основі поліетилену (PE) та зшитого поліетилену (XLPE), використовується в кабелях і високовольтних пристроях завдяки її високій діелектричній міцності та термостійкості. Полімери чутливі до термічного та хімічного впливу, який може виникати під час високовольтних випробувань[9]. Наприклад, перегрів може викликати утворення тріщин або зміну молекулярної структури, а часткові розряди можуть утворювати струмопровідні доріжки, зменшуючи ізоляційні властивості.

Керамічна та скляна ізоляція є типовими для зовнішніх високовольтних ліній. Ці матеріали мають високу термостійкість і стійкість до хімічного впливу, але їхня чутливість до механічних дефектів значно підвищена. У тріщинах або нерівностях поверхні можуть виникати локальні концентратори електричного поля, які провокують часткові розряди. Високовольтні випробування на таких ізоляторах можуть виявити мікропошкодження, які не помітні візуально.

Гума та еластomers широко використовуються для ізоляції в пристроях із середньою та низькою напругою. Ці матеріали відзначаються гнучкістю і стійкістю до механічних навантажень, але вони чутливі до високих температур і впливу озону, які виникають під час розрядів. Випробування можуть викликати локальне плавлення або розкладання гуми, що знижує її довговічність.

Комбіновані ізоляційні матеріали, такі як епоксидні композити, використовуються в силових трансформаторах і вимикачах. Вони мають високу механічну міцність і хороші діелектричні властивості, але схильні до деградації під впливом часткових розрядів і теплових циклів[15]. У багатошарових структурах можливе розшарування через різницю у коефіцієнтах термічного розширення компонентів.

Усі типи ізоляцій мають свою специфіку чутливості до високовольтних випробувань. Паперово-масляні системи найбільш вразливі до вологи, полімери — до тепла і часткових розрядів, а кераміка і скло — до механічних дефектів.

Висновок до другого розділу

Аналіз механізмів впливу високовольтних випробувань на ізоляцію електрообладнання свідчить про те, що ці випробування відіграють як позитивну, так і потенційно негативну роль у функціонуванні та довговічності ізоляційних матеріалів.

Високовольтні випробування дозволяють виявити дефекти, оцінити стан ізоляції та запобігти аварійним ситуаціям. З іншого боку, висока напруга, застосована під час тестування, може спричиняти додаткове зношування ізоляції через електричний пробій, часткові розряди, теплову деградацію та хімічну ерозію. Однак при дотриманні методик і стандартів проведення високовольтних випробувань їхній негативний вплив можна мінімізувати, водночас зберігаючи можливість точної діагностики.

Слід зауважити що при виборі методу випробувань працівники повинні враховувати особливості для кожного типу ізоляції, щоб мінімізувати ризик деградації матеріалів і зберегти їхню працездатність[24].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИПРОБУВАНЬ ТА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ ПО ЗБЕРЕЖЕННЮ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

1.1 Обґрунтування ефективності високовольтних випробувань з метою збереження працездатності електрообладнання

Ефективність високовольтних випробувань можна оцінити через їх здатність виявляти дефекти в ізоляції та конструктивних елементах електрообладнання, які можуть призвести до аварійних ситуацій. Обґрунтування ефективності базується на аналізі ймовірності виникнення дефектів, економічної доцільності запобігання аварій та технічних результатах випробувань.

Перш за все, визначимо ймовірність виникнення дефектів. Згідно інформації з відкритих джерел, за статистикою у вибірці обладнання що експлуатується більше 20 років кількість потенційно дефектних одиниць в середньому становить $P_{\text{деф}} = 0.08$ (8%), така вибірка взята з урахуванням того що на підстанціях близько 80% обладнання яке відпрацювало 20 і більше років. Якщо не проводити випробувань, ймовірність виходу з ладу такого обладнання залишиться високою. Високовольтні випробування дозволяють виявити до 95% дефектів[30], тобто коефіцієнт виявлення становить $E_{\text{вияв.деф}} = 0.95$. Отже, ймовірність того, що дефект залишиться невиявленим, вирахуємо за формулою 3.1:

$$P_{\text{деф.невияв}} = P_{\text{деф}} \times (1 - E_{\text{вияв.деф}}) \quad (3.1)$$

Де $P_{\text{деф.невияв}}$ – ймовірність того, що дефект залишиться невиявленим.

$P_{\text{деф}}$ – кількість потенційно дефектних одиниць обладнання.

$E_{\text{вияв.деф}}$ – коефіцієнт виявлення дефектів становить.

$$P_{\text{деф.невияв}} = 0.08 \times 0.05 = 0.004 \text{ (0.4\%)}$$

Запобігання аваріям також можна оцінити через вартість усунення потенційних наслідків.

Середня вартість ремонту електрообладнання після аварії з дефектним обладнанням становить 1,2 млн грн, тоді як вартість одного високовольтного випробування рівна близько 24258 тис. грн[30].

Якщо протягом року в експлуатації знаходиться 158 одиниць обладнання, витрати на випробування можна вирахувати за формулою 3.2.

$$C_{\text{витр.випроб}} = P_{\text{екс.обл}} \times C_{\text{цвв}} \quad (3.2)$$

Де $C_{\text{витр.випроб}}$ – Загальні витрати на випробування.

$P_{\text{екс.обл}}$ – кількість одениць обладнання що знаходиться в експлуатації протягом одного року.

$C_{\text{цвв}}$ – середня ціна одного високовольтного випробування.

$$C_{\text{витр.випроб}} = 158 \times 24258 = 3\,832\,764 \text{ грн}$$

У разі нехтування випробуваннями ймовірність аварій становить $P_{\text{деф}} = 0.08$ (8%), тоді очікувана вартість ремонтів зможемо вирахувати за формулою 3.3

$$C_{\text{рембезВВ}} = P_{\text{екс.обл}} \times P_{\text{деф}} \times C_{\text{авар.рем}} \quad (3.3)$$

Де $C_{\text{рембезВВ}}$ – витрати на ремонт без проведення високовольтних випробувань.

$C_{\text{авар.рем}}$ – середня ціна ремонту після аварії з дефектним обладнанням.

$$C_{\text{рембезВВ}} = 158 \times 0.08 \times 1\,200\,000 = 15\,168\,000 \text{ грн}$$

Проведення випробувань знижує ймовірність аварій до 0.004, проведем розрахунок вартості ремонту з застосуванням високовольтних випробувань за формулою 3.4.

$$C_{\text{ремзВВ}} = P_{\text{екс.обл}} \times P_{\text{деф.невияв}} \times C_{\text{авар.рем}} \quad (3.4)$$

Де $C_{\text{ремзВВ}}$ – витрати на ремонт за умови проведення високовольтних випробувань.

$$C_{\text{ремзВВ}} = 158 \times 0.004 \times 1\,200\,000 = 758\,400 \text{ грн}$$

Виразуємо сумарні витрати при випробуваннях за формулою 3.5

$$C_{\text{сумВВ}} = C_{\text{ремзВВ}} + C_{\text{випр.випроб}} \quad (3.5)$$

Де $C_{\text{сумВВ}}$ – сумарні витрати при випробуваннях, які включають витрати на випробування та витрати на ремонт за умови проведення високовольтних випробувань.

$$C_{\text{сумВВ}} = 758\,400 + 3\,832\,764 = 4\,591\,164 \text{ грн.}$$

Порівнявши $C_{\text{сумВВ}}$ – сумарні витрати при випробуваннях та $C_{\text{рембезВВ}}$ – витрати на ремонт без проведення високовольтних випробувань, можна дійти висновку що проведення високовольтних випробувань зменшить витрати в 3.3 рази.

Також слід врахувати що реальна економія виражається у збереженні працездатності системи, зниженні ймовірності аварій та додаткових втрат, таких як простій обладнання, штрафи за ненадійність системи, репутаційні ризики тощо. Більше того, випробування продовжують строк експлуатації обладнання за рахунок раннього виявлення дефектів.

Високовольтні випробування відіграють важливу роль у продовженні терміну експлуатації електрообладнання. Цей вплив базується на виявленні ранніх стадій дефектів в ізоляції, що дозволяє вчасно виконувати профілактичні заходи, уникати аварій та оптимізувати графіки технічного обслуговування.

Для оцінки впливу високовольтних випробувань на продовження терміну експлуатації можна використовувати модифіковану формулу залишкового ресурсу (3.6):

$$T_{\text{зал.рес}} = T_{\text{база}} + \Delta T \quad (3.6)$$

де:

$T_{\text{зал.рес}}$ - загальний термін експлуатації обладнання після проведення високовольтних випробувань, років;

$T_{\text{база}}$ - стандартний термін експлуатації обладнання без випробувань, років;

ΔT - додатковий термін експлуатації завдяки своєчасному виявленню та усуненню дефектів.

Оцінка параметра ΔT

Параметр ΔT залежить від:

1. Частоти проведення випробувань $f_{\text{вв}}$, раз на рік.
2. Імовірності виявлення дефекту під час одного випробування $E_{\text{вияв.деф}}$.
3. Коефіцієнта зниження зношування обладнання $K_{\text{знош}}$ через зменшення впливу дефектів.

Тоді формула для розрахунку ΔT (3.7):

$$\Delta T = T_{\text{база}} \times K_{\text{знош}} \times (1 - P_{\text{деф.невиявfvv}}) \quad (3.7)$$

де:

$P_{\text{деф.невиявfvv}}$ — ймовірність залишку невиявлених дефектів після $f_{\text{вв}}$ випробувань.

Ймовірність залишку невиявлених дефектів після $f_{\text{вв}}$ випробувань зможемо знайти за формулою (3.8).

$$P_{\text{деф.невиявfvv}} = (1 - E_{\text{вияв.деф}})^{f_{\text{вв}}} \quad (3.8)$$

Згідно нормативних документів базовий термін служби трансформатора складає $T_{\text{база}} = 25$ років, частота випробувань $f_{\text{вв}} = 1/3$ – 1 раз на 3 роки, імовірність виявлення дефекту за допомогою високовольтного випробування $E_{\text{вияв.деф}} = 0,95$, $K_{\text{знош}} = 0,2$ (20% зменшення зношування завдяки виявленню дефектів)[30].

Розрахуємо $P_{\text{деф.невиявfvv}}$:

$$P_{\text{деф.невиявfvv}} = (1 - 0,95)^{1/3} = 0,37$$

Розрахуємо $P_{\text{деф.невиявfvv}}$:

$$\Delta T = 25 \times 0,2 \times (1 - 0,37) = 3,15 \text{ років.}$$

Розрахуємо загальний термін експлуатації обладнання після випробувань:

$$T_{\text{зал.рес}} = 25 + 3,15 = 28,15 \text{ років.}$$

У свою чергу загальний термін експлуатації обладнання після випробувань 28,15 років це 112,6% від базового терміну експлуатації.

Розрахунки показують, що регулярні високовольтні випробування можуть продовжити термін експлуатації обладнання в середньому на 12,6%, залежно від початкових умов. Це дозволяє зменшити витрати на придбання нового обладнання та забезпечує більшу стабільність роботи електромережі.

1.2 Аналіз наявних засобів високовольтних випробувань

АїД-70 є переносною високовольтною випробувальною установкою, яка використовується для перевірки стану ізоляції різноманітного електрообладнання, такого як кабелі, трансформатори, вимикачі та електричні машини. Цей пристрій дозволяє проводити високовольтні випробування як у лабораторних, так і в польових умовах, зокрема на підстанціях.

Основним завданням АІД-70 є перевірка електричної міцності ізоляції, яка здійснюється шляхом подачі високої напруги на випробуване обладнання. Це дозволяє визначити його здатність витримувати робочі напруги без пробою та виявити можливі дефекти. Установка також використовується для оцінки залишкового ресурсу електрообладнання, пошуку пошкоджень у кабельних лініях та підтвердження якості монтажу чи ремонту після проведених робіт.

Принцип роботи АІД-70 заснований на генеруванні змінної високої напруги, яка подається на ізоляцію випробуваного об'єкта[7]. Якщо ізоляція не руйнується під час впливу заданої напруги, це свідчить про її належний стан. Плавне регулювання напруги забезпечує точний контроль процесу випробувань і мінімізує ризик пошкодження ізоляції через раптовий пробій.

АІД-70 складається з декількох основних компонентів. Пульт керування дозволяє задавати параметри випробувань, контролювати рівень напруги та час впливу, а також відображає струм витoku через ізоляцію. Пульт керування зображено на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Пульт керування АІД 70.

1 – Міліамперметр контролю витоку струму через ізоляцію, 2 – кіловольтметр, 3 – ключ режиму роботи напруги, 4 – кнопка подачі напруги, 5 – регулятор напруги, 6 – перемикач шкали для міліамперметра, 7 – кнопка включення в схему міліамперметра, 8 – перемикач режиму випробування.

Високовольтна установка містить трансформатор, який генерує високу напругу, та оснащена захисними системами для запобігання аварійним ситуаціям, таким як перенапруга або перегрів. Обов'язковим елементом є заземлюючий ніж, який гарантує безпеку оператора та захист обладнання від небезпечних потенціалів. У комплект також входять високовольтні кабелі, які забезпечують підключення установки до випробуваного об'єкта. Високовольтна установка зображена на рисунку 3.2, та на рисунку 3.3 зображено зібрану та готову до випробувань випробувальну установку АІД 70.



Рисунок 3.2 – Високовольтна установка.

За допомогою АІД-70 можна виконувати широкий спектр робіт. Зокрема, це високовольтне випробування кабельних ліній, перевірка ізоляції силових і вимірювальних трансформаторів, діагностика ізоляції електродвигунів і генераторів, а також виявлення пошкоджень у високовольтних вимикачах і роз'єднувачах[23]. Установка застосовується для оцінки стану обладнання після монтажу, ремонту чи експлуатації, а також для перевірки якості нових елементів перед введенням їх в експлуатацію.



Рисунок 3.3 – Випробувальна установка АІД-70 в зборі та готова до проведення випробувальних робіт.

1 – Пульт керування, 2 – Високовольтна частина, 3 – високовольтний кабель, 4 – заземляючі ніж та високовольтний вивід, 5 – заземлення пульта та високовольтної частини, 6 – Вилка живлення 220В.

Серед переваг АІД-70 слід відзначити мобільність і компактність, що дозволяє використовувати його на об'єктах із обмеженим доступом, наприклад, на підстанціях або в польових умовах. Універсальність обладнання забезпечує можливість його застосування для різних типів електроустановок. Простота у використанні та наявність точних вимірювальних пристроїв роблять АІД-70 ефективним інструментом для діагностики.

Водночас установка має певні недоліки. Її потужність обмежена, що може ускладнити випробування обладнання великої ємності або з високими вимогами до напруги. Крім того, у складних погодних умовах (висока вологість, екстремальні температури) можливе зниження точності вимірювань. Для експлуатації установки потрібен кваліфікований персонал, а також регулярне технічне обслуговування, що збільшує експлуатаційні витрати.

Застосування АІД-70 на підстанціях є виправданим, оскільки дозволяє оперативно діагностувати технічний стан обладнання та запобігати аваріям. Однак для великогабаритних або складних систем може знадобитися використання потужніших випробувальних установок. Таким чином, АІД-70 є ефективним і надійним інструментом для забезпечення надійності роботи електромереж і підвищення рівня безпеки експлуатації обладнання.

1.3 Аналіз новітніх засобів високовольтних випробувань

Завдяки розвитку технологій, сучасні засоби для високовольтних випробувань забезпечують високу точність, надійність та автоматизацію процесу, значно спрощуючи роботу інженерів.

Новітні засоби високовольтних випробувань спрямовані на вирішення кількох ключових завдань:

1. **Діагностика стану обладнання:** Вони дозволяють оперативно оцінити стан ізоляції кабелів, трансформаторів, генераторів, вимикачів та інших елементів.
2. **Пошук пошкоджень:** Завдяки сучасним технологіям випробувальні установки можуть точно локалізувати місця дефектів у кабельних лініях або інших системах.
3. **Моніторинг залишкового ресурсу:** Новітні установки дають змогу аналізувати динаміку зносу ізоляції та прогнозувати термін безпечної експлуатації обладнання[5].
4. **Автоматизація та дистанційний контроль:** Установки нового покоління дозволяють виконувати випробування автоматично або дистанційно, що підвищує безпеку персоналу.

Новітні високовольтні установки мають низку ключових характеристик, які відрізняють їх від традиційних систем:

1. **Компактність і мобільність:** Сучасні установки, наприклад, системи на основі твердотільних генераторів, стали легшими та зручнішими для транспортування.
2. **Цифрові технології:** Новітні пристрої оснащені комп'ютерними системами для збору, аналізу та збереження даних випробувань, що дозволяє точно оцінювати стан обладнання.
3. **Багатофункціональність:** Такі установки можуть працювати в різних режимах — випробування постійним або змінним струмом, імпульсні випробування тощо[23].
4. **Інтеграція зі смарт-технологіями:** У деяких системах передбачено можливість підключення до смарт-мереж, що забезпечує інтеграцію в загальну систему бази випробувань.

Приклади новітніх засобів високовольтних випробувань

1. Системи на базі твердотільних генераторів: Ці установки використовують напівпровідникові компоненти, які забезпечують стабільність вихідної напруги, високу точність та надійність. Їхня мобільність робить їх ідеальними для використання у польових умовах.
2. Імпульсні генератори: Використовуються для випробувань блискачковими перенапругами. Вони дозволяють моделювати вплив імпульсів високої напруги, які виникають під час грозових явищ.
3. Системи частотної діагностики: Такі пристрої дозволяють проводити аналіз ізоляції за допомогою випробувань у широкому діапазоні частот, що дає можливість виявляти специфічні дефекти ізоляційних матеріалів.
4. Портативні кабельні тестери: Високовольтні пристрої для швидкої перевірки цілісності кабельних ліній з функцією локалізації пошкоджень.

Новітні засоби мають значні переваги:

- Точність і надійність: Завдяки цифровим системам контролю вони забезпечують високоточні результати.
- Безпека: Використання дистанційного керування і вбудованих захисних механізмів мінімізує ризики для персоналу.
- Швидкість випробувань: Завдяки автоматизації процесів значно скорочується час проведення випробувань.
- Екологічність: Енергоефективність та зменшення споживання ресурсів роблять ці засоби більш дружніми до довкілля.

Попри всі переваги, сучасні високовольтні установки мають деякі недоліки:

- Висока вартість: Сучасні технології значно дорожчі за традиційні системи.

- Чутливість до умов експлуатації: У складних погодних умовах або за значних забруднень можуть виникати труднощі з точністю роботи.

У майбутньому новітні засоби високовольтних випробувань розвиватимуться у напрямку підвищення автоматизації, інтеграції зі штучним інтелектом та адаптації до смарт-мереж.

Висновок до третього розділу

Отже математичне обґрунтування показує, що високовольтні випробування є ефективним засобом підтримання працездатності електрообладнання та запобігання аваріям. Цей підхід забезпечує оптимальний баланс між витратами на обслуговування і безпекою експлуатації. Загалом витрати на проведення випробувань вигідніші в 3,3 рази ніж обслуговування електрообладнання підстанції без проведення таких випробуваннях, і це за умови що не враховано можливі збитки через простій обладнання після аварії, та збитки через знеструмлення споживачів, якщо врахувати і це то доцільність високовольтних випробувань стає беззаперечною[24]. Розрахунки також вказують, що регулярні високовольтні випробування продовжать термін експлуатації обладнання електропідстанцій в середньому на 12,6%, залежно від початкових умов. Що у свою чергу зменшить витрати на нове обладнання та забезпечує більшу стабільність роботи електромережі України.

Також було визначено що новітні високовольтні випробувальні установки є ключовим інструментом для забезпечення надійності та безпеки електроенергетичних систем. Їхнє впровадження дозволяє значно підвищити ефективність діагностики та мінімізувати ризики аварійного виходу обладнання з ладу.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Високовольтні випробування є важливим інструментом для раннього виявлення дефектів ізоляції електрообладнання. Комплексне використання різних методів діагностики дозволяє досягти високої точності у визначенні стану ізоляційних матеріалів та запобігти аваріям. Класифікація дефектів ізоляції сприяє розробці ефективних методів їх виявлення, діагностування та профілактики. Глибоке розуміння природи та типів дефектів допомагає вибрати відповідні випробувальні методики, забезпечуючи надійну експлуатацію обладнання[20].

Разом із тим високовольтні випробування впливають на довговічність ізоляційних матеріалів. З одного боку, вони дозволяють своєчасно виявляти проблеми та оцінювати стан ізоляції, запобігаючи можливим аварійним ситуаціям. З іншого боку, високовольтні напруги, які застосовуються під час випробувань, можуть викликати певне зношування матеріалів через часткові розряди, теплову деградацію чи хімічну ерозію. Дотримання стандартів та методик проведення випробувань є ключовим для мінімізації негативного впливу на ізоляцію[28]. Урахування специфіки кожного типу ізоляційного матеріалу дозволяє зберегти його працездатність, забезпечуючи тривалу та стабільну роботу обладнання.

Дослідження також підтверджують економічну ефективність високовольтних випробувань. Математичне моделювання показує, що регулярна діагностика що найменше в 3.3 рази вигідніша ніж експлуатація обладнання без належного моніторингу. Крім того, такі випробування дозволяють продовжити термін служби обладнання електропідстанцій у середньому на 12,6%, що суттєво зменшує витрати на заміну техніки та підвищує стабільність електроенергетичної системи.

Використання сучасних високовольтних установок значно підвищує ефективність діагностики, зменшує ризик аварійного виходу обладнання з ладу та забезпечує безпеку експлуатації енергосистем[30].

Таким чином, високовольтні випробування є незамінним елементом підтримання працездатності обладнання електропідстанцій. Вони сприяють не лише своєчасному виявленню дефектів, але й загальному підвищенню надійності та ефективності роботи електроенергетичних систем, що має вирішальне значення для стабільного функціонування електромережі України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Касьян Д.А. «Аналіз впливу високовольтних випробувань на термін служби ізоляції електричного обладнання» Збірник тез доповідей «Наукові читання – 2024» ПНУ м. Житомир. Житомир: Поліський національний університет, 2024.
2. Гончар В. Ф. , Тищенко Л. П. Електрообладнання і автоматизація с. г. агрегатів і установок. К. Вища школа. 1989. 343 с.
3. Гончар В. Ф. Електрообладнання і автоматизація с. г. агрегатів і установок. К. Вища школа. 1985. 208 с.
4. Гончаров Ю. П, Будьонний О. В, Морозов В. Г, Панасенко М. В, Ромашко В. Я, Руденко В.С. За ред. Руденка В.С. Перетворювальна техніка. Підручник. Ч2/ - Харків: Фоліо, 2000. - 360с
5. Жулай Є.Л Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній. – К.: 2002
6. Марченко А. С. Довідник з механізації та автоматизації у тваринництві та птахівництві. - К., Урожай, 1990.
7. Мартиненко І. І. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва. - К., Урожай, 1995.
8. Марченко О.С. Механізація та автоматизація у тваринництві і птахівництві.-К.,Урожай,1995.
9. СВ АЛЬТЕРА «Електротехніка & Автоматизація» Каталог продукції 2009. Київ.
10. Средства автоматизации технологических процессов. Підприємство МІКРОЛ. Каталог продукції 2009. м. Івано-Франківськ. Україна.
11. Стадник Н. І., Іллющенко В. Г., Єгоров С. І. та ін. Довідник з автоматизації шахтного конвеєрного транспорту.—К.: Техніка, 1992.
12. Стадник Н.І., Бочаров К.П. "Плавний пуск стрічкових конвеєрів". Збірник наукових праць «Вирішення науково-технічних проблем під час

створення та впровадження сучасного гірничо-шахтного обладнання»
Донецьк 2008р. С. 585-593

13. Стаднік М.І. Контроль швидкісних параметрів стрічкових конвеєрів Збірник наукових праць Серія: Технічні науки. Всеукраїнський науково - технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» / Редколегія. Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. С.125 - 128. - Вінниця, 2016. -№2(94) ,- 128с.

14. Стаднік Микола Іванович д.т.н., професор Вінницький національний аграрний університет Збірник наукових праць Серія: Технічні науки. Всеукраїнський науково - технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» / Редколегія. Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. С. 60 -64. - Вінниця, 2016. - №І (91) - 87 с.

15. ПК”Промавтоматика” Каталог продукції. 2009. г Запороржъе. Україна.

16. Прядко В. А. Яремчук Л. М. Автоматизація електроприводу с. – г. машин. Ж. 2011 р.

17. Олійник В. С. Практикум з електроприводу. – К., Урожай, 1995.

18. Логвінов Г. С., Прядко В. А., Яремчук Л. М. Електрообладнання і автоматизація сільськогосподарських агрегатів і установок. – Ж., 2013.

19. Локареєв В.І. Бережницька Я.Б. (Волянська) Ресурсозбереження в електротехнічних комплексах та системах. - Херсон: Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи. - 1998. - № 2 (3). - С. 135-143.

20. Основи безпечної експлуатації електроустановок: Підручник / С. В. Панченко, О. І. Акімов, М. М. Бабаєв та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2021. – 149 с., рис. 3, табл. 5. ISBN

21. Волянська Я.Б. Енергетична оптимізація при схемних перемиканнях обмоток статора асинхронного двигуна // Електромашинобудування та електрообладнання. Респ. міжвід. наук.-техн. зб. - 2005. - Віп. 65. - С. 11-14.

22. Волянська Я.Б., Краснов В.В. Струм статора асинхронного електродвигуна при зміні навантаження та напруги живлення // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - 2005. - Вип. №4(33). - С. 66-69.

23. Костенко Д.В., Волянська Я.Б. Енергозберігаюче управління асинхронним електроприводом з використанням мікропроцесорної техніки // Зб. наук. праць НУК. - Миколаїв: НУК, 2005. - №3 (402). - С. 101-110.

24. Костенко Д.В., Волянська Я.Б. Використання мікроконтролерів в інтелектуальних реле для асинхронних електроприводів // Електротехніка та електромеханіка: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 25-27 листопада 2004 р. - Миколаїв: НУК, 2004. - С. 55-56.

25. Касьян Д.А. «Обґрунтування високовольтних випробувань як інструменту раннього виявлення дефектів ізоляції». Збірник тез доповідей «Наукові читання – 2024» ПНУ м. Житомир. Житомир: Поліський національний університет, 2024.

26. Касьян Д.А. «Дослідження та аналіз засобу високовольтних випробувань АІД-70». Збірник тез доповідей «Наукові читання – 2024» ПНУ м. Житомир. Житомир: Поліський національний університет, 2024.

27. Руденко В. С, Ромашко В. Я, Морозов В.Г. Перетворювальна техніка. Частина 1: Підручник. - К.:ІСДО, 1996. - 262с.

28. Терещук Р.М. Терещук К.М. Напівпровідникові приймальні пристрої: Справ. радіоаматора. - 4-те вид., Стер. – Київ: Наук. думка, 1989. – 800с.

29. С.П. Ткачов, Ремонт енергообладнання, видавництво АО БАХВА. 2004р, 148с.

30. Мельник Л.Р., Сушицька Е.І., Сприса В.В. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 «НОРМИ ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ» затверджений наказом Міністерства палива та енергетики України № 13 від 15.01.2007.