

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

ШУМІЛОВ Михайло Юрійович

УДК 621.35.035:621.365

**ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТА МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ
ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПОЛІМЕРНИХ ІЗОЛЯТОРІВ В УМОВАХ
КОМПЛЕКСНОЇ ДІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ**

Спеціальність 05.09.13 – Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електроізоляційної і кабельної техніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України та Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут високих напруг» Міністерства палива та енергетики України (м. Слов'янськ)

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Набока Борис Григорович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри електроізоляційної і
кабельної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Шерба Анатолій Андрійович,
Інститут електродінаміки Національної Академії Наук
України, м. Київ, завідуючий відділом

доктор технічних наук, професор
Рудаков Валерій Васильович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», м. Харків,
завідувач кафедри інженерної електрофізики

Захист відбудеться « 25 » березня 2010 р. о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Автореферат розісланий « » 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Високовольтні ізолятори є одним з найважливіших елементів електроізолюючого обладнання електричних мереж. Надійність роботи електричних мереж значною мірою визначається характеристиками полімерних ізоляторів, їх стійкістю до експлуатаційних впливів: сильних електричних полів, механічних навантажень, кліматичних факторів. Досвід експлуатації полімерних ізоляторів першого покоління на повітряних лініях електропередачі показав високу ефективність їх застосування, однак було виявлено й ряд недоліків, до яких відносяться внутрішні пробіи під оболонкою, «крихкі руйнування», складність виявлення на повітряних лініях пробитих ізоляторів. Усунення зазначених недоліків шляхом удосконалення конструкції високовольтних полімерних ізоляторів неможливо без глибокого вивчення електрофізичних процесів, що передують електричному пробію або «крихкому руйнуванню» полімерних ізоляторів під впливом сильного електричного поля та інших експлуатаційних факторів. Перспективним напрямком досліджень в галузі створення нових полімерних електроізоляційних конструкцій є застосування нових полімерних та композиційних матеріалів та впровадження нових високопродуктивних технологій виготовлення полімерних ізоляторів на сучасному технологічному обладнанні.

Таким чином, удосконалення конструкції полімерних ізоляторів, а саме, підвищення електричної та механічної міцності полімерних ізоляторів в умовах дії експлуатаційних факторів є актуальною науково-практичною задачею та визначило напрямок дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі електроізоляційної і кабельної техніки НТУ «ХПІ» та ДП «НДІВН» у рамках завдань держбюджетної теми «Исследование и разработка новых материалов, полимерных изолирующих конструкций, исследование эксплуатационной надежности полимерных изоляторов в энергосистемах Украины» (Мінпаливенерго України, ДР № 0194U037027), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета та задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є удосконалення конструкції високовольтних полімерних ізоляторів шляхом підвищення їх електричної та механічної міцності в умовах одночасної дії сильного електричного поля, механічних навантажень та кліматичних факторів, а також удосконалення технології виготовлення полімерних ізоляторів.

Для досягнення поставленої мети були розв'язані задачі:

- дослідити розподіл напруженості сильного електричного поля на поверхні тороїдальних екранів та склопластикових стрижнях високовольтних полімерних ізоляторів з урахуванням екрануючої дії розщепленої фази та обвідного шлейфу;

- теоретично і експериментально дослідити можливість застосування нових електроізоляційних матеріалів для створення високовольтних полімерних ізоляторів з підвищеними електричною та механічною міцністю;

- дослідити електрофізичні процеси в діелектриках, що передують «крихкому руйнуванню» склопластикових стрижнів високовольтних полімерних ізоляторів в сильному електричному полі, та розробити рекомендації щодо підвищення стійкості полімерних ізоляторів до даного виду руйнування;

- на базі отриманих наукових результатів створити та виконати дослідження удосконалених високовольтних полімерних ізоляторів на класи напруги 3,3 – 750 кВ;

- створити пристрій, що полегшує пошук на повітряних лініях полімерних ізоляторів, які вийшли з ладу.

Об’єкт дослідження – електрофізичні процеси, що викликають пробій та руйнування полімерних і композиційних матеріалів в сильному електричному полі.

Предмет дослідження – високовольтні полімерні ізолятори з підвищеними електричними та механічними характеристиками в експлуатаційних умовах.

Методи дослідження. Розрахунок електростатичних полів полімерних підвісок виконано шляхом використання проекційно-сіткових методів, реалізованих у програмі Comsol Multiphysics. Version 3.4. Дослідні зразки ізоляторів для випробування виготовлялись на технологічному обладнанні – ливарних машинах DESMA (Германія) та пресовому обладнанні Finn Power (Фінляндія). Експериментальні дослідження виконувались з використанням експериментальної техніки, яка включає генератори імпульсних напруг та струмів, камер туману, тепла та холоду, систем вимірювання високої напруги та сильних струмів. При порівнянні розрахункових та експериментальних даних застосовувались статистичні методи дослідження і обробки експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- вперше науково обгрунтовано ефективність використання нових електроізоляційних матеріалів, зокрема, твердих силіконових гум адитивної вулканізації і склопластикових стрижнів, підсиленних безборним скловолокном, що забезпечило створення за один впрыск довгомірних полімерних конструкції з підвищеною електричною та механічною міцністю;

- отримано нові дані про фізичні процеси при формуванні адгезійного зв’язку «склопластик – захисна оболонка – метал», який впливає на електричну міцність полімерних ізоляторів. Встановлено, що при каталітичній (адитивній) вулканізації технологічна стабільність адгезійного зв’язку гуми з поверхнею склопластикового стрижню досягається шляхом ретельної ізоляції платинового каталізатора від слідів амінного прискорювача, що присутній в епоксидній зв’язці та виступає на поверхню склопластику при нагріванні в ливарній формі;

- отримано нові дані про характер руху вологи в сильному електричному полі в пористих склопластиках та формування зон виникнення часткових розрядів, які впливають на розташування «крихких руйнувань» склопластику.

- набуло подальшого розвитку наукове обгрунтування механізмів «крихкого руйнування» склопластиків. Показано, що у разі розгерметизації силових вузлів полімерного ізолятора електростатичне екранування не захистить поліме-

рний ізолятор від «крихкого руйнування». Застосування склопластиків, підсиленних безборним скловолокном, істотно збільшує стійкість полімерних ізоляторів до «крихкого руйнування».

- теоретично та експериментально доведено ефективність застосування безусадкових рідких силіконових гум адитивної вулканізації для герметизації силових вузлів високовольтних полімерних ізоляторів;

- набуло подальшого розвитку уточнення механізмів впливу розщепленої фази та обвідного шлейфу на конструкцію, розміри та розташування тороїдальних екранів, що забезпечило дотримання вимог щодо корони і напруженості виникнення часткових розрядів в склопластикових стрижнях полімерних ізоляторів.

Практичне значення отриманих результатів для електроенергетичної галузі:

- наведені в дисертації науково обґрунтовані технічні та технологічні рішення використані при розробці та освоєнні виробництва типорозмірного ряду ізоляторів ЛКЦ з суцільнолитими захисними оболонками на напругу 35 – 750 кВ на Науково-виробничому підприємстві «ЕС Полімер» (м. Артемівськ);

- на розроблений ряд ізоляторів ЛКЦ отримано експертний висновок Мінпаливенерго України №7-05. Нові ізолятори успішно експлуатуються в електричних мережах України та контактних мережах ДП «Укрзалізниця»;

- результати досліджень використовуються при розробці та виготовленні зовнішньої ізоляції електрообладнання інших типів: обмежувачів перенапруг, прохідних ізоляторів та ввідів, вимірювальних трансформаторів струму та напруги;

- отримано патент на нову конструкцію індикаторів пробою для виявлення на повітряних лініях високовольтних полімерних ізоляторів, що вийшли з ладу, яка базується на використанні енергії магнітного поля, що виділяється під час пробою.

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них:

- проведення розрахунків електричних полів полімерних ізолюючих підвісок з тороїдальними екранами в системі «полімерний ізолятор – екран – фазний провід – тіло опори», а також виборі критеріїв оцінки конструкцій тороїдальних екранів на підставі аналізу експериментальних даних;

- проведення досліджень впливу нових матеріалів і технологічних параметрів при виливанні суцільнолитих захисних оболонок полімерних ізоляторів на адгезію та електричну міцність межі розділу «склопластик – каталітична гума – метал», результати яких були враховані при розробці технологічних процесів виготовлення полімерних ізоляторів типу ЛКЦ;

- розробка методики та проведення експериментальної роботи з дослідження руху вологи у капілярах склопластику в сильному електричному полі та його корозійної стійкості, що дозволило дати рекомендації щодо підвищення стійкості високовольтних полімерних ізоляторів до «крихкого руйнування»;

– виготовлення і випробування дослідних зразків полімерних ізоляторів і індикаторів пробою полімерних ізоляторів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались на: 2-й міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика, екологія, енергозбереження, транспорт» (Росія, м. Тобольськ, 2004р.); міжнародній науково-технічній конференції «Нелінійні обмежувачі перенапруг: виробництво, технічні вимоги випробувань, досвід експлуатації, контроль стану» (Росія, м. Санкт-Петербург, 2005р.); міжнародних симпозіумах «Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» (SIEMA) (2005, 2007 р., м. Харків).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи були опубліковані в 12 друкованих працях, серед них: 5 – опубліковано у наукових фахових виданнях ВАК України, 3 патенти України на корисну модель, 1 патент України на винахід.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Загальний об'єм дисертації 195 сторінок, з них: 46 ілюстрацій по тексту, 30 ілюстрацій на окремих 18 сторінках; 33 таблиці; 2 додатки на 13 сторінках; список використаних літературних джерел з 125 найменувань на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета і задачі досліджень і розробок, визначені об'єкт і предмет досліджень, описані методи досліджень, показані наукові новизна і практичне значення одержаних результатів.

В першому розділі розглянутий сучасний стан і досвід експлуатації полімерних ізоляторів високої напруги. Показані перспективи застосування полімерних ізоляторів на повітряних лініях електропередачі. Разом з тим аналіз досвіду експлуатації в Україні, Росії, США, Китаї та інших країнах виявив ряд недоліків полімерних ізоляторів перших поколінь, а саме: недостатню електричну міцність внаслідок слабого адгезійного зв'язку між конструктивними елементами і наявність великої кількості елементів (ізоляційних ребер), з'єднаних між собою; слабку стійкість склопластикових стрижнів до хімічно агресивних продуктів, розчинних у воді, в зоні коронних та часткових розрядів («крихке руйнування» стрижнів); складність виявлення пробитих ізоляторів у експлуатації.

Таким чином, проблема полягає у відшукуванні способів підвищення електричної та механічної стійкості високовольтних полімерних ізоляторів в умовах комплексного впливу експлуатаційних факторів, розробці на основі отриманих результатів та впровадженні у виробництво полімерних ізоляторів з поліпшеними експлуатаційними властивостями.

Аналіз виконаних раніше досліджень показав, що підвищення експлуатаційних властивостей полімерних ізоляторів може бути досягнуто шляхом створення конструкції ізоляторів з суцільнолитою захисною оболонкою, вживанням

нової технології їх виробництва, зниження рівня часткових розрядів в склопластику ізоляторів за допомогою раціонально підібраної екранної арматури, застосування в конструкції ізоляторів нових діелектричних матеріалів, оснащення ізоляторів реєстраторами пробою, які полегшують пошук пробитих ізоляторів у польових умовах.

У другому розділі представлено обґрунтування вибору конструкцій електростатичних екранів для полімерних ізоляторів на класи напруги 220 – 750 кВ. Вибір екранів здійснюється на підставі розрахунків картини розподілу електростатичного поля полімерної підвіски, змодельованої в тримірній постановці задачі з урахуванням екрануючого впливу фазного проводу (обвідний шлейф в натяжному виконанні підвіски) та близькості траверси опори повітряної лінії, яка знаходиться під нульовим потенціалом.

Математична модель електростатичного поля поблизу полімерної ізолюючої підвіски побудована на базі рівняння Лапласа та реалізована за допомогою кінцево-елементної програми Comsol Multiphysics. Version 3.4., яка підтримує проєкційний метод кінцевих елементів. Загальний вигляд спрощеної розрахункової моделі полімерної підвіски представлений на рис. 1. Спрощення полягає в тому, що з моделі підвіски виключені захисна кремнійорганічна оболонка ізолятора та ряд деталей зчеплювальної арматури, оскільки їх вплив на картину поля дуже незначний.

Рис. 1. Розрахункова модель полімерної підвіски для ліній електропередачі 220 кВ – 750 кВ:

- | | |
|--|---------------------|
| 1 – замкнутий простір (повітря); | 5 – фазний провід; |
| 2 – склопластиковий стрижень; | 6 – траверса опори; |
| 3 – металічний закінцювач ізолятора; | 7 – «земля». |
| 4 – тороїдальний електростатичний екран; | |

За допомогою програми Comsol Multiphysics. Version 3.4. кожна розрахункова модель (рис. 1) розбивається сіткою, яка складається з тетраїдальних елементів Лагранжа 2-го порядку.

В межах кожного кінцевого елемента (тетраедра) потенціал $\varphi(x,y,z)$ інтерполюється квадратичним поліномом

$$\varphi_R = \sum_{i=1}^M A_i N_i, \quad (1)$$

де φ_R – наближене розв'язання, N_i – функції форми елемента, які набувають ненульових значень тільки в межах об'єму кінцевого елемента, A_i – коефіцієнти, які піддаються визначенню, M – кількість вузлів у елементі.

В результаті підстановки (1) у рівняння Лапласа отримаємо

$$R = \frac{\partial^2 \varphi_R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_R}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_R}{\partial z^2}. \quad (2)$$

Згідно методу зважених нев'язок для мінімізації помилки R точного розв'язання апроксимуючим виразом типу (1) необхідним є виконання рівняння

$$\iiint_V N_i \cdot R dV = 0. \quad (3)$$

В результаті підстановки (1) та (2) в (3) та розкриваючи потрійний інтеграл частинами отримаємо

$$\iiint_V \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \varphi_R}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial \varphi_R}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial \varphi_R}{\partial z} \right] dx dy dz - \oint_S N_i \cdot \frac{\partial \varphi_R}{\partial n} dS = 0. \quad (4)$$

Поверхневий інтеграл в (4) дозволяє накласти граничні умови для вузлів, які лежать на зовнішній межі розрахункової області

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0. \quad (5)$$

На межі поділу двох діелектриків:

$$\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \quad \text{і} \quad \varphi_1 = \varphi_2. \quad (6)$$

Гранична умова на провідниковій поверхні з заданим потенціалом φ_0

$$\varphi = \varphi_0. \quad (7)$$

Гранична умова на «заземлений» поверхні

$$\varphi = 0. \quad (8)$$

В результаті чисельного інтегрування інтегралів (4) отримують матрицю жорсткості кінцевого елемента відносно коефіцієнтів A_i .

Далі проводиться операція ансамблювання матриць жорсткості кінцевих елементів, що містять спільні вузли, в одну глобальну матрицю. За отриманим в результаті чисельного розв'язання глобальної матриці розподілом потенціалів програма Comsol Multiphysics. Version 3.4. дозволяє побудувати картину розподілу напруженості електричного поля у будь-якому перерізі розрахункової області.

Перевірка достовірності розрахунків напруженості електричного поля у полімерній підвісці з застосуванням програми Comsol Multiphysics. Version 3.4. була виконана шляхом співставлення результатів розрахунку з контрольною задачею, яка має аналітичне розв'язання, а також експериментально.

На підставі експериментальних даних по вимірюванню електричної міцності склопластиків різних виробників була прийнята розрахункова порогова напруженість виникнення часткових розрядів в склопластику $E_i = 4,5$ кВ/см. Напруженість електричного поля на поверхні екрана не повинна перевищувати критичної напруженості виникнення корони 18 – 25 кВ/см (в залежності від конфігурації тороїда).

Результати розрахунку напруженості електричного поля полімерної підвіски на клас напруги 220 кВ з урахуванням впливу фазного проводу поблизу поверхні торіодального екрану E_ϕ та вісі склопластикового стрижня E_z в залежності від радіусу торіода R_0 та радіусу труби торіода r_0 наведені в табл. 1. Елементи табл. 1, в яких при заданих R_0 та r_0 не виконується умова $E_\phi \leq E_{н.к.}$ и $E_z \leq E_i$ (тобто при заданій конфігурації поверхні екрану буде коронувати або напруженість поля на вісі склопластикового стрижня перевищує порогову напруженість виникнення часткових розрядів), виділені темним. Аналогічним чином були виконані розрахунки для підвісок на класи напруги 330 – 750 кВ.

Таблиця 1

Розрахункова напруженість електричного поля E_ϕ (кВ/см) на поверхні торіодального екрану та на вісі ізолятора E_z (кВ/см) класу напруги 220 кВ

R_0 , см	r_0 , см				
	0,5	0,75	1	1,25	1,5
5	34 / 5,8 / 3	29 / 5,9 / 3	25 / 6 / 3	22,5 / 6 / 3	21 / 5,9 / 3
6	30,6 / 5,7 / 3	27,3 / 5,2 / 3	24,4 / 5 / 3	21,6 / 5 / 3	19,4 / 5,1 / 3
7	27,7 / 5,6 / 3	25,7 / 4,6 / 4	23,7 / 4,4 / 4	20,8 / 4,3 / 4	18 / 4,4 / 4
8	26 / 5,4 / 5	24,7 / 4,6 / 5	23 / 4,1 / 5	20 / 3,9 / 5	17 / 4 / 5
9	25,8 / 5,8 / 5	24 / 5 / 5	22 / 4,4 / 5	19,2 / 4 / 5	16,3 / 3,8 / 5
10	26 / 6,1 / 5	23,9 / 5,6 / 5	21 / 5,1 / 5	18,5 / 4,5 / 5	16 / 3,8 / 5

Примітка: в кожному елементі таблиці вказані значення E_ϕ (кВ/см) / E_z (кВ/см) / Z_0 (см).

Графіки розподілу напруженості електричного поля на вісі ізолятора E_z поблизу нижнього закінцювача в залежності від розташування торіодального екрану при $R_0 = 8$ см та $r_0 = 0,5$ см наведені нижче (рис. 2).

Рис.2. Розподіл напруженості електричного поля вздовж вісі ізолятора поблизу нижнього закінцювача в залежності від розташування торіодального екрану

Результати розрахунків електростатичного поля полімерних підвісок на класи напруги 220 – 750 кВ показали, що екрануюча дія розщепленого проводу значною мірою залежить від кількості проводів в розщепленій фазі. Встановлено, що за умови обмеження робочої напруженості електричного поля до допустимого рівня (4,5 кВ/см для діелектрика та 18 – 24 кВ/см на поверхні екранів) геометричні розміри екранів, їх конструкція і розміщення на ізоляторі можуть бути прийняті наступними:

– для повітряної лінії 220 кВ розміри одиночного торіодального екрана рекомендовано вибрати в межах $R_0 = 7 – 10$ см, $r_0 = 1 – 1,5$ см, $Z_0 = 4 – 5$ см;

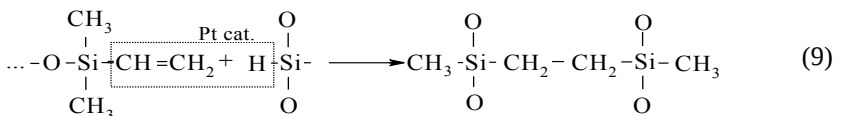
- для повітряної лінії 330 кВ розміри одиночного тороїдального екрана $R_0 = 8 - 17$ см, $r_0 = 1 - 2$ см, $Z_0 = 5 - 10$ см;
- для повітряної лінії 500 кВ розміри одиночного тороїдального екрана $R_0 = 15 - 20$ см, $r_0 = 1,75 - 2,5$ см, $Z_0 = 8 - 10$ см;
- для повітряної лінії 750 кВ рекомендується комплексне застосування суцільного екранного диска ($R_0 = 5,5$ см, $r_0 = 0,5$ см), який опресовано на раструб закінцювача і тороїдального екрана з розмірами $R_0 = 15 - 25$ см, $r_0 = 2 - 3$ см, $Z_0 = 12 - 16$ см.

Обвідний шлейф на анкерних опорах в натяжній полімерній підвісці чинить істотний екрануючий вплив, в зв'язку з чим напруженість електричного поля в склопластиковому стрижні ізолятора і на поверхні екрану в натяжних ізоляторах виявляється меншою, ніж у підвісних ізоляторів, тому геометричні розміри і конструкції екранів можуть бути прийняті однаковими як для натяжних, так і для підвісних ізоляторів.

У третьому розділі розглянуті шляхи підвищення електричної міцності полімерних конструкцій в умовах комплексного впливу експлуатаційних чинників: електричних і механічних навантажень, вологи, температури. На першому етапі досліджень розглянуто можливість заміни захисної оболонки ізолятора збірної «шашликової» конструкції з великою кількістю стиків між ребрами на конструкцію з суцільнолитою оболонкою. Показані основні труднощі отримання суцільнолитої оболонки: прогин та руйнування склопластикового стрижня за високого тиску та температури пресування оболонки, технічні складності отримання довгомірних (більш 3,5 метрів) виробів, виділення при вулканізації газоподібних продуктів розпаду перекисних вулканізуювальних агентів.

Задача розв'язувалась шляхом застосування силіконових гум каталітичної (адитивної) вулканізації та використання технології інжекційного лиття гум під тиском. Розроблені ливарні форми для лиття методом «step by step» дали змогу отримувати суцільнолиті оболонки довжиною до 4,5 м без зміщення та розтріскування склопластикового стрижня усередині ізолятора, без другої стадії вулканізації та виділення небажаних для виробництва побічних газоподібних продуктів.

Новизна технологічного процесу полягає в використанні замість традиційних силіконових гум перекисної вулканізації нової гумової суміші з метилгідросилоксаном в якості зшивального агента та платинового каталізатора для прискорення процесу та зниження температури вулканізації. Зшивання молекул каучуку в присутності платинового комплексу здійснювалось за схемою



за температури 100 – 140 °С, тобто нижче температури терморуїнування склопластику та без виділення побічних газоподібних продуктів.

Висока адгезійна міцність з'єднання силіконової оболонки зі склопластиковим стрижнем досягалась нанесенням на поверхню стрижня тонкого шару ґрунтовки «праймера», що являє собою розчин органофункціонального силану в рідкому розчиннику. Праймер, що застосовується, містить у структурі функціональні групи двох типів: алкоксигрупи для зв'язку зі скловолокном та вінільні групи для реакції з гідридними групами гумової суміші.

Забезпечення технологічної стабільності адгезійного зв'язку гуми з поверхнею склопластикового стрижня досягалось шляхом ретельної ізоляції платиного каталізатору від слідів амінного прискорювача в епоксидній зв'язці, який виступає на поверхню склопластику при вулканізації оболонки.

На другому етапі досліджень розв'язувалось питання удосконалення герметизації силових вузлів ізолятора, оскільки недостатній адгезійний зв'язок оболонки з металом призводив до відшарування герметика, рис. 3 та, як наслідок, до проникнення вологи в силовий вузол, що закінчувалось пробоем ізолятора на повітряній лінії.

Рис.3. Порушення герметизації силового вузла лінійного полімерного ізолятора типу ЛКЦ

Виконані дослідження показали, що головною причиною недостатньої адгезійної міцності є виділення побічних продуктів (оцтової кислоти, спиртів) та усадка матеріалу при конденсаційній вулканізації силіконових герметиків, що застосовуються традиційно. Пошук матеріалів, які усувають дане явище, привів до групи рідких силоксанових гум адитивної вулканізації RTV-2, які вулканізуються за кімнатної температури без виділення побічних продуктів та без усадки. Промисловими матеріалами даної групи є двохпакувальні рідкі гуми HV 1540/10P (Dow Corning) та Powersil 600 (Wacker). Нова технологія герметизації силових вузлів передбачає обов'язкове зняття цинкового покриття з поверхні металічного закінцювача в зоні герметизації.

Для підтвердження гіпотез, що розробляються, була складена програма дослідних випробувань, які відображають вплив на ізолятор основних експлуатаційних чинників, рис.4.

Дослідження виконувались на ізоляторах 3,3 – 750 кВ, виготовлених за розробленою при виконанні роботи технологією та на новій виробничій лінії. Аналіз отриманих експериментальних результатів показав експлуатаційні переваги нових конструкцій та технології, розроблених на основі принципів, які запропоновані в даній роботі. Адгезія захисної оболонки до металу, яка визначається методом відриву, перевищувала нормативний показник більш ніж у два рази після кип'ятіння. Ізолятори після кліматичних випробувань, які включають різке скидання навантаження при температурі – 25 °С, термомеханічні випробування під

навантаженням при температурі від -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$, кип'ятіння 42 год. в 0,1 % розчині NaCl, витримали з великим запасом контрольні випробування імпульсною напругою з крутим фронтом хвилі, випробування напругою промислової частоти величиною $0,8 U_{\text{ср}}$ протягом 30 хв без нагріву та зміни струму витоку, а також інші види контрольних випробувань.

Рис.4. Схема дослідних випробувань підвісних полімерних ізоляторів

Таким чином, гіпотеза про ефективність використання твердих та рідких силосанових гум адитивної каталітичної вулканізації для отримання та герметизації полімерних ізоляторів із суцільнолітою захисною оболонкою була цілком підтверджена, а результати досліджень використані при розробці нових конструкцій полімерних ізоляторів і технології їх виробництва.

Четвертий розділ присвячений проблемі запобігання «крихкого руйнування» високовольних полімерних ізоляторів в сильних електричних полях. Під «крихким руйнуванням» розуміють обрив в експлуатації склопластикового стрижня поблизу лінійного закінцювача за нормального механічного навантаження. Ознакою «крихкого руйнування» є гладка поверхня зруйнованого перерізу, розташованого перпендикулярно до вісі ізолятора (рис.5). Незважаючи на малу вірогідність подібних руйнувань, небезпека їх велика, оскільки «крихке руйнування» супроводжується падінням проводу.

Рис.5 . Зовнішній вигляд «крихкого руйнування» полімерного ізолятора

Вважається, що головною причиною «крихкого руйнування» є корозія напружених скловолокон при контакті з водним розчином азотної кислоти, яка виникає в зоні горіння коронних або часткових розрядів. В роботах Bauer E., Verma P. та інш. було припущено, що ретельне екранування ізолятора поблизу лінійного закінцювача усуне можливість гідролізу або «крихкого руйнування». Проте виконані експерименти цього не підтвердили. Показано, що волога, що просякла внаслідок розгерметизації силового вузла під дією капілярних сил підіймається до екрану зі швидкістю, яка не залежить від напруженості електричного поля. При виході стовпа рідини за межі екрану напруженість на кінці стовпа електроліту різко росте і подальший підйом вологи припиняється внаслідок випаровування і росту тиску в капілярах при виникненні часткових розрядів.

Процес виникнення та припинення часткових розрядів періодичний. Зона виникнення часткових розрядів розташовується вище рівня установки електростатичного екрану. В цьому місці виникає накопичення побічних продуктів газового розряду, які ініціюють руйнування стрижня.

Описані експерименти свідчать, що встановлення електростатичних екранів за наявності дефектів в оболонці та силових вузлах не гарантує нормальної роботи ізолятора через винесення потенціалів рідиною, яка підіймається капіля-

рами вище рівня встановлення електростатичних екранів. Враховуючи те, що при серійному виробництві ізоляторів важко уникнути стовідсоткової відсутності дефектів, способи усунення «крихкого руйнування» необхідно шукати в підвищенні корозійної стійкості матеріалів та, в першу чергу, скловолокна.

Сьогодні для виробництва склопластику для ізоляторів застосовують алюмоборосилікатне скловолокно (тип *E*). Бор, який вводиться в шихту в якості плавню, в малолужному алюмоборосилікатному склі знаходиться у потрібній координації. З хімії скла відомо, що скло, в якому бор знаходиться в потрібній координації, хімічно нестійке. З цієї причини проводиться інтенсивний пошук складу скловолокна для ізоляторів, який виключає присутність в структурі B_2O_3 . Як показано в роботах Terry S. McQuarrie и M. Cumosa, проблема полягає в тому, що при варінні безборного скла (тип *ECR*) у скломасі виникає багато пузирів діаметром 2 – 3 мкм, які викликають зниження електричної міцності склопластиків на базі скловолокна *ECR*. З цієї причини електричні властивості склопластикових стрижнів у різних виробників можуть істотно відрізнятись.

Для вибору склопластиків з необхідними властивостями виконувались спеціальні дослідження. Для цього була розроблена спеціальна методика та складена програма дослідних випробувань. Було досліджено вісім типів склопластиків на волокні *ECR* від різних виробників, встановлено, що стійкість склопластиків на основі волокна типу *ECR* до «крихкого руйнування» більш ніж на два порядки перевищує стійкість склопластиків на волокні типу *E*. За комплексом показників серед досліджених склопластиків кращі результати показав склопластик фірми «Bastion Glassfibre» (Англія). На базі цього склопластику були виготовлені дослідні зразки ізоляторів 3,3 – 750 кВ для приймальних випробувань та дослідно-промислові партії. Виготовлені ізолятори проходять дослідну експлуатацію в різних енергосистемах України без зауважень. На основі результатів приймальних випробувань та Експертного висновку, затвердженого Мінтопенерго України, полімерні ізолятори на базі корозійностійкого склопластику з волокном типу *ECR* рекомендовані для широкого впровадження як ізолятори з покращеними характеристиками за показником «крихкого руйнування».

В п'ятому розділі описана нова конструкція індикаторів пробою полімерних ізоляторів (патент України № 84497) та наведені результати дослідних випробувань дослідних зразків.

Принцип дії нового індикатора пробою базується на використанні енергії магнітного поля, яка виділяється при електричному пробі полімерного ізолятора. Конструкція індикатора пробою (рис.6) складається з таких основних елементів: двох півкільць 1, виконаних з феромагнітного матеріалу, з'єднаних з однієї сторони пружиною 2, а з іншої розділених повітряним зазором; гнучкої сигнальної стрічки 3, що оперізує зовні феромагнітні півкільця (кінці стрічки з'єднані у

легкорознімний замок); штовхача 4; хомута 5, призначеного для кріплення індикатора пробою до закінцювача ізолятора.

Рис. 6. Конструкція індикатора пробою високовольних полімерних ізоляторів

Індикатор пробою працює таким чином. За допомогою хомута 5 індикатор кріпиться до верхнього закінцювача полімерного ізолятора (рис. 7 а). В момент електричного пробою ізолятора струм короткого замикання, який протікає вздовж стрижня, викликає змінний магнітний потік, який пронизує феромагнітні півкільця, розділені повітряним зазором. Внаслідок дії на феромагнітні півкільця електродинамічної сили, з якою притягаються феромагнітні півкільця, зазор d між півкільцями зменшується, штовхач 4 викликає розмикання замку, яким зафіксований один кінець сигнальної стрічки. Внаслідок пружного розпрямлення сигнальної стрічки її відкинутий кінець сигналізує про спрацювання індикатору пробою (рис. 7 б).

Зусилля змикання півкільць в початковий момент протікання струму короткого замикання вздовж пробитого ізолятора була розрахована за відомою формулою 10, одержаною із закону повного струму

$$F = \frac{I^2}{\mu_0 \left(\frac{2\pi R}{\mu} + \frac{\delta}{\mu_g} \right)^2} \cdot S, \quad (10)$$

де I – струм короткого замикання, S – площа перерізу феромагнітних півкільць, R – радіус феромагнітних півкільць, δ – величина повітряного зазору між півкільцями.

а

б

Рис. 7. Індикатор пробою закріплений на полімерному ізоляторі:

а – в режимі чергування;

б – індикатор сигналізує про пробій ізолятора.

Лабораторні випробування дослідних зразків індикаторів пробою на визначення порогу спрацювання за струмом показали, що впевнене спрацювання дослідних зразків спостерігається при струмі промислової частоти більше 6 кА при тривалості протікання струму – 6 повних періодів. Перекриття ізоляторів зі встановленими на них індикаторами пробою стандартним комутаційним імпульсом не призводить до спрацювання індикаторів. Це свідчить про те, що при грозовому перекрытті ізолятору, після якого ізоляційні властивості зберігаються, хибного спрацювання індикатора не станеться.

ВИСНОВКИ

Виконані в дисертаційній роботі дослідження дозволили розв'язати науково-практичну задачу удосконалення конструкції високовольтних полімерних ізоляторів шляхом підвищення їх електричної та механічної міцності в умовах одночасної дії сильного електричного поля, механічних навантажень та кліматичних факторів.

1. Досліджено розподіл сильного електричного поля на поверхні тороїдальних екранів та склопластикових стрижнях високовольтних полімерних ізоляторів на класи напруги 220 – 750 кВ з урахуванням екрануючої дії розщепленої фази та обвідного шлейфу. Достовірність розрахунків підтверджена експериментально. Показано, що обвідний шлейф на анкерних опорах в натяжній полімерній підвісці чинить суттєвий екрануючий вплив, знижуючи напруженість електричного поля як в склопластику, так і на екрані. Це дає підставу прийняти геометричні розміри та конструкцію екранів однаковими для натяжних та підвісних ізоляторів. Розроблено рекомендації щодо вибору екранної арматури для високовольтних полімерних ізоляторів.

2. Досліджено можливість застосування силіконових гум адитивної вулканізації для створення суцільнолитих захисних оболонок високовольтних полімерних ізоляторів. Показано, що застосування силіконових гум адитивної вулканізації замість пероксидних дозволяє істотно знизити температуру термообробки та здійснити вулканізацію гум за одну стадію, усунувши терморозтріскування склопластикового стрижня та виділення газоподібних побічних продуктів, які викликають зниження електричної міцності ізолятора.

Встановлено, що при адитивній вулканізації технологічна стабільність адгезійного зв'язку гуми з поверхнею склопластикового стрижня досягається шляхом ретельної ізоляції платинового каталізатора від слідів амінного прискорювача, що присутній в епоксидній зв'язці та виступає на поверхню склопластику при нагріванні в ливарній формі.

Експериментальним шляхом встановлено, що однією з причин внутрішнього пробою полімерних ізоляторів є усадка та виділення агресивних до металу побічних продуктів при конденсаційній вулканізації силіконових герметиків, що традиційно використовуються. Застосування двохкомпонентних рідких гум адитивної вулканізації усуває це явище, що забезпечує надійну герметизацію силових вузлів та високу електричну міцність ізоляторів в експлуатаційних умовах.

3. Досліджено електрофізичні процеси в склопластикових стрижнях полімерних ізоляторів, що передують «крихкому руйнуванню» в сильному електричному полі. Показано, що у разі розгерметизації силових вузлів високовольтних полімерних ізоляторів електростатичне екранування не захистить ізолятор від «крихкого руйнування». Застосування склопластикових стрижнів на базі безборного скловолокна *ECR* в конструкціях високовольтних полімерних ізоляторів більш ніж на два порядки підвищує їх стійкість до «крихкого руйнування».

4. Комплексні дослідження ізоляторів нового покоління які були розроблено та виготовлено відповідно наведених рекомендацій щодо матеріалів, конструкції і технології підтвердили ефективність наведених у дисертації рішень.

5. Для контролю цілісності ізоляторів розроблений індикатор електрично-го пробоя ізоляторів, який дозволяє візуально виявити полімерний ізолятор що пробився в аварійній повітряної лінії електропередавання.

6. Основні результати досліджень, представлені в дисертаційній роботі, використані при розробці нових конструкцій та технології виготовлення полімерних ізоляторів на класи напруги 3,3 – 750 кВ з підвищеною електричною та механічною стійкістю, масове виробництво яких освоєно Науково-виробничим підприємством «ЕС Полімер». Результати досліджень також використані при розробці та поставленні на виробництво нових конструкцій обмежувачів перенапруг та прохідних ізоляторів з кремнійорганичною силіконовою ізоляцією.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шумилов М.Ю. Проблемы разработки ограничителей перенапряжений для контактной сети железнодорожного транспорта постоянного тока / М.Ю. Шумилов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 7. – С. 138 – 143.

2. Шумилов М.Ю. Изучение капиллярного проникновения воды вдоль стеклопластиковых стержней полимерных изоляторов / М.Ю. Шумилов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 42. – С. 110 – 115.

3. Шумилов М.Ю. Расчет электростатических полей и экранной арматуры полимерных изоляционных подвесок в пакете моделирования Femlab / М.Ю. Шумилов, Б.Г. Набока, А.Д. Подольцев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 7. – С. 30 – 37.

Здобувачем виконаний розрахунок електростатичних полів полімерних ізоляційних підвісок.

4. Шумилов М.Ю. Обеспечение надежности полимерных изоляторов с цельнолитыми защитными оболочками / М.Ю. Шумилов, Ю.Н. Шумилов, Б.Г. Набока // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 34 – С. 92 – 101.

Здобувачем сформульовані основні задачі досліджень, метою яких є покращення конструкцій полімерних ізоляторів.

5. Шумилов М.Ю. Индикатор пробоя полимерных изоляторов / М.Ю. Шумилов, Ю.Н. Шумилов, Б.Г. Набока // Энергетика та електрифікація. – Київ: ЗАТ «Нічлава». – 2009. – № 10 – С. 36 – 39.

Здобувачем виготовлені дослідні зразки індикатора пробоя та складена програма випробувань.

6. Патент України на корисну модель № 31083, МПК (2006) H01C 7/12, H01T 1/00. Пристрій для захисту від перенапруг // Кульматицький В.В., Шумілов Ю.М., Шумілов М.Ю. – Опубл. Бюл. № 6, 25.03.2008. – 4 с.

Здобувачем виготовлені та випробувані експериментальні зразки пристрою для захисту від перенапруг.

7. Патент України на корисну модель № 34860, МПК (2006) H01B 17/26. Прохідний ізолятор // Кульматицький В.В., Шумілов Ю.М., Шумілов М.Ю., – Опубл. Бюл. № 16, 26.08.2008. – 4 с.

Здобувачем виконаний розрахунок напруженості електричного поля у склопластиковій ізоляції прохідного ізолятора.

8. Патент України на корисну модель № 34995, МПК (2006) H02H 3/20. Пристрій для захисту від перенапруг (ПЗПН) // Кульматицький В.В., Куks С.В., Шумілов Ю.М., Шумілов М.Ю., – Опубл. Бюл. № 16, 26.08.2008. – 4 с.

Здобувачем складена програма та проведені дослідні випробування пристрою для захисту від перенапруг (ПЗПН).

9. Патент України № 84497, МПК (2006) G01R 31/08. Пристрій для візуального виявлення електричного пробоя електроустаткування ліній електропередачі // Кульматицький В.В., Шумілов Ю.М., Шумілов М.Ю., Куks С.В. – Опубл. Бюл. № 20, 27.10.2008. – 4 с.

Здобувачем виконаний розрахунок зусилля змикання феромагнітних півкільць елементу контролю струму індикатора пробоя.

10. Шумілов М.Ю. Сравнительные характеристики стеклопластиковых стержней высоковольтных полимерных изоляторов / М.Ю. Шумілов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 42. – С. 116 – 121.

11. Шумілов М.Ю. Исследование деформативных характеристик однонаправленных стеклопластиков при изгибе / В.В. Рацлав, М.Ю. Шумілов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 42. – С. 97 – 104.

Здобувачем виконаний експеримент по визначенню залишкового прогину склопластикового стрижня.

12. Шумілов М.Ю. Совершенствование конструкции электростатических экранов для высоковольтных полимерных изоляторов / Ю.Н. Шумілов, М.Ю. Шумілов // Электрические сети и системы. – Киев: ООО «Гнозис». – 2009. – № 3 – С. 25 – 28.

Здобувачем виконані розрахунки розподілу електричного поля полімерних ізоляційних підвісок з врахуванням впливу фазного проводу та обвідного шлейфа.

АНОТАЦІЇ

Шумілов М.Ю. Підвищення електричної та механічної міцності високовольтних полімерних ізоляторів в умовах комплексної дії експлуатаційних факторів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. – На-

ціональний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2010.

Дисертація присвячена удосконаленню технічних та технологічних розробок, спрямованих на створення нового покоління високовольтних полімерних ізоляторів на класи напруги 3,3 – 750 кВ з підвищеними технічними характеристиками, а саме, з підвищеною стійкістю до проникнення вологи, «крихкого руйнування», підвищеною електричною і механічною міцністю в умовах комплексної дії експлуатаційних факторів.

Поставлена мета була досягнута за рахунок вдосконалення конструкції ізолятора шляхом раціоналізації екранної арматури, застосування суцільнолітої захисної оболонки і застосування нових діелектричних матеріалів.

Для контролю цілісності ізоляторів на повітряній лінії було розроблено індикатор електричного пробою ізоляторів.

Основні результати досліджень, представлені в дисертаційній роботі, використані при розробці нових конструкцій і технології виготовлення полімерних ізоляторів на класи напруги 3,3 – 750 кВ з підвищеною електричною і механічною міцністю, масове виробництво яких було освоєно Науково-виробничим підприємством «ES Полімер».

Ключові слова: сильне електричне поле, висока напруга, полімерні ізолятори, електрична міцність, крихке руйнування, електростатичні екрани, діелектричні матеріали.

Шумилов М.Ю. Повышение электрической и механической прочности высоковольтных полимерных изоляторов в условиях комплексного воздействия эксплуатационных факторов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2010.

Диссертация посвящена усовершенствованию технических и технологических разработок, направленных на создание нового поколения высоковольтных полимерных изоляторов на классы напряжения 3,3 – 750 кВ с повышенными техническими характеристиками, а именно, с повышенной устойчивостью к проникновению влаги, «хрупкому разрушению», повышенной электрической и механической прочности в условиях комплексного воздействия эксплуатационных факторов.

Поставленная цель была достигнута за счет совершенствования конструкции изолятора путем рационализации экранной арматуры, применения цельнолитой защитной оболочки и применения новых диэлектрических материалов.

Проведен расчет распределения электрического поля полимерной подвески 220 – 750 кВ с учетом экранирующего действия фазного провода, обводного шлейфа в натяжных подвесках и траверсы металлических опор.

Для выбора экономичного варианта экранов составлены таблицы с указанием напряженности возникновения коронных разрядов на экране и частичных

разрядов в стеклопластике в зависимости от геометрических размеров тороидальных экранов.

Показано, что при получении цельнолитой защитной оболочки, применение силиконовых резин аддитивной вулканизации вместо пероксидных позволяет существенно снизить температуру термообработки и осуществлять вулканизацию резин в одну стадию, устранив терморастрескивание стеклопластикового стержня и выделение газообразных побочных продуктов, вызывающих снижение электрической прочности изолятора. Применение двухкомпонентных жидких резин каталитической вулканизации устраняет: усадку и выделение агрессивных к металлу побочных продуктов при герметизации силовых узлов, обеспечивая повышенную электрическую прочность изоляторов в эксплуатационных условиях.

Экспериментальным путем показано, что применение стеклопластиковых стержней на базе безборного стекловолокна типа *ECR* более чем на два порядка повышает их устойчивость к «хрупкому разрушению».

Для контроля целостности изоляторов на линии разработан индикатор электрического пробоя изоляторов.

Основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе, использованы при разработке новых конструкций и технологии изготовления полимерных изоляторов на классы напряжения 3,3 – 750 кВ с повышенной электрической и механической прочностью, массовое производство которых освоено Научно-производственным предприятием «ES Полимер».

Ключевые слова: сильное электрическое поле, высокое напряжение, полимерные изоляторы, электрическая прочность, хрупкое разрушение, электростатические экраны, диэлектрические материалы.

Shumilov M.Y. The Improvement of Electrical and Mechanical Strength of High-voltage Polymeric Insulators under the Influence of Combined Operational Factors. – Script.

PhD thesis in field 05.09.13 – Technique of high electric and magnetic fields. – The National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2010.

The thesis is devoted to scientific substantiation of engineering developments aimed at creation of 3,3 – 750 kV high-voltage polymeric insulators of new generation having high quality and reliability indices, i.e. improved resistance to moisture penetration, brittle fracture, electrical and mechanical strength under the influence of combined operational factors.

The assigned object was achieved at the expense of the insulator design improvement by means of control rings optimization and the use of one-piece weathershed housing and new dielectric materials.

A puncture indicator for on-line monitoring of insulator integrity was developed.

The main research results described in the thesis were used in development of new designs and manufacturing technique of 3,3 – 750 kV insulators of improved electrical and mechanical strength, the mass production of which was launched by the company ES Polymer Ltd.

Key words: high electric field, high voltage, polymeric insulators, electric strength, brittle fracture, electrostatic control rings, dielectric materials mass production.