

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Пономарьов Петро Євгенович

УДК 621.315.62.001(043)

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБУ ГІДРОФОБІЗАЦІЇ
ІЗОЛЯЦІЙНОЇ ПОВЕРХНІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Спеціальність 05.09.13 - Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2009

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гурин Анатолій Григорович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри електроізоляційної та
кабельної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бржезицький Володимир Олександрович,
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри техніки та електрофізики
високих напруг

кандидат технічних наук, доцент
Котиш Андрій Іванович,
Кіровоградський національний технічний
університет, доцент кафедри
електротехнічних систем

Захист відбудеться « 10 » грудня 2009 р. о 12 годині 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у 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 « 7 » жовтня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Юр'єва О.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Експлуатація зовнішньої ізоляції в районах з високим ступенем забруднення атмосфери (СЗА) має ряд особливостей, пов'язаних з одночасною дією забруднень, що випадають на її поверхню, кліматичних чинників і прикладеної напруги. Дослідам по вивченню цих особливостей та розв'язанням зв'язаних з ними проблемам по підвищенню надійності високовольтних ізоляторів постійно приділяли увагу у Національному технічному університеті України «КПІ» (м. Київ), Національному технічному університеті «ХПІ» (м. Харків), Науково-дослідному інституті високих напруг (м. Слов'янськ), СибНДІЕ (м. Новосибірськ) та ін. Завдяки впровадженню отриманих результатів та рекомендацій правильний вибір лінійної і підстанційної ізоляції, що працює в забруднених районах, в більшості випадків, забезпечує надійну роботу повітряних ліній і відкритих розподільчих пристроїв без яких-небудь додаткових експлуатаційних заходів. Проте, економічний і соціальний розвиток в деяких випадках приводить до появи нових джерел забруднення ізоляції, які можуть значно погіршити умови її експлуатації.

Аналізуючи досвід експлуатації ізоляції в районах із забрудненнями різної природи і інтенсивності були встановлені деякі особливості зниження її надійності, а у ряді випадків і руйнування, пов'язані з термічною і електрохімічною діями від струмів витоку і поверхневих розрядів. Запобігання умовам виникнення поверхневих розрядів шляхом посилення ізоляції за рахунок повної або часткової заміни ізоляторів старих типів на нові, що спроектовані з урахуванням досвіду експлуатації і досягнень науки, вимагає великих капітальних витрат, і часом веде до збільшення габаритних розмірів, що не завжди прийнятно. Профілактичні заходи, що застосовуються в даний час в енергосистемах країн СНД (очищення і обмив ізоляції, нанесення гідрофобних паст і вазелінів) виконуються вручну і, в більшості випадків, для районів з V–VII СЗА не рідше 1–2 рази на рік.

Вказані вище проблеми і обумовлюють актуальність дисертаційної роботи, яка спрямована на удосконалення технології відновлення і посилення зовнішньої ізоляції, що експлуатується в районах з V–VII СЗА, шляхом нанесення гідрофобного покриття з високою хімічною і термічною стійкістю на основі кремнійорганічного компаунда холодного затвердіння і впровадження її в енергосистемах.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася на кафедрі електроізоляційної і кабельної техніки НТУ «ХПІ» та ДП «НДІВН» відповідно до планів науково-дослідних робіт по виконанню: держбюджетної теми «Разработка состава, технологии нанесения и эксплуатационная проверка новых герметизирующих и гидрофобных покрытий для токоведущих частей и изоляторов КРУН» (Мінпаливенерго, Ц 18.014-0-93); договору на виконання науково-технічної роботи

«Розробка методики посилення підстанційної ізоляції» (ОЕП «ГРІФРЕ» Мінпаливенерго), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення технології відновлення і посилення зовнішньої фарфорової і скляної високовольтної ізоляції шляхом механізованого нанесення в польових умовах гідрофобного покриття (на основі кремнійорганічного компаунду) для районів з високим рівнем забруднення атмосфери та дослідження електрофізичних процесів на його поверхні при складних умовах експлуатації.

Для досягнення цієї мети були вирішені такі завдання:

- проаналізовано методи забезпечення надійності ізоляції в районах з високою СЗА;
- проведено теоретичне і експериментальне дослідження впливу наповнювачів, що додаються до складу композиції на основі кремнійорганічного компаунда для підвищення стійкості одержуваних покриттів до експлуатаційних дій;
- проведено аналіз змін у розподілі напруженостей електричного поля на поверхні ізоляторів після нанесення полімерного покриття;
- досліджено динаміку зміни електрофізичних характеристик покриття в умовах дії сильних електричних полів і коронного розряду;
- досліджено особливості розвитку електрофізичних процесів на поверхні ізоляції з кремнійорганічним покриттям в екстремальних умовах забруднення;
- проведено оптимізацію складу композиції за даними лабораторних випробувань зразків;
- відкореговано технологію механізованого нанесення гідрофобного покриття (оптимізованого складу) для застосування її в польових умовах;
- проведено роботи з використанням удосконаленого способу гідрофобізації на діючих енергооб'єктах класу 3,3–330 кВ.

Об'єкт дослідження – діелектричні і експлуатаційні характеристики гідрофобного покриття холодного затвердіння для високовольтних ізоляторів.

Предмет дослідження – склад композиції для нанесення на поверхню зовнішньої ізоляції гідрофобного покриття холодного затвердіння, яка придатна до механізованого нанесення в польових умовах на діючих енергооб'єктах.

Методи дослідження – засновані на використанні теорії електромагнітного поля для дослідження розподілу напруженості електричного поля на поверхні ізоляції з кремнійорганічним гідрофобним покриттям, теорії діелектричної проникливості для дослідження впливу зволоження на характеристики складних діелектриків, теорії коронного розряду для дослідження дії коронного розряду на тверді кремнійорганічні покриття, теорій полімеризації і окислювально-відновних реакцій для дослідження процесів деструкції на поверхні кремнійорганічних полімерів під дією коронного розряду, теорії планування експерименту для

дослідження по визначенню оптимізованого складу гідрофобізуючої композиції, теорії електричного розряду вздовж забрудненої і зволоженої ізоляційної поверхні для дослідження експлуатаційних характеристик гідрофобізованих ізоляторів, методів математичної статистики і апроксимації функцій для дослідження даних лабораторних експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що

- досліджено вплив різних наповнювачів, що вводяться до складу композиції на основі кремнійорганічного компаунду ЕКП-102, на властивості отриманого покриття;

- отримані залежності самовідновлення гідрофобних властивостей твердих кремнійорганічних покриттів після короткочасної (10 хв.) дії коронного розряду;

- наведено механізм деструкції твердого кремнійорганічного покриття в умовах тривалої дії електричного поля високої напруженості і коронного розряду;

- вперше сформульовані критерії оптимізації складу гідрофобізуючої композиції для застосування у районах з високим рівнем забрудненості;

- вперше запропоновано додавати до складу гідрофобізуючої композиції низькомолекулярну кремнійорганічну рідину, яка не вступає у реакції полімеризації в кількості 1 % від маси компаунду;

- вперше досліджені залежності величини токів витоку, максимальної амплітуди і тривалості поверхневих розрядів на поверхні ізоляторів з твердим кремнійорганічним покриттям при випробуваннях на трекінгерозійну стійкість при примусовому зволоженні розчином CaCl_2 ;

- систематизовані особливості розвитку електрофізичних процесів на поверхні ізоляції з кремнійорганічним гідрофобним покриттям і без нього в екстремальних умовах забруднення, зокрема при обмерзанні і відтаванні.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновано для відновлення і посилення зовнішньої високовольтної ізоляції в районах з високим ступенем забруднення атмосфери, оптимізований склад гідрофобної композиції, ефективність якого підтверджується: 7-річним позитивним досвідом експлуатації на підстанціях Єнакіївського металургійного заводу; 5-річним – на підстанції Маріупольського металургійного заводу ім. Ілліча; 4–5 річним – на підстанціях металургійного комбінату «Запоріжсталь», запорізького заводу феросплавів, запорізького заводу алюмінієвих конструкцій.

Вдосконалена технологія механізованого нанесення гідрофобного покриття на діючих енергооб'єктах. Розроблені рекомендації по коректуванню технологічних параметрів механізованого нанесення покриття холодного отвердіння в польових умовах залежно від вживаного устаткування і умов навколишнього середовища.

Основні положення дисертаційної роботи впроваджено до галузевого нормативного документа Міністерства палива і енергетики України ГНД 34.03.603-2004 «Методика посилення підстанційної ізоляції із

застосуванням гідрофобного покриття на основі кремнійорганічного полімерного компаунда холодного отвердіння ЕКП 102Е».

Особистий внесок здобувача полягає у наступному:

- визначені компоненти, котрі поліпшують стійкість покриття на основі компаунду ЕКП-102 до дії коронного і поверхневих розрядів і їх вплив на діелектричні характеристики;
- запропоновано вводити до складу гідрофобізуючої композиції низькомолекулярну кремнійорганічну рідину, яка не вступає у реакції полімерізації в кількості 1 % від маси компаунду для підвищення вологостійкості покриття і самовідновлення його гідрофобних властивостей;
- визначено поєднання тих чинників, що викликають «місцеву» втрату покриттям гідрофобних властивостей;
- уточнені основні параметри техпроцесу механізованого нанесення гідрофобного покриття холодного затвердіння в польових умовах;
- досліджені процеси деструкції покриття на основі кремнійорганічних полімерів при тривалій дії коронного розряду;
- оптимізовано склад композиції для гідрофобізації зовнішньої ізоляції в районах з високим рівнем забруднення;
- досліджено вплив твердого кремнійорганічного покриття, нанесеного на поверхню високовольтних ізоляторів, на зміни в розподілі напруженості електричного поля на їх поверхні.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на: науково-технічному семінарі «Нові розробки у області електричної ізоляції» (Харків, 2003 р.), міжнародній спеціалізованій виставці і семінарі «Электрические сети России» (Москва, 2004 р.), республіканському науково-технічному семінарі «Нові розробки у області електричної ізоляції» (Харків, 2005 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Дніпропетровськ, 2006 р.), міжнародному симпозіумі «Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов» (Харків, 2006 р.).

Публікації: основні результати дисертації опубліковані в 12 наукових роботах, серед них 8 статей у наукових фахових виданнях ВАК України, 1 патент на винахід і 1 галузевий нормативний документ.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступної частини, 4-х розділів, висновків, 3-х додатків і списку використаних джерел. Дисертація викладена на 198 сторінках, ілюстрована 60 рисунками на 19 окремих сторінках та 36 рисунками по тексту, 19 таблицями на 4 окремих сторінках та 15 таблицями по тексту; три додатки на 14 сторінках, список використаних джерел складається з 153 найменувань на 18 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, визначені об'єкт і предмет досліджень, встановлені методи

досліджень, показані наукова новизна і практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі на прикладах з досвіду експлуатації показано значення забезпечення надійності зовнішньої ізоляції в районах із забрудненою атмосферою. Розглянутий механізм утворення розрядів при зволоженні забрудненої поверхні ізоляторів і чинники, що визначають напругу перекриття забруднених ізоляторів. Розглянуті основні напрями в створенні ізоляційних конструкцій для забруднених районів.

Проаналізовані переваги і недоліки профілактичних заходів, що проводяться на ізоляції діючих енергооб'єктів. Показані перспективи застосування гідрофобних покриттів на основі кремнійорганічних каучуків холодної вулканізації. Розглянуті особливості будови і полімеризації кремнійорганічних полімерів холодного затвердіння. Серед них найбільший практичний інтерес для отримання гідрофобних покриттів мають поліорганосілоксани, тому що: по-перше, міцність їх основного ланцюгу максимальна і деструкція відбуватиметься в першу чергу по бічним ланцюгам, обумовлюючи меншу швидкість руйнування; по-друге, на поверхні скла і фарфору відбувається орієнтація кремнійорганічних молекул в плівці: органічний радикал у бік навколишнього середовища, а зв'язок – Si – O – до поверхні матеріалу, внаслідок чого утворюється захисна плівка, що володіє гідрофобними властивостями (Рис.1).

Рис.1. Орієнтація кремнійорганічних молекул на поверхні скла.

У другому розділі обґрунтовано вибір кремнійорганічного компаунду ЕКП-102 в якості основи композиції для отримання гідрофобного покриття холодного затвердіння. Проведено аналіз опублікованої інформації про вплив на властивості полімерів речовин що додатково додають до складу композиції. Обрано ряд найбільш доступних речовин поліпшуючих експлуатаційні властивості покриття і проведено попередній відбір за наслідками спостереження за перебігом полімеризації і оцінки якості його поверхні.

Покриття призначені для відновлення і посилення зовнішньої ізоляції високих класів напруги повинні мати високі діелектричні характеристики. На підставі аналізу показників нормованих для кремнійорганічних гум що застосовуються у виробництві полімерних ізоляторів і кремнійорганічної пасти КПД, яка широко використовується при гідрофобізації в енерго-підприємствах України, в якості вимог до діелектричних характеристик гідрофобного покриття для зовнішньої ізоляції прийняті наступні значення:

- в сухому стані - $\rho_v \geq 1 \times 10^{14}$ Ом \times см, $\text{tg } \delta \leq 0,01$;
- після 24 годин зволоження - $\rho_v \geq 5 \times 10^{13}$ Ом \times см, $\text{tg } \delta \leq 0,01$, $\epsilon \leq 3,5$.

По результатам виміру діелектричних характеристик зразків одержані експериментальні залежності діелектричних характеристик покриттів (у сухому стані і після зволоження). При збільшенні частки поліметилсилоксанової рідини ПМС-100, що використовувався для часткової

заміни «сольвенту нафтового», ρ_v одержуваного покриття збільшується, а $\text{tg } \delta$ і ε зменшуються. Із зростанням кількості сажі ацетиленової, діоксиду титана, оксиду заліза (II), оксиду і гідрата окисла алюмінію, що додаються до складу композиції, ρ_v покриття зменшується, а $\text{tg } \delta$ і ε збільшуються. Найзначніше з них змінюються $\text{tg } \delta$ (Рис.2) і ε (Рис.3), зміряні після 24 годин зволоження в дистильованій воді, і при певній частці компоненту у складі композиції можуть перевищити значення, що прийняті як граничні.

Рис.2 Залежності $\text{tg } \delta$ покриття після 24 ч зволоження від змісту наповнювача

Рис.3 Залежності ε покриття після 24 ч зволоження від змісту наповнювача.

Виконана оцінка змін в розподілі напруженостей у ізоляційних конструкцій після нанесення на їх поверхню полімерного покриття, за допомогою пакету прикладних програм «PRIZ» для моделювання на ЕОМ двумірних полів потенціалу і електричної напруженості. Для цього були побудовані дві моделі відповідні одним з найпоширеніших типів високовольтних ізоляторів: лінійному підвісному ПС 70Д і опорно-стрижньовому ІОС 110/600. Полімерне покриття задавалося як тонкий шар завтовшки від 0,1 до 0,3 мм на межі розділу між ізоляційним матеріалом і повітрям. Виконані розрахунки показали, що нанесення кремнійорганічного полімерного покриття на опорні ізолятори не впливає істотно на зміну розподілу напруженості електричного поля на ізоляційній поверхні (зміни складають близько 0,1 %, і знаходяться в межах погрішності розрахунку). При нанесенні покриття на ізолятори тарілчатого типу слід чекати незначного «вирівнювання» поля (зниження максимальної напруженості на ~ 2 %).

Відзначено, що тверді гідрофобні покриття, призначені для експлуатації на електроустаткуванні високих класів напруги у районах з високим СЗА, повинні бути стійкими до дії: дужок поверхневих розрядів, перепаду температур, сонячної радіації і коронного розряду.

Випробування на дугостійкість двокомпонентних композицій (компаунд + речовина, що додатково додаються), що проводилися на металевих зразках з полімерним покриттям на поверхні за методом провідного містка в умовах дії слабкострумової дуги високої напруги, показали два основні етапи при руйнуванні покриття електричною дугою:

1. Поява трека у вигляді руйнування (обвуглювання) поверхневого шару покриття, при цьому дуга не гасне (отже покриття зберігає високі електроізоляційні властивості);
2. Руйнування – вигорання покриття на більш ніж 50% його товщини, розм'якшення шару, що залишився, і його електричний пробій, при цьому дуга гасне.

Одержані залежності вірогідності прогорання покриттів від часу випробувань (приклад на рис.4) і обчислена середньоарифметична величина їх дугостійкості. Аналіз отриманих результатів не виявив чіткого зв'язку між товщиною покриття і часом його руйнування під дією електричної дуги.

Проведені прискорені кліматичні випробування підтвердили стійкість гідрофобних і діелектричних характеристик покриттів на основі компаунду ЕКП-102 до кліматичних чинників що діють на території України.

Досліджена динаміка відновлення гідрофобності для покриттів після короткочасної дії коронного розряду. Кращі показники були одержані для тих зразків, до складу яких була введена низькомолекулярна кремнійорганічна рідина К-119/215, або була збільшена кількість сажі. Це підтверджує припущення про те, що відновлення гідрофобності пов'язано з дифузією низькомолекулярних кремнійорганічних з'єднань з шару покриття до його поверхні і можливістю атомів С «зв'язувати» активні атоми кисню.

Рис.4. Вірогідність прогорання при випробуваннях на дугостійкість покриття з гідратом окису алюмінія в якості наповнювача

Експериментально доведено, що електричне поле з напруженістю до 80 кВ/см без присутності озону не приводить до втрати гідрофобних властивостей покриттів, одержаних на основі силоксанових полімерів.

Третій розділ присвячений оптимізації складу гідрофобної композиції на основі кремнійорганічного компаунду ЕКП-102. За наслідками аналізу фізичних характеристик кремнійорганічних покриттів холодного затвердіння і методів їх вимірювання визначені критерії найбільш важливі для порівняння експлуатаційних характеристик.

Обгрунтований вибір параметра оптимізації (приріст маси після зволоження Δm) і обмежуючих параметрів при проведенні факторного експерименту. Проаналізовані переваги і недоліки речовин, що додаються до складу композиції (на підставі результатів випробувань, приведених в другому розділі). Визначені компоненти (чинники) що найпозитивніше впливають на властивості одержуваних полімерних покриттів і інтервали їх варіації. Складена матриця планування для проведення дробового факторного експерименту: 8 складів гідрофобізуючої композиції, кожен із яких складається з компаунду ЕКП-102 і 3-х наповнювачів.

На підставі отриманих експериментальних даних були визначені коефіцієнти рівняння регресії (залежності параметру оптимізації від кількості кожного з наповнювачів у складі композиції). Перевірка моделі досліджуемого процесу шляхом порівняння значення критерію Фішера з табличною величиною підтвердила її адекватність і близькість області оптимуму до обраних інтервалів варіації факторів.

Дослідження стійкості до тривалої дії коронного розряду на силоксанові полімерні матеріали проводилися виходячи з того, що напруженості електричного поля поблизу металевої арматури ізоляційних

конструкцій класів напруги 330 кВ і вище достатні для його існування при робочих режимах.

Передбачалося, що руйнування кремнійорганічних полімерів в умовах дії коронного розряду проходить за схемами аналогічними термоокислювальної деструкції, що включає два незалежні основні процеси:

1. Окислення бічних груп – відщеплення гідрофобних груп – CH_3 і поява на їх місці гідрофільних груп – OH ;
2. Розрив основного ланцюга полімеру з виділенням низькомолекулярних летючих продуктів;

які виражаються, відповідно у втраті гідрофобності на поверхні і деструкції покриття.

Випробування проходили в кліматичній камері за схемою приведеною на рис. 5 при випробувальній напрузі 7 кВ і температурі 20 °С. Тривалість випробувань склала 60 діб.

Рис. 5 Схема випробувань на тривалу дію коронного розряду.

Спостереження за станом поверхні показали, що процеси деструкції протікають на обмеженій області (на відстані не більше 6–7 мм від краю високовольтного електроду) з високими значеннями напруженості електричного поля. Зменшення маси після 10 діб випробувань набуває лінійного характеру. Виходячи з припущення, що деструкція покриття зосереджена в обмеженій області і рівномірна по всій його площі, швидкості руйнування під впливом коронного розряду можна визначити по формулі

$$v_p = \frac{\Delta m \times S_0 \times h_{\text{пк}}}{S_{\text{кр}} \times m_0 \times t_{\text{кр}}}, \quad (1)$$

де Δm – зменшення маси зразка; m_0 – початкова маса зразка; S_0 – площа поверхні зразка; $S_{\text{кр}}$ – площа поверхні що піддавалася дії корони; $h_{\text{пк}}$ – товщина зразка; $t_{\text{кр}}$ – тривалість дії коронного розряду.

Відповідно до схеми випробувань за допомогою програмного пакету PRIZ була побудована модель і виконані розрахунки розподілу напруженостей електричного поля. З одержаної залежності значень напруженості в повітрі від відстані до центру зразка (рис.6) витікає, що процеси деструкції знаходяться у області поверхні над якій напруженість в повітрі має значення ≥ 5 кВ/см.

Рис.6. Значення напруженості поля в повітрі на поверхні покриття залежно від відстані до центру зразка

На реальних ізоляційних конструкціях навіть у разі короткочасного підвищення напруги (в кілька разів вище робочої) розміри такої області (де передбачається втрата гідрофобності) не перевищують 5 % загального

розміру. Отже, істотного зниження вологорозрядних характеристик від дії коронного розряду не очікується.

На підставі комплексного аналізу всіх даних про зміну характеристик випробовуваних зразків (m , v , $tg \delta$, ϵ) спільно з наявною інформацією про механізми окислення кремнійорганічних полімерів, зроблені висновки про припустимий механізм фізико-хімічного «руйнування» гідрофобного покриття досліджуваного типу.

Розглянуті деякі особливості зволоження твердих гідрофобних полімерних покриттів малої товщини ($\sim 0,2$ мм). Спостереження за змінами розміру краплин води на поверхні зразка з твердим сілоксановим покриттям поверхні показали, що значення кута змочування складали від 90° до 95° . По мірі збільшення зволоження, на поверхні кремнійорганічного покриття при злитті сусідніх краплин здійснюється «втягування» одної з краплин до об'єму другої, що супроводжується зменшенням сумарної площини займаної поверхні. Виходячи з припущення, що усі краплини на поверхні покриття мають форму півсфери, була отримана залежність частки зволоженої площини поверхні від розміру густини зволоження ($\Theta_{\text{ув}} = S_k/S_0 = f_2(\Delta m/S)$), наведеної на рис.7.

Рис.7. Залежність частки зволоженої поверхні (S_k/S_0) кремнійорганічного покриття від густини зволоження ($\Delta m/S$)

Приймаючи до уваги дані особливості, поверхневий шар при зволоженні сілоксанового покриття розглядався як складний діелектрик, що уявляє собою суміш послідовно з'єднаних повітряних та зволожуючих компонентів. При цьому товщина поверхневого шару прирівнювалась радіусу краплин осаджуваної вологи і відповідно виявлялась функцією від густини зволоження поверхні ($h_{\text{сл}} = r_k = f_1(\Delta m/S)$).

Виходячи з умови рівномірного зволоження поверхні, було прийнято, що на кожному відрізку по поверхні покриття спрямованого від центру зразка до його краю (радіусу зразка r_0) знаходиться однакове число краплин (N_i) рівного розміру. Тоді цей відрізок можна умовно розділити на N_i відрізків довжиною l_N з краплиною води посередині (як зображено на рис.8).

Рис.8. Схема розташування краплин на поверхні покриття.

Для прийнятих припущень отримані розрахункові залежності значень потенціалу (φ_i) та напруженності ($E_{i\text{-факт}}$) (на відстані r_i від центру) для зразка з твердим полімерним покриттям у зволоженому стані

$$\varphi_i = U \left(1 - \frac{\ln\left(\frac{r_i}{r}\right) \times \epsilon_\phi \times ((r_i + l_i)^2 - r_i^2) \times (p_w \times f_1(\Delta m/S) - \Delta m/S)}{2h_\phi \times p_w \times f_1^2(\Delta m/S) + \ln\left(\frac{r_i}{r}\right) \times \epsilon_\phi \times ((r_i + l_i)^2 - r_i^2) \times (p_w \times f_1(\Delta m/S) - \Delta m/S)} \right), \quad (2)$$

$$E_{i-sp} = \frac{\varphi_i + \varphi_{i+1}}{l_i \left(1 - \frac{\pi \times f_1 (\Delta m / S)}{2 f_2 (\Delta m / S) \times r_0}\right)}, \quad (3)$$

де r_i – відстань до центру зразка; r – радіус високовольтного електрода; l_i – ширина i -го участку поверхні (дорівнювалась l_N); ε_ϕ – відносна діелектрична проникність фарфору; h_ϕ – товщина фарфорового зразка; p_w – густина зволожуючої рідини (води).

Були зроблені розрахунки значень напруженості поля на поверхні зразка з твердим кремнійорганічним покриттям та без нього в залежності від відстані до центру зразка у сухому стані та при різній густині зволоження поверхні. Аналіз цих отриманих залежностей дозволив зробити висновки, що нанесення сілоксанового покриття випробуваного типу дозволяє «сгладжувати» напруженість електричного поля поблизу високовольтного електрода, то бж підвисити значення напруги появи корони та часткових розрядів. При цьому належить очікувати деякого зростання токів витоку при сухому стані поверхні, але для районів з підвищеним рівнем забрудненості це неважливо із-за випадваючих забруднень.

Приведені результати випробувань на трекінгоерозійну стійкість гірлянд ізоляторів ПФ-70В (по 3 шт.) проведених по методиці випробування полімерних ізоляторів згідно ГОСТ 28856-90 та СОУ МПЕ 40.1.51.301:2004 в умовах зволоження водним розчином CaCl_2 . Для кожної випробовуваної гірлянди періодично здійснювалася реєстрація струмів витоку (Рис. 9).

Рис.9. Схема каналу зв'язку з ЕОМ для реєстрації струмів витоку.

Всі випробувані гідрофобізовані ізолятори випробування витримали і можуть експлуатуватися в районах з високим рівнем забруднення атмосфери до VII СЗА включно. Не дивлячись на примусове рівномірне забруднення ізоляційної поверхні струми витоку через гідрофобізовані ізолятори були в 1,5–2 рази менше ніж через ізолятори без покриття. Максимальні значення амплітуди сили струму поверхневих розрядів не перевищували 70 мА, а тривалість не більше 0,04 с, тоді як ці параметри на ізоляторах без покриття досягали 300 мА і 2–3 с відповідно (осцилограми запису струмів витоку в стисненій формі наведені на рис.10.). Сліди дії поверхневих розрядів на забрудненій поверхні гідрофобного покриття (потемніння) можуть бути видалені методом обмивання.

Рис.10. Осцилограми струмів витоку крізь гірлянди ізоляторів:

а) - з кремнійорганічним полімерним покриттям; б) – без покриття

Напруга, що витримується, під дощем у всіх гідрофобізованих ізоляторів, які випробовувалися на трекінгоерозійну стійкість протягом 500 годин, після видалення (обмиванням) з їх поверхні залишків

забруднюючого розчину, на 8–13 % вище ніж у ізоляторів чим у чистих ізоляторів без покриття, що не випробовувалися.

Наведені результати досліджень кремнійорганічного покриття холодного затвердіння на стійкість до низьких температур і обмерзання. Як випробовувані об'єкти використовувалися опорно-стрижньові ізолятори типу ІОС-110. Порівняльні випробування (ізолятора з гідрофобним покриттям і ізолятора з чистою поверхнею) показали, що тверді кремнійорганічні покриття в 2–2,5 рази підвищують напруги перекриття і появи видимої корони опорно-стрижньових фарфорових ізоляторів в умовах обмерзання і відтавання.

На підставі аналізу всього комплексу проведених випробувань був зроблений висновок, що кращими експлуатаційними характеристиками (мінімальні значення водопоглинання і протікаючих струмів витоку, відсутність видимих пошкоджень від поверхневих розрядів і максимальна вологорозрядна напруга після випробувань на трекінгоерозійну стійкість) володіє покриття на основі кремнійорганічного компаунду ЕКП-102 з додаванням гідрата окислу алюмінію, низькомолекулярної кремнійорганічної рідини К-119/215 та сажі ацетиленової.

Четвертий розділ присвячений коректуванню основних технологічних параметрів при нанесенні гідрофобного покриття холодного затвердіння в «польових умовах» і результатам впровадження в експлуатацію.

Надано аналіз властивостей компонентів гідрофобізуючої композиції найбільш оптимального складу і визначено раціональний порядок її приготування. Для полегшення роботи в «польових умовах» співвідношення між компонентами виражені в різних одиницях вимірювання і наведені у вигляді таблиці. Дані рекомендації до вибору технологічного устаткування для механізованого нанесення гідрофобного покриття і коректуванню технологічних параметрів залежно від умов навколишнього середовища для забезпечення раціонального режиму роботи і зменшення збитків витратних матеріалів.

Наведені відомості про енергооб'єкти, на ізоляцію яких було нанесено кремнійорганічне покриття холодного затвердіння. Його ефективність підтверджується більш ніж 10-ти річним позитивним досвідом експлуатації на підстанціях розташованих в зонах з інтенсивними промисловими забрудненнями (зокрема 5–8 річним в районах з V–VII СЗА). Мала товщина покриття і покращені умови «самоочищення» дозволяють при проведенні профілактичних заходів виключити роботи по зняттю «старого» шару покриття перед нанесенням «нового» і забезпечують ефективну експлуатацію покриття без проведення додаткових профілактичних заходів на протязі не менш 5 років.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання удосконалення технології відновлення і посилення зовнішньої ізоляції

шляхом механізованого нанесення гідрофобного покриття холодного затвердіння на основі кремнійорганічного компаунда. В ході проведених досліджень одержані результати:

1. Проаналізовано особливості експлуатації ізоляції в районах з високою СЗА і основні методи забезпечення необхідного рівня її надійності, для визначення напрямку по удосконаленню технології відновлення і посилення зовнішньої ізоляції, орієнтованого на збільшення терміну між виконанням чергових профілактичних робіт і зниження їх трудомісткості.

2. Проведено аналіз опублікованої інформації про властивості кремнійорганічних полімерів холодного затвердіння і речовин які додаються до складу полімерних композицій, для визначення можливостей модифікації характеристик одержуваних полімерних покриттів.

3. Досліджені залежності діелектричних характеристик покриттів (у сухому стані і після зволоження протягом 24 ч) і їх дугостійкості залежно від складу двохкомпонентної композиції. На підставі чого були визначені обмежуючі параметри щодо частки речовин, що додаються до складу композиції.

4. Проведено аналіз впливу полімерного покриття на розподіл напруженостей електричного поля на поверхні підвісних і опорно-стрижньових ізоляторів з скла і фарфору. Чим доведено, що шар полімерного покриття завтовшки до 0,3 мм не впливає істотно на зміну розподілу напруженості на ізоляційній поверхні.

5. Проведені дослідження динаміки відновлення гідрофобності кремнійорганічних полімерних покриттів після короткочасної дії коронного розряду і їх стійкості до тривалої дії коронного розряду. Встановлено механізм і визначені орієнтовні швидкості деструкції твердих кремнійорганічних покриттів в умовах тривалої дії електричного поля високої напруженості і коронного розряду.

6. Досліджені особливості розвитку електрофізичних процесів на поверхні ізоляції з кремнійорганічним гідрофобним покриттям і без нього в екстремальних умовах забруднення (зокрема при обмерзанні і відтаванні). На підставі результатів випробувань на трекінгоерозійну стійкість обґрунтована ефективність застосування покриття на основі компаунда ЕКП-102 в районах з високим рівнем забруднення (до VII СЗА включно).

7. Визначені компоненти композиції, що найпозитивніше впливають на властивості одержуваних полімерних покриттів. Проведено дробовий факторний експеримент, за наслідками якого оцінена ступінь значущості кожного з них. Оптимізовано склад композиції за критерієм мінімального приросту маси покриття після зволоження.

8. Дані рекомендації до вибору технологічного устаткування для механізованого нанесення гідрофобного покриття в «польових умовах» і коректуванню технологічних параметрів залежно від умов навколишнього середовища. На підставі отриманих результатів розроблено галузевий нормативний документ по методиці посилення підстанційної ізоляції.

9. За допомогою вдосконаленої технології було проведено відновлення і посилення вологорозрядних характеристик ізоляторів класу 3,3–330 кВ на більш ніж 20-ти діючих енергооб'єктах.

10. Результати дисертаційної роботи впроваджені в експлуатацію під час виконання по відновленню і посиленню зовнішньої ізоляції підтверджується 5–8 річним позитивним досвідом експлуатації на підстанціях, розташованих в районах з V–VII СЗА.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пономарев П.Е. Увеличение стойкости кремнийорганического гидрофобного покрытия / Ким Ен Дар, Кукс С.В., Пономарев П.Е. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1998 – Вып. 13. – С. 116–118.

Здобувачем досліджено вплив поліметилсілоксанової рідини, що додається до складу гідрофобізуючої композиції, на зростання електроізоляційних властивостей покриттів.

2. Пономарев П.Е. Способы восстановления и усиления высоковольтной изоляции / Ким Ен Дар, Кукс С.В., Пономарев П.Е. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1998 – Вып. 13. – С. 122–127.

Здобувачем розглянуті засоби відновлення і посилення високовольтної ізоляції для експлуатації в районах з забрудненою атмосферою.

3. Пономарев П.Е. Влияние поверхностного загрязнения на электрическое поле высоковольтного ввода / Ким Ен Дар, Пономарев П.Е., Козуб Б.В. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999 – Вып. 88. – С. 32–37.

Здобувачем виконані розрахунки розподілу напруженості електричного поля високовольтного вводу с забрудненою поверхнею при різних значеннях її питомої провідності і діелектричної проникності.

4. Пономарев П.Е. Влияние гидрофобного покрытия на основе полимерного компаунда на электрические характеристики внешней изоляции в условиях обледенения и оттаивания / Ким Ен Дар, Кукс С.В., Пономарев П.Е., Бидашко Г.Б. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2003 – № 9 – С. 15–18.

Здобувачем виконана оцінка залежностей появи видимої корони на ізоляції з кремнійорганічним гідрофобним покриттям і без нього в умовах обмерзання і відтавання.

5. Пономарев П.Е. Увеличение дугостойкости кремнийорганических покрытий холодного отверждения для наружной поверхности высоковольтной изоляции / Ким Ен Дар, Кукс С.В., Пономарев П.Е. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2004 – № 7 – С. 148–152.

Здобувачем досліджено вплив різних наповнювачів, що додаються до складу композиції, на дугостійкість покриттів, отриманих на основі кремнійорганічного компаунду ЕКП-102.

6. Пономарьов П.Є Гидрофобне покриття холодного отвердіння для експлуатації в районах с V–VII СЗА / Кім Єн Дар, Кукс С.В., Пономарьов П.Є // Автоматизація та електрифікація сільського господарства – К., 2004 – № 3(8) – С. 21–27.

Здобувачем досліджені залежності величини токів витоку, максимальної амплітуди і тривалості поверхневих розрядів на поверхні ізоляторів з кремнійорганічним покриттям при випробуваннях на трекінгоерозійну стійкість з примусовим зволоженням розчином CaCl_2 .

7. Пономарев П.Е. Влияние коронного разряда на гидрофобные свойства кремнийорганических покрытий холодного отверждения / Пономарев П.Е. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005 – № 42 – С. 93–97.

8. Пономарев П.Е. Влияние коронного разряда на кремнийорганические покрытия холодного отверждения / Кім Єн Дар, Пономарев П.Е. // Залізничний транспорт України – Дніпропетровськ, Державна адміністрація залізничного транспорту України, 2006 – № 3 – С. 51–55.

Здобувачем наведено механізм деструкції твердого кремнійорганічного покриття в умовах тривалої дії електричного поля високої напруженості і коронного розряду.

9. Пономарев П.Е. Опыт эксплуатации кремнийорганического покрытия холодного отверждения на подстанциях энергосистем Украины / Кім Єн Дар, Пономарев П.Е. // Электрические сети и системы – К., 2006 – № 3 – С. 32–35.

Здобувачем узагальнені відомості про об'єкти, де експлуатується ізоляція з кремнійорганічним покриттям холодного отвердіння.

10. Пономарев П.Е. Особенности смачивания и изменения удельного поверхностного сопротивления силоксанового полимерного покрытия холодного отверждения / Пономарев П.Е. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006 – № 34 – С. 133–137.

11. Патент на винахід №77628. Україна, МПК H01B 17/50 Спосіб підвищення вологорозрядної напруги високовольтної ізоляції/ Кім Єн Дар, Кукс С.В., Пономарьов П.Є. Таран В.М. – №2004010234; Заявл.13.01.2004; Опубл. 15.12.2006; Бюл. № 12.

Здобувачем запропоновано увести до складу гідрофобізуючої композиції низькомолекулярну кремнійорганічну рідину, яка вступає до реакції полімеризації в кількості 1% від маси компаунду.

12. Пономарьов П.Є. Методика посилення підстанційної ізоляції з застосуванням гідрофобного покриття на основі кремнійорганічного полімерного компаунда холодного отвердіння ЕКП 102Е / Кім Єн Дар, Кукс С.В., Пономарьов П.Є. та ін.// Об'єднання енергетичних підприємств “Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики” – Київ – 2004, 12 с.

Здобувачем запропоновано оптимізований склад гідрофобної композиції для механізованого нанесення на зовнішню ізоляцію в польових умовах і розроблено рекомендації по коректуванню технологічних параметрів.

АНОТАЦІЇ

Пономарев П.Е. Усовершенствование способа гидрофобизации изоляционной поверхности высоковольтного электроэнергетического оборудования. – 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, 2009.

Диссертация посвящена усовершенствованию способа гидрофобизации поверхности наружной изоляции путем оптимизации состава гидрофобного покрытия холодного отверждения на основе кремнийорганического компаунда, которое обеспечивает повышение влагоразрядных характеристик изоляции, уменьшает токи утечки и может эффективно эксплуатироваться в районах с V – VII СЗА не менее 5 лет без возобновления, и скорректированной технологии его механизированного нанесения в полевых условиях.

Обоснована актуальность работы, направленной на повышение надежности внешней изоляции ВЛ и ОРУ в районах с загрязненной атмосферой.

Показаны факторы определяющие напряжение перекрытия высоковольтной изоляции и разрушительное воздействие электрической дуги поверхностных разрядов на твердые диэлектрические материалы. Рассмотрены основные направления в создании высоковольтных изоляционных конструкций для загрязненных районов. Проанализированы достоинства и недостатки профилактических мероприятий проводимых, в настоящее время, на изоляции действующих энергообъектов. Показаны перспективы применения гидрофобных покрытий на основе кремнийорганических каучуков холодной вулканизации, как способа восстановления и усиления наружной изоляции.

Обоснован выбор компаунда ЭКП-102 в качестве основы композиции для получения гидрофобного покрытия. Установлены закономерности влияния веществ (компонентов), вводимых в состав гидрофобизирующей композиции, на диэлектрические характеристики и дугостойкость покрытий на основе кремнийорганического компаунда холодного отверждения. Проведен анализ влияния полимерного покрытия на распределение напряженностей электрического поля на поверхности подвесных и опорно-стержневых изоляторов из стекла и фарфора. Подтверждена устойчивость гидрофобных и диэлектрических характеристик покрытий на основе компаунда ЭКП-102 к климатическим факторам действующим на территории

Украины. Определены условия снижения гидрофобности твердых кремнийорганических полимерных материалов при кратковременном воздействии коронного разряда и их связь с распределением напряженностей электрического поля.

Определены критерии сравнения характеристик твердых гидрофобных покрытий при эксплуатации их в условиях загрязнения и сильных электрических полей. Обоснован выбор параметра оптимизации покрытия и ограничивающих параметров при проведении факторного эксперимента. На основании полученных экспериментальных данных подтверждена близость области оптимума к выбранным интервалам варьирования компонентов входящих в состав композиции.

Установлен ряд закономерностей изменения свойств образцов покрытий при длительном воздействии коронного разряда. На основании комплексного анализа полученных данных об изменении характеристик испытуемых образцов, сделаны выводы о предполагаемом механизме физико-химического «разрушения» гидрофобного покрытия исследуемого типа. Рассмотрены некоторые особенности увлажнения твердых гидрофобных полимерных покрытий связанные с слиянием соседних капель при увеличении плотности увлажнения. Выполнены расчеты значений напряженности поля на поверхности плоского образца с твердым кремнийорганическим покрытием и без него в зависимости от расстояния до центра образца в сухом состоянии и при различной плотности увлажнения поверхности.

Исследованы особенности развития электрофизических и физикохимических процессов на поверхности изоляции с кремнийорганическим гидрофобным покрытием в условиях воздействия сильного электрического поля и экстремальных условиях загрязнения. Приведены результаты исследований кремнийорганического покрытия холодного отверждения на устойчивость к низким температурам и обледенению. На основании анализа всего комплекса проведенных испытаний сделан выбор состава композиции для получения покрытия с наиболее оптимальными эксплуатационными характеристиками (минимальные значения водопоглощения и протекающих токов утечки, отсутствие видимых повреждений от поверхностных разрядов и максимальное влагоразрядное напряжение после испытаний на трекингерозионную стойкость).

Даны рекомендации по выбору технологического оборудования для механизированного нанесения гидрофобного покрытия и корректировке технологических параметров в зависимости от условий окружающей среды при нанесении его на наружную изоляцию в полевых условиях.

Усовершенствованный способ гидрофобизации изоляционной поверхности был использован при нанесении покрытий на наружную изоляцию более чем 20-ти действующих энергообъектов класса напряжения до 330 кВ включительно.

Ключевые слова: сильные электрические поля, высоковольтные изоляторы, электроразрядные процессы, гидрофобизация, разработка технологии защитных покрытий.

Пономарьов П. Є. Удосконалення засобу гідрофобізації ізоляційної поверхні високовольтного електроенергетичного обладнання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.13 – техніка сильних електричних і магнітних полів. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2009.

Дисертація присвячена удосконаленню засобу гідрофобізації шляхом оптимізації складу гідрофобного покриття холодного затвердіння, яке може ефективно експлуатуватися в районах з V–VII СЗА та скоректованої технології його механізованого нанесення в польових умовах.

Встановлені закономірності впливу речовин (компонентів), що вводяться до складу гідрофобізуючої композиції, на діелектричні характеристики і дугостійкість покриттів на основі кремнійорганічного компаунду ЕКП-102. Проведено аналіз впливу полімерного покриття на розподіл напруженостей електричного поля на поверхні ізоляторів з скла і фарфору.

Встановлено ряд закономірностей зміни властивостей твердих кремнійорганічних покриттів при короткочасному та тривалому впливі коронного розряду. Досліджені особливості розвитку електрофізичних і фізикохімічних процесів на поверхні ізоляції з кремнійорганічним гідрофобним покриттям в умовах дії сильного електричного поля та екстремальних умовах забруднення. Зроблено вибір складу композиції для отримання покриття з найкращими характеристиками для тривалої експлуатації в районах з високим рівнем забруднення.

Вдосконалений засоб гідрофобізації був використаний при нанесенні покриттів на зовнішню ізоляцію більш ніж 20-ти діючих енергооб'єктів.

Ключові слова: сильні електричні поля, електророзрядні процеси, гідрофобізація, розробка технології захисних покриттів.

Ponomarev P.Y. The improvement of the method of hydrophobization of insulating surface of high-voltage electric power equipment. – Script.

A thesis for candidate's degree of technics in speciality 05.09.13 – high electric and magnetic field engineering. – The National Technic University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2009.

The thesis is devoted to improvement of hydrophobization method by means of optimization of composition of hydrophobic RTV coating that can be effectively used in areas with V to VII pollution severity and to a corrected technology of its mechanized application in field conditions.

This paper defines the mechanisms of the influence of the substances (components) added into a water-repellent composition on dielectric characteristics

and arc resistance of coatings on ЭКП-102 silicone compound base. The analysis of the influence of a polymeric coating on distribution of electric field strength on the surface of glass and porcelain insulators was carried out.

A number of mechanisms of solid silicone coatings behaviour under short-term and long-term corona were defined. The peculiarities of electrophysical and physical-chemical processes development on hydrophobic surface of silicone-coated insulation under a strong electric field and extreme pollution were investigated. To obtain a coating having improved characteristics for long-term service in areas with high pollution level a choice of compound composition was made.

The improved method of insulating surface hydrophobization was used in coating of external insulation of over 20 operating power plants of up to 330 kV voltage class.

Key words: strong electric fields, high-voltage insulators, electrical discharge processes, hydrophobization, development of protection coatings' technology.