

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Кім Єн Дар

УДК 621.315.62.001(043)

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСКОНАЛЕННЯ  
ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙНИХ ІЗОЛЯТОРІВ  
ТА МЕТОДІВ ЇХ ВИПРОБУВАНЬ**

Спеціальність 05.09.13 - Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків - 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Науково-дослідному інституті високих напруг,  
Міністерство палива та енергетики України, м. Слов'янськ.

Офіційні опоненти :

доктор технічних наук, професор  
Набока Борис Григорович,  
Національний технічний університет, "Харківський політехнічний інститут", м. Харків,  
професор кафедри електроізоляційної  
і кабельної техніки;

доктор технічних наук, професор  
Никонець Леонід Олексійович,  
Національний технічний університет, "Львівська політехніка", м. Львів,  
завідувач кафедри електричних станцій;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
Подольцев Олександр Дмитрович,  
Інститут електродинаміки Національної Академії  
Наук України, м. Київ,  
завідуючий відділом

Провідна установа :            Національний технічний університет України  
„Київський політехнічний інститут”,  
Міністерство освіти і науки України, м. Київ

Захист відбудеться “26” \_\_06\_\_ 2003 р. о 14.30 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 науковій бібліотеці Національного  
технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “23 ” \_\_05\_\_ 2003 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Болюх В. Ф.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Високовольтні лінійні ізолятори це один з головних елементів лінії електропередач, тому надійність роботи системи у значній мірі визначається рівнем стійкості ізоляторів до експлуатаційних дій. Необхідність всебічного підвищення технічних характеристик ізоляторів, зниження їх металоємності диктувалась і кон'юнктурою сучасного ринку, необхідністю сертифікації продукції за вимогами міжнародних стандартів. Створення параметричного ряду ізоляторів зі зменшеною металоємністю та високою експлуатаційною надійністю, по суті ізоляторів нового покоління, конкурентоспроможних на світовому ринку, обумовило, не лише рішення технологічних задач, актуальність проблеми досконалення конструкції ізоляторів, розвитку існуючих та розробки нових методологічних основ розрахунку, проведення випробувань та досліджень.

За існуючого підходу ізолятори проектувались на основі відомих прототипів, розрахунки силового вузла виконувались без врахування пружно-деформаційних якостей матеріалів, що не дозволяло оптимально використовувати міцнісні можливості кожного елемента вузла. З переходом до нової конструкції із зменшенням на 30-40% геометрії силового вузла, з одного боку, і прийняттям більш високих міжнародних нормованих електричних характеристик з другого, почали проявлятися ті ефекти, які негативно позначались на характеристики ізоляторів. Це призвело до необхідності більш глибокого вивчення електрофізичних та електрохімічних якостей матеріалів і процесів на поверхні та в тілі ізолятора; урахування в розрахунках електричного поля активної складової провідності піддослідних областей; вивчення аеродинамічних характеристик ізоляторів, їх забрудненості; способів відновлення та посилення ізоляції; відповідно переглянути і самі методи випробувань; розробляти нові альтернативні методи досліджень та випробувань, що максимально реалізують умови експлуатації.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Робота виконувалась в НДІВН (СКТБ) в межах галузевих планів науково-дослідних робіт ГТУ Міненерго СРСР 01/1527-19 «Дослідження лінійних підвісних ізоляторів у лабораторних та натурних умовах з метою визначення та створення конструкції з покращеними основними електричними характеристиками»; Міненерго України 13-ЭС-92 «Дослідження, направлені на підвищення якості, надійності та технічного рівня вітчизняних фарфорових та скляних ізоляторів» за безпосередньою участю та під керівництвом автора.

**Мета і задачі дослідження роботи.** Удосконалення ізоляційних конструкцій лінійних ізоляторів та методів їх випробувань, розвиток методичних основ розрахунку, досліджень, способів підвищення експлуатаційної надійності та профілактичного обслуговування.

*Для досягнення необхідно вирішити:*

Вивчити сучасні вимоги до високовольтних підвісних ізоляторів, напрямки розвитку високовольтних ізолюючих конструкцій, методів досліджень та їх контролю; шляхи підвищення працездатності ізоляторів у важких експлуатаційних умовах.

Запропонувати надійні розрахункові методи конструювання ізоляторів і дослідження електричного поля, які враховують головні фізико-механічні характеристики об'єкту.

Вдосконалити існуючі та розробити нові методи випробувань і досліджень, що направлені на підвищення якості та експлуатаційної надійності ізоляторів:

- вивчити причини нестабільності і низького відтворення високовольтних випробувань на пробіях та на рівень радіозавад, що проводяться за рекомендаціями МЕК, з метою їх коригування;

- вивчити поведінку ізоляторів в умовах високої вологості, температури та сольового забруднення і розробити методи електричних випробувань на термостійкість;

- вивчити динаміку осідання забруднень на поверхні ізоляторів і розробити методикку визначення аеродинамічних характеристик.

Дослідити конструктивні і технологічні фактори, що впливають на якість та експлуатаційні характеристики ізоляторів; обґрунтувати шляхи їх підвищення.

5. Розробити ефективні методи відновлення і підсилення зовнішньої електричної міцності високовольтних ізоляторів, що експлуатуються у місцевостях з інтенсивним забрудненням.

*Об'єкт дослідження*- методологічні основи розрахунку, конструювання методів випробувань та досліджень, шляхи досконалення ізоляційних конструкцій.

*Предмет дослідження*- високовольтні ізолятори зі скла та фарфору.

*Методи дослідження*. Для розв'язання задач в дисертації використовувалися методи та положення теорії електромагнітних полів, техніки високих напруг, теорії пружності та конформних перетворень, числові методи розв'язання диференціальних рівнянь, методи математичної статистики та апроксимації функцій. Експериментальні дослідження виконувались на зразках та реальних об'єктах в умовах, моделюючих експлуатаційні чинники. Результати лабораторних досліджень співставлялись з даними багаторічних стендових та натурних досліджень, а також з даними досвіду експлуатації.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

Вперше в комплексній постанові запропоновані методологічні основи розробки високовольтних ізоляторів, у тому числі розрахунку та конструювання, випробувань та досліджень, а також методів профілактичного

обслуговування ізоляторів, що визначають якість, технічні характеристики і працездатність ізоляторів у різних умовах експлуатації.

Елементи новизни полягають у такому:

Удосконаленні з врахуванням електро-фізико-механічних властивостей елементів конструкції, функціональні залежності між головними геометричними параметрами і електричними та механічними характеристиками ізоляторів.

2. Розроблена математична модель електричного поля ізолятора для аналізу фізичних явищ у тілі та на поверхні діелектрика, пов'язаних із впливом на ізолятор високої напруги, ефектом комплексної провідності досліджуваного середовища та наявності поверхневих забруднень .

3. З'ясовані причини низької відтворюваності результатів випробувань ізолятора на пробіях в слабопровідному рідинному середовищі напругою промислової частоти (МЕК 383), обґрунтовані необхідні вимоги щодо рідини для випробувань, які забезпечують відтвореність методу. Доведена, вперше в міжнародній практиці, можливість об'єктивної оцінки якості ізоляторів по електричній міцності шляхом випробувань на пробіях напругою промислової частоти.

4. Встановлені закономірності виникнення високочастотних струмів завад на ізоляторі і необхідність коригування результатів випробувань ізоляторів на рівень радіозавад (МЕК 437) по відносній вологості повітря, отримана відповідна функція зведення результатів вимірювань до нормальної вологості. Представлене теоретичне та експериментальне обґрунтування можливості істотного зниження рівня завад від ізоляторів шляхом зміни конструкції в приелектродних областях.

5. Уточнений механізм ушкодження ізоляторів, виготовлених із загартованого скла, під дією високої напруги промислової частоти та імпульсної напруги з крутим фронтом хвилі; експериментально з'ясовані і теоретично обґрунтовані основні фактори, що призводять до зниження внутрішньої електричної міцності ізоляторів.

6. Встановлена динаміка осідання твердих аерозольних часток на поверхні ізолятора, обґрунтована можливість отримання реальних вологостозрядних напруг, шляхом проведення короткочасних випробувань в аеродинамічній установці, сформульовані критерії підвищення аеродинамічних характеристик ізоляторів.

7. Отримані нові дані про електрофізичні процеси на ізоляційних конструкціях та електрокорозію їх металевих елементів в умовах вологого тропічного клімату і сольового забруднення. Встановлена природа протікання додаткової складової струму витоку поверхнею ізолятора, забрудненого плівкою водного розчину солі, що знаходиться під дією високої змінної напруги.

8. Запропоновані основи нової технології відновлення забрудненої ізоляції, що полягає у застосуванні аерозольно-гідродинамічного способу

очищення та нанесення гідрофобного покриття на основі кремнійорганічного компаунду холодного затвердіння. Обґрунтовані оптимальні технологічні параметри і склад матеріалів, що застосовуються.

### **Практичні значення одержаних результатів.**

Розроблені інженерні методики розрахунків головних геометричних параметрів ізоляторів, пакет програм розрахунку електричного поля та рекомендації по оптимізації конструкції використовувались і використовуються для створення малогабаритних ізоляторів усіх класів по механічному навантаженню та виконанню ізоляційної деталі, а також при подальших підвищеннях характеристик ізоляторів до вимог національних стандартів США, Канади, Франції, Швеції, (Слов'янський арматурно-ізоляційний, Львівський ізоляційний, Південно-Уральський арматурно-ізоляційний заводи).

Надане підтвердження про можливість використання ізоляторів, виготовлених з лужного скла складу 7, в умовах вологого тропічного клімату в приморських зонах. Це дозволило поширити географію експорту вітчизняних ізоляторів ( ДСТУ 3407-96. Деталі ізоляційні зі скла для підвісних лінійних та штирьових ізоляторів. Загальні технічні умови ).

Розроблена методика визначення вологорозрядних напруг, яка враховує аеродинамічні характеристики ізоляторів; створені ізолятори з покращеними параметрами, що призначені для місцевостей з інтенсивними забрудненнями (дослідні партії ізоляторів ПСК70 (И-739), ПСК120 (И-879), ПФК70 (И-997), які з успіхом експлуатуються на повітряних лініях в умовах сильних промислових забруднень).

Вдосконалені методи випробувань ізоляторів на пробій напругою промислової частоти і визначення рівня радіозавад, результати вдосконалення увійшли в галузеві нормативні документи країн СНД та державні стандарти:

– ГОСТ 26196-84. Изоляторы. Метод измерения промышленных радиопомех;

– ДСТУ 2203-93 ( ГОСТ 6490-93). Ізолятори лінійні підвісні тарілчасті. Загальні технічні умови;

– ДСТУ 2202-93 ( ГОСТ 1232-93). Ізолятори лінійні штирьові фарфорові та скляні на напругу 1-35 кВ. Загальні технічні умови.

5. Розроблене слабопровідне рідке середовище для випробувань ізоляторів на пробій напругою промислової частоти, що характеризується високим ступенем однорідності та стабільності електрофізичних характеристик (використовується в акредитованому Випробувальному центрі НДІВН з 1993 р.).

6. Розроблені методики електричних випробувань ізоляторів на визначення мінімальних розрядних характеристик в умовах експлуатації в приморських районах вологого тропічного клімату (Рекомендовані для включення в ГОСТ 6490).

7. Скориговані нові вимоги щодо вибраковки ізоляційних деталей з дефектами у склі, що суттєво впливають на стійкість ізоляторів до дії підвищеної напруги (ДСТУ 3407-96).

8. Запропонований новий засіб захисту від корозії металевих елементів ізоляторів, суть якого полягає в блокуванні причин, що викликають електрохімічні процеси на межі стержень-цементно-піщана зв'язка (дослідні зразки).

9. Створена механізована технологія відновлення і підсилення зовнішньої високовольної ізоляції для виконання профілактичних робіт по очищенню, миттю та послідуєчому нанесенню гідрофобного покриття (5-6-річний позитивний досвід експлуатації на 6-ти підстанціях Донбасобленерго, на 2-х підстанціях Запоріжжяобленерго).

**Особистий внесок здобувача** - відповідального виконавця та наукового керівника виконаних робіт - зводиться до постановки задач та їх обґрунтування; розробки методик досліджень та участі в їх реалізації; узагальнення результатів досліджень. В роботах, що виконані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає: [8] - у виведенні основних співвідношень методики розрахунку силового вузла ізолятора та її апробації; [9,10,12,15] - в розробці методик досліджень, визначенні динаміки пошкодження ізоляторів під дією поверхневих розрядів, формулюванні рекомендацій по підвищенню стійкості до дії цих розрядів; [20] - узагальненні статистичних даних відмов ізоляторів на ПЛ та результати стендових випробувань; [21]- сформульовані задачі чисельного експерименту та вихідних умов врахування поверхневого забруднення; [22]- запропонованні методики експерименту та гіпотези про електричний початок руйнування ізоляторів; [14,16,23,27] - у встановленні взаємозв'язку між коефіцієнтом статичного тиску повітряного струменю на поверхні ізолятора та інтенсивністю забруднення, критеріїв оптимальної побудови профілю тарілки ізолятора, що об'єднує конічну та сферичну форми ізоляторів, [11,28] - в розробці електричної моделі електричного поля ізолятора та обґрунтуванні можливості значного зниження рівня радіозавад шляхом зміни конструкції ізолятора; [18,19] - у виборі напрямків досліджень, проведенні планування експерименту та аналіз отриманих даних; [24] - в обґрунтуванні області оптимальних співвідношень між радіусами стержня та його головки; [25,30] - в запропонованні ідеї зміцнення конструкції ізолятора введенням додаткових тонкостінних кілець з високоміцного матеріалу в силовий вузол; [31] - в обґрунтуванні можливостей підвищення електричних характеристик ізоляторів шляхом збільшення товщини діелектрика в приелектродній області; [26,29] - у чисельному дослідженні електричного поля ізолюючих конструкцій, у тому числі, напівпровідними елементами та визначенні оптимальних геометричних та електрофізичних параметрів; [17,33] - у проведенні чисельних та експериментальних досліджень поведінки ізоляторів, занурених в слабопровідне середовище, обґрунтуванні нових вимог до середови-

ща, що використовується при випробуванні ізоляторів на пробій; [13] - в доказі того, що відносна вологість повітря є визначальним кліматичним фактором в проведенні досліджень ізоляторів на рівень радіозад, виведенні функції корегування результатів досліджень по відносній вологості; [32] - у запропонуванні вводити в робочу емульсію розчинник при очистці відпрацьованої захисної пасти.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації і результати виконання автором досліджень доповідались і обговорювались на конференціях, нарадах, науково-технічних радах: науково-технічній раді НДПС (Ленінград, 1976-1983 р.); Всесоюзній науково-технічній конференції «Повышение надежности работы изоляции линий электропередачи и электрооборудования высокого напряжения» (Ташкент, 1983 р.); Міжнародній нараді спеціалістів по високовольтній ізоляції (Югославія, м. Аранджеловець, 1989 р.); Всесоюзній науково-технічній конференції «Совершенствование методов эксплуатации и разработки способов защиты от возгорания воздушных линий электропередачи железных дорог в районах с загрязненной изоляцией» (Ташкент, 1989 р.); науково-технічній нараді Азглавергеро (Баку, 1989 р.); науково-технічних радах ізоляторних заводів (м. Львів, 1989 р., м.Слов'янск, 1989 р., м. Південноуральськ, 1989 р.); науково-технічній раді ВНПЕ (м. Москва, 1988 р.); науково-технічній раді УНПО Міненергеро України (м. Одеса, 1994 р.); науково-технічному семінарі (виставці) «Изоляционные материалы, используемые в энергетике; линейные изоляторы; изоляционные материалы в коммутационных аппаратах; проблемы эксплуатации и производство» (Запоріжжя, 1995 р.); Міжнародній виставці «Энергопрогресс-95» (Москва, 1995 р.); Міжнародній семінар CIGRE SC 33-99 (Швеція, м. Людвіка, 1999 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковано у 40 роботах. Серед них 22 статті, у наукових журналах 4 тези доповідей на конференціях, 11 авторських свідоцтв, 3 патенти України.

**Обсяг і структура роботи.**

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації 410 сторінок; 102 ілюстрацій на 101 сторінці; 56 таблиць по тексту, 10 таблиць на 8 сторінках; 5 додатків на 20 сторінках; 324 найменування використаних літературних джерел на 33 сторінках.



## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** присвячено актуальності проблеми, сформульована мета роботи, наукова новизна та практична цінність результатів.

**У першому розділі** аналізується сучасний стан проблеми проектування лінійних високовольтних ізоляторів та підвищення їх експлуатаційної надійності. Розглядаються ступені вдосконалення конструкції ізоляторів, поліпшення параметрів, що визначають їх якість та надійність роботи на повітряних лініях (ПЛ). Відзначається великий внесок наукового колективу Львівського політехнічного інституту в частині розробки технології виготовлення ізоляційних деталей із загартованого скла. Зроблено порівнювальний аналіз характеристик вітчизняних ізоляторів з кращими закордонними аналогами і відповідних вимог, що пред'являють до ізоляторів. Показано, що незважаючи на значні успіхи в галузі ізоляторобудівництва, має місце певне відставання вітчизняних ізоляторів по масогабаритним та електричним характеристикам від закордонних. Такі обставини не можуть не впливати на експлуатаційну надійність ізоляції, а також на конкурентоздатність ізоляторів на світовому ринку. Проведено обґрунтування того, що підвищення електромеханічних характеристик ізоляторів, по суті створення ізоляторів нового покоління, неможливе без розробки і вдосконалення методів дослідження і розрахунку елементів ізоляційних конструкцій, без глибокого розуміння електрофізичних процесів в них; без детального вивчення і корегування самих методів визначення цих характеристик. Аналізуються сучасні шляхи відновлення і підсилення високовольтної зовнішньої ізоляції, відмічається неефективність сучасних засобів, що використовуються в теперішній час в енергосистемах України (СНД). Виходячи з аналізу накопиченого досвіду конструювання ізоляторів та досліджень, направлених на підвищення якості і експлуатаційних характеристик, формулюються основні задачі досліджень дисертаційної роботи.

**Другий розділ** присвячено розробці методів визначення основних геометричних розмірів ( параметрів ), що включають в себе розрахунок силового вузла за механічною міцністю та розрахунок тарілки ізоляційної деталі за електричними характеристиками

**Механічний розрахунок** радіальних розмірів силового вузла ізолятора ґрунтується на рішенні рівняння Ляме для випадку товстостінного циліндру, що підлягає дії внутрішнього тиску. При цьому бралось до уваги припущення про абсолютну жорсткість металевих елементів та відсутність взаємного переміщення дотичних поверхонь. Рішенням одношарової (стержень-цементно-піщана зв'язка) та двошарової (стержень-цементно-піщана зв'язка-діелектрик) задачі (рис.1) отримано розрахункові співвідношення, що враховують реальні фізикомеханічні характеристики зв'язки та діелектрика:  $M$ -модуль Юнга і  $\mu$ - коефіцієнт Пуасона :

$$\frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_r} = \frac{1 - \left( \frac{R_B^2}{r_e^2} \right) * \left( \frac{1 - \mu_1}{1 + \mu_1} \right) \nu}{1 + \left( \frac{R_B^2}{r_e^2} \right) * \left( \frac{1 - \mu_1}{1 + \mu_1} \right) \nu} \quad (1)$$

де  $r_e$  - еквівалентний радіус головки стержня, що поділяє похилу поверхню на дві рівні частини;

$$r_e = r_c \sqrt{\frac{\beta^2 + 1}{2}}; \quad \beta = \frac{r_{\Gamma}}{r_c},$$

$\sigma_{\tau}$  і  $\sigma_r$  - максимальні тангенціальна та радіальна напруги, причому:

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi r_c^2} \cdot \frac{\sin 2\alpha}{\beta^2 - 1}, \quad (2)$$

а  $\sigma_{\tau}$  знаходиться по (2),

$\nu$  - коефіцієнт жорсткості конструкції, що залежить від жорсткості  $M_1$ ,

$M_2$  компонентів та їх розмірів  $R_B, R_H$ :

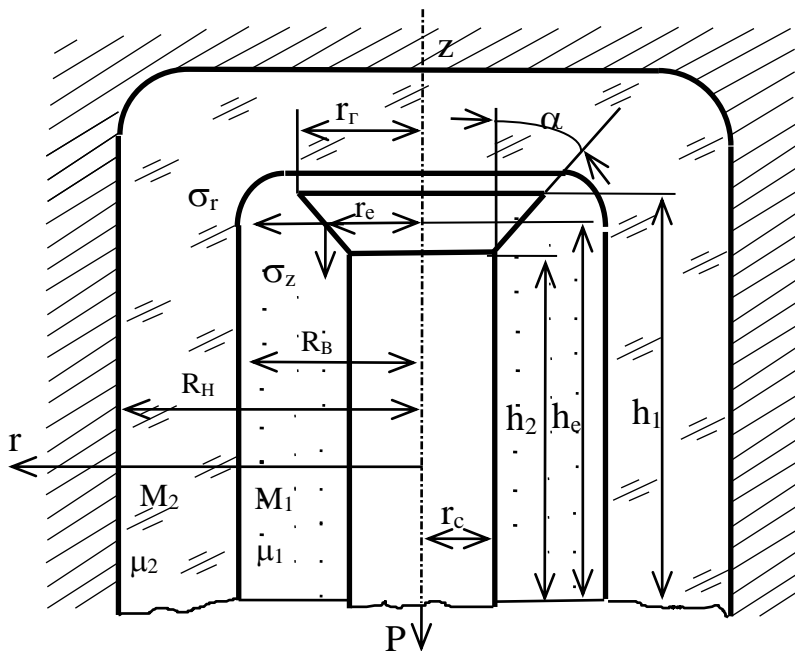
$$\nu = \frac{\frac{M_2 * 1 - \mu_1}{M_1 * 1 - \mu_2} \left( 1 + \frac{1 - \mu_2 * R_H^2}{1 + \mu_2 * R_B^2} \right) + \frac{R_H^2}{R_B^2} - 1}{\frac{M_2 * 1 - \mu_1}{M_1 * 1 - \mu_2} \left( 1 + \frac{1 - \mu_2 * R_H^2}{1 + \mu_2 * R_B^2} \right) + \frac{1 - \mu_1}{1 + \mu_1} \left( 1 - \frac{R_H^2}{R_B^2} \right)}$$

Висота силового вузла визначається глибиною занурювання стержня  $h$ . Рішенням задачі на згин з використанням елементів конформних відображень отримано залежність між вказаною глибиною і радіальними розмірами внутрішньої порожнини силового вузла та граничною напругою на згин  $\sigma_{3r}$  цементно-піщаної зв'язки:

$$h_e = \sqrt{\frac{3P}{\pi \cdot \sigma_{3r}} \cdot \frac{R_B \nu / r_e - 1}{R_B \nu / r_e + 1}}, \quad (3)$$

$h_e = \sqrt{h_1 h_2}$  - середньо геометричне вертикальних розмірів занурювання стержня (див. рис. 1).

Наведені аналітичні вирази дають можливість оцінювати вплив головних параметрів силового вузла на умови навантаження цементно-піщаної зв'язки та ізоляції. Це полегшує пошук шляхів вдосконалення конструкції.



вузлі розглядався випадок з підсиленою граничною умовою, коли переміщення зовнішньої межі дорівнює нулю. При цьому отримано граничну (теоретичну) можливість зміцнення конструкції і, відповідно, зменшення радіальних розмірів силового вузла ізолятора.

Незважаючи на прийняті припущення, що спрощують задачу, розрахункові міцності ізоляційних конструкцій були близькими до результатів випробувань реальних ізоляторів (таблиця 1). Керуючись цією методикою вперше в СРСР почались розробки та освоєння виробництва малогабаритних ізоляторів нового покоління з циліндричними силовими вузлами.

Електричний розрахунок визначає головні геометричні параметри тарілки ізоляційної деталі ізолятора (рис. 3) при умовах забезпечення необхідних розрядних характеристик. Всебічні експериментальні дослідження електричних характеристик, виконані на існуючих ізоляторах і фізичних моделях, дозволили з усього розмаїття геометричних параметрів виділити основні, що саме і визначають розрядні напруги.

Як впливає із співвідношень (1)÷(3) шляхом збільшення жорсткості ізоляційної деталі ( $M_2/M_1 \rightarrow 10$ ;  $\nu \rightarrow 1$ ) можна досягти суттєвого зниження напруги в зв'язці, тим самим збільшити міцність конструкції, або при тих же напругах зменшити габаритні розміри силового вузла ізолятора (рис. 2).

Для оцінки впливу жорсткості системи на розподіл напруги в силовому

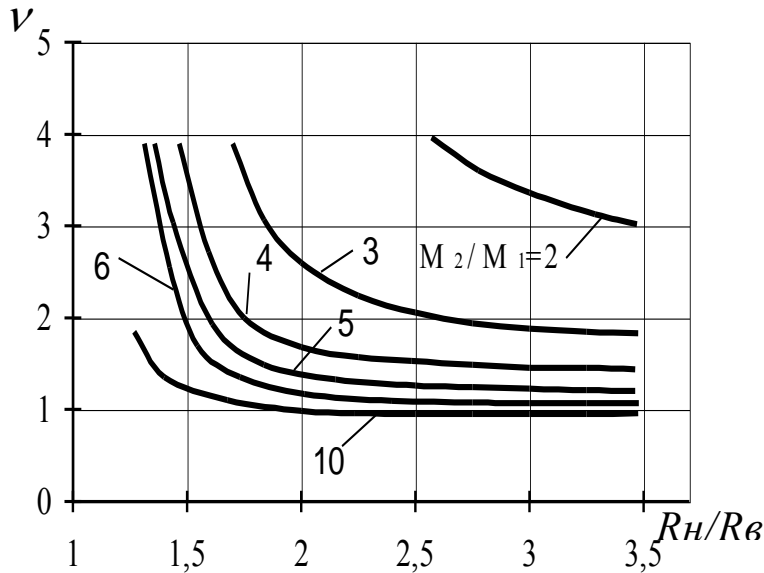


Рис. 2. Залежність коефіцієнта жорсткості конструкції силового вузла від співвідношення товщин ( $R_n/R_b$ ) та співвідношення жорсткості матеріалів ( $M_2/M_1$ )

За базові об'єкти були прийняті ізолятори з гладкою формою тарілки, для яких отримано емпіричні залежності розрядних напруг промислової частоти  $\tilde{U}_p$  і стандартних імпульсів  $\hat{U}_p$  в сухому стані з двома змінними:  $R_o$  - радіус тарілки і  $d$  - товщина тарілки (в мм) в приелектродній області, що визначають відповідно розрядний шлях і максимальну напруженість поля навколо поверхні тарілки ізолятора:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_p &= \tilde{U}_{p0} [1 - \exp(-0,037R_o)] , \tilde{U}_{p0} = -35,8 + 50d^{0,281} , \\ \hat{U}_{p\pm} &= \hat{U}_{p0\pm} [1 - 1,4 \exp(-0,38R_o)] , \hat{U}_{p0\pm} = \begin{cases} -17,8 + 56d^{0,281} \\ -27 + 55,5d^{0,281} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Слід зауважити, що для гладких ізоляторів залежність розрядних напруг від радіуса тарілки має експоненціальний характер і при  $R_o \geq 110-120$  мм зростання напруги практично припиняється. Помітного збільшення розрядних напруг можна досягти, якщо збільшити товщину діелектрика в приелектродній області.

Таблиця 1  
Експериментальні та розрахункові дані механічної міцності ізоляторів

Клас ізоляторів по механічному навантаженню, кН	Фактичне руйнівне навантаження/стандартне відхилення, кН	Розрахункове руйнівне навантаження, кН
70	104/17	117
120	149/18	134
160	198/21	178
210	248/22	258
300	350/27	404
400	475/41	546

Напруга перекриття ізоляторів в умовах, що імітують дощ, повністю залежить від найкоротшої відстані ( $Z_0$ ) між краєм тарілки і потенціальним електродом:

$$\tilde{U}_{\text{вм}} = -49,3 + 26,8Z_0^{0,281} \quad (5)$$

Для розрахунку розрядних напруг ізоляторів з розвиненою поверхнею ізоляційної деталі запропоновано додаткові складові, що враховують висоту ребер  $h_p$  і їх місце розташування  $k(r)$ :

$$\Delta \tilde{U}_p = 0,53h_p k(r)\xi; \quad \Delta \hat{U}_{p\pm} = \begin{cases} 1,2h_p k(r) \\ 1,15h_p k(r) \end{cases}; \quad (6)$$

$$\Delta \tilde{U}_{\text{мр}} = 23(z_1^{0,281} - z_0^{0,281}),$$

де  $\xi$  - коефіцієнт, який враховує фактор багатореберності;

$Z_1 - Z_0$  - приріст повітряного проміжка, що виникає при наявності витягнутих ребер.

Коректність отриманих емпіричних залежностей була підтверджена співпоставленням фактичних розрахункових характеристик для всіх існуючих

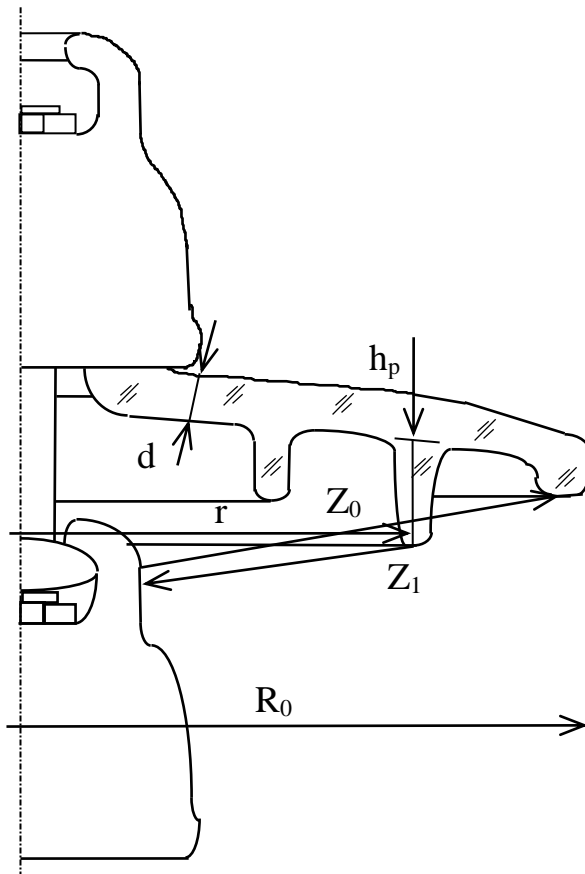


Рис. 3. Головні геометричні параметри для електричного розрахунку

ізоляторів. Найбільші похибки розрахункових формул склали 6,1%; 7,0%; і 5,9% відповідно для сухорозрядних напруг промислової частоти, розрядних напруг стандартних імпульсів і вологорозрядних напруг. Розроблені методи розрахунку були безпосередньо використані при створенні нових і вдосконаленні серійних ізоляторів за електричними характеристиками.

**Третій розділ** присвячено створенню математичної моделі електричного поля загального випадку для вказаного кола задач, розробці і вдосконаленню методів досліджень і випробувань ізоляторів.

**Дослідження електричного поля** - один з найважливіших етапів в процесі вивчення електрофізичних явищ в ізолюючих конструкціях, що підлягають високовольтному впливу, а також при оптимізації конструкцій. При умовах сталості електрофізичних властивостей ма-

теріалів об'єкту, що досліджується, та нехтуванні сторонніми джерелами зарядів електричне поле в загальному випадку діючої напруги довільної, щодо часу, форми задовольняє рівнянню Максвелла:

$$\operatorname{div}\left[\left(\gamma + \frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon \varepsilon_0\right) \operatorname{grad} \varphi\right] = 0, \quad \vec{r} \in V, \quad (7)$$

де  $\gamma$  - активна провідність;

$\varepsilon \varepsilon_0$  - діелектрична проникність;

$-E = \operatorname{grad} \varphi$  - вектор напруженості поля.

Рівняння (7) доповнюється граничними і початковими умовами на поверхнях розділу середовищ і на межі  $S$  розрахункової області  $V$  - умовами рівності нормальних складових струму і неперервності потенціалів, а на ділянках межі  $S$  задаються відомі струми або потенціали.

Наближенням інтегруванням рівняння (7) по просторовій та тимчасовій координатах, що ґрунтується на проекційно-сітковому методі Галеркіна, диференціальне рівняння зводиться до глобальної системи матричних рівнянь:

$$\left(\frac{2}{3}[\mathbf{k}_\gamma] + \frac{1}{\Delta\tau}[\mathbf{k}_\varepsilon]\right)\{\varphi\}_{i+1} = \left(-\frac{1}{3}[\mathbf{k}_\gamma] + \frac{1}{\Delta\tau}[\mathbf{k}_\varepsilon]\right)\{\varphi\}_i + \{F\}, \quad (8)$$

де  $[\mathbf{k}_\gamma]$  і  $[\mathbf{k}_\varepsilon]$  - матриці провідності і діелектричної проникності;

$\{\varphi\}$  - вектор потенціалів в вузлових точках;

$\{F\}$  - вектор граничних факторів.

У випадку синусоїдальної напруги дискретна модель (8) спрощується:

$$[\mathbf{k}]\{\varphi\} = \{F\}, \quad (9)$$

де  $[\mathbf{k}]$  - матриці комплексної провідності.

Для урахування шару забруднення на етапі побудови матриці  $[\mathbf{k}]$  введена двошарова поверхня  $S_\Sigma$  нескінченно малої товщини. Це дало змогу врахувати вплив поверхневого шару забруднення і уникнути проблем пов'язаних з поганою збіжністю чисельних методів поблизу особливих точок.

В роботі реалізовано алгоритм рішення нестационарної задачі на базі рівняння стаціонарного поля шляхом представлення потенціалу в ряд Фур'є.

**Випробування ізоляторів на пробій напругою промислової частоти** входить до складу типових, прийомо-здаточних і періодичних випробувань і є одним з доступних засобів контролю якості і надійності. У зв'язку з підвищенням нормованої випробувальної напруги для внутрішньої електричної міцності ізоляторів методика випробувань, рекомендована МЕК 383, стає непридатною через дуже низьке відтворення.

Експериментальні дослідження самої методики та розрахунки електричного поля ізолятора, зануреного в слабопровідне середовище, показали, що низьке відтворення пробивних напруг обумовлене співіснуванням двох механізмів в залежності від розподілу поля в випробувальному середовищі.

Якщо питомий об'ємний опір  $\rho_{\text{сер}} \rightarrow 10^8$  Ом·м випробувального середовища, ізолятори найчастіше ушкоджуються внаслідок часткового пробію навколишньої рідини, який ініціює подальший пробій тарілки ізоляційної деталі, причому така подія виникає задовго до досягнення критичної для ізолятора напруги. Якщо  $\rho_{\text{сер}} \sim 10^6$  Ом·м, то ймовірність появи часткових розрядів суттєво знижується, що пов'язано із значним вирівнюванням поля  $E_{\text{сер}}$  в середовищі (рис. 4). Пробій відбувається тоді тільки в головці ізоляційної деталі, де напруженість електричного поля максимальна.

За результатами досліджень сформульовано нові вимоги щодо дослідницької рідини по питомому об'ємному опору ( $\rho_{\text{сер}}$ ) та пробивній напрузі:

$$\rho_{\text{сер}} \in (1-5) \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (10)$$

$$U_{\text{п.сер.}} - 3\sigma > 0,0385 \cdot U_{\text{вип.}} \cdot (\lg \rho_{\text{сер.}} - 5,3) \quad (11)$$

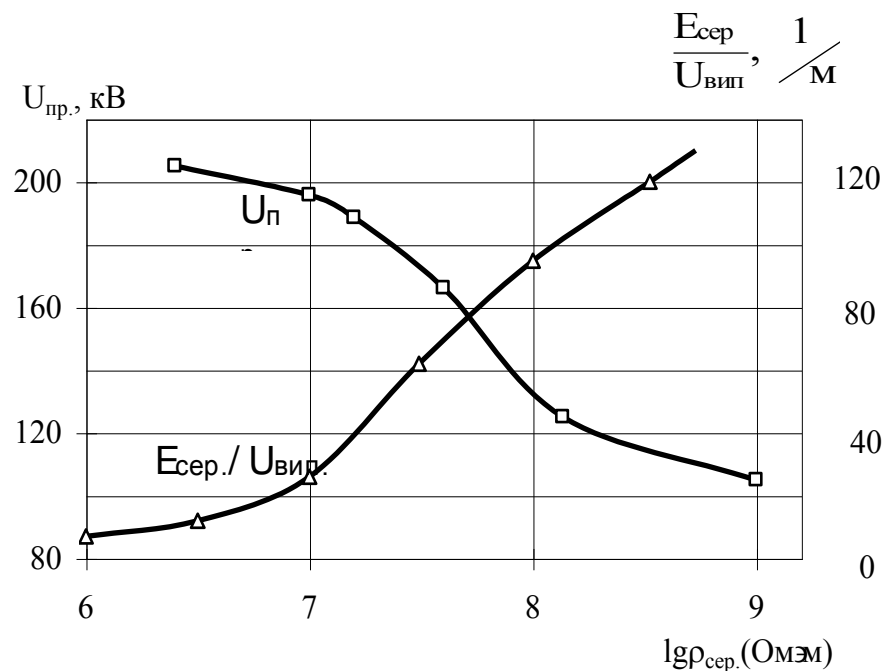


Рис. 4. Вплив питомого опору середовища на напруженість електричного поля в ізоляторі і його пробивну напругу

Відмінність від вимог МЕК 383 полягає у зсуві діапазону питомого опору в бік менших значень і в урахуванні додаткової умови (11) що додатково уведена по електричній міцності середовища ( $U_{\text{п.сер.}} - 3\sigma$ ): величина останньої вибирається в залежності від найбільшої випробувальної напруги  $U_{\text{вип.}}$ .

У відповідності з умовами (10) і (11) було розроблено нове випробувальне середовище на основі застосування кремнійорганічної рідини

та трансформаторного масла. Ефективність нового середовища та правомірність запропонованої скорегованої методики були доведені шляхом порівнювальних випробувань ізоляторів.

За час реалізації **методики випробувань ізоляторів на рівень радіозавод** по МЕК 437, була виявлена значна розбіжність в результатах вимірювань, виконаних на одних і тих же ізоляторах, але в різний час.

Аналіз даних багаторічних випробувань контрольних ізоляторів і експериментальні дослідження, виконані в кліматичній камері, показали, що на рівень радіозавад ( $Y$ ) від ізоляторів суттєво впливає відносна вологість повітря  $\chi$ , особливо при менших випробувальних напругах  $U_0$ . Встановлені три характерні області відносної вологості:  $\chi < 40\%$  - область найбільш високого рівня радіозавад;  $40\% < \chi < 65\%$  - область плавного зниження  $Y$  зі збільшенням  $\chi$ ;  $70\% < \chi < 80\%$  - область мінімального рівня. Аналогічна залежність характерна для впливу поверхневого опору ( $\rho_s$ ) діелектрика (скла), величина якого визначає напруженість електричного поля в приелектродних зонах ізолятора.

З іншого боку, іонізаційні процеси, які є джерелами високочастотних завад, безпосередньо пов'язані з напруженістю поля. Ґрунтуючись на цих положеннях, була отримана наближена формула приведення результатів випробувань ізоляторів на рівень радіозавад до нормальної наперед визначеної вологості:

$$Y(U, \chi) = Y(U, \chi_0) + 40 \cdot e^{\frac{2U}{U_B}} \lg \left[ \frac{E(\chi)}{E(\chi_0)} \right], \quad 40\% < \chi < 70\%, \quad (12)$$

де  $U_B$  - нормована витримувана напруга ізолятора при витримці протягом однієї хвилини.

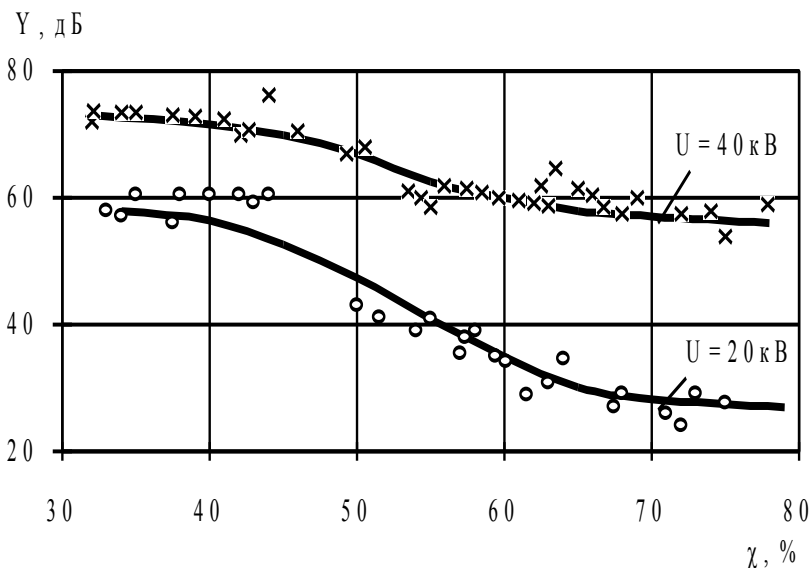


Рис. 5. Залежність рівня радіозавад ізоляторів від відносної вологості повітря

Задовільну збіжність розрахункових і експериментальних даних було отримано практично для всіх класів напруг ізоляторів. Приклад збіжності наведено на рис. 5.

Суть запропонованої методики визначення аеродинамічних характеристик полягає в обґрунтуванні фізичних умов і параметрів моделювання в лабораторних умовах процесів природного осідання забруд-

нень на поверхні ізоляторів. Опрацювання методики проводилось в Київському інституті інженерів цивільної авіації на аеродинамічній трубі ТАД - 2.

Оригінальною частиною розробленої методики є вибір парафіну в якості моделюючого забруднення речовини. Парафін в розчиненому стані інjektувався на робочу ділянку аеродинамічної труби за допомогою форсунок, та у вигляді найдрібніших часток переносився у повітряному потоці і осідав на поверхню ізолятора. Внаслідок хорошої адгезії одна до одної, част-



ки парафіну на протязі 3-10 хвилин відтворювали процес тривалого накопичення забруднень в експлуатації.

Параметри методики випробування визначались на основі критерію подібності Стокса:

$$S_{t1} = S_{t2} = \frac{m_{1,2} v_{1,2}}{6\pi g r_{1,2} l}, \quad (13)$$

де  $m_{1,2}$ ;  $v_{1,2}$ ;  $r_{1,2}$  - маса, швидкість, радіус часток, що порівнюються;  
 $l$  - характерний розмір (діаметр) досліджуваного об'єкту;  
 $g$  - динамічна в'язкість повітря.

З урахуванням умов мінімальних витрат забруднюючої речовини і помірного часу випробувань, з одного боку, та можливості моделювання найбільш типових для практики швидкостей повітряного потоку ( $v_1=2-10$  м/с) природних забруднюючих часток, з іншого боку, були прийняті такі параметри моделювання:

$$r_2 = 10^{-4} \text{ м}; \quad m_2 = 2,610^{-9} \text{ кг}; \quad v_2 = 6 \div 40 \text{ м/с}.$$

Аеродинамічні характеристики оцінювались за розподілом забруднення, а також шляхом визначення вологорозрядної напруги ізоляторів, забруднених цементом у відповідності з отриманим розподілом. Важливо зауважити, що обґрунтованість запропонованої методики була підтверджена співставленням результатів лабораторних і трирічних натурних досліджень на чотирьох типах ізоляторів, причому дослідницькі стенди розташовувались в трьох різних районах.

До ізоляторів, призначених *для приморських зон в умовах тропічного та субтропічного клімату*, ставляться додаткові вимоги на тепло-вологу стійкість, а також на стійкість щодо сольових забруднень. Разом з тим, регламентовані в ДСТУ(ГОСТ) і МЕК методи випробувань не враховують одночасного і тривалого впливу кліматичних умов і високої напруги.

Комплекс досліджень, виконаних при різних комбінаціях експлуатаційних умов, дозволив встановити особливості в поведінці ізоляторів, які раніше не було з'ясовано. В умовах високої вологості, температури і соляного туману виникає різке зниження зовнішньої електричної міцності ізоляції внаслідок інтенсивного накопичення сольового бруду на поверхні ізолятора. Виявилось, що в умовах, моделююючих субтропічні кліматичні умови, поверхня скла зазнає гідролітичної корозії.

Механізм мікроруйнування скла полягає у взаємодії іонів гідроксилу  $\text{OH}^-$  на реакційно-здатні катіони-модифікатори, їх віддалення з поверхневих шарів скла у вигляді акванових компонентів і виникнення на поверхнях силанольних угруповань  $=\text{Si}-\text{OH}$ . При цьому швидкість корозії відповідає швидкості накопиченню бруду і знаходиться в експоненціальній залежності від температури середовища ( рис. 6 ).

Друга особливість, яку було встановлено в ході випробувань - це інтенсивна корозія металевих елементів ізолятора. Як показали вимірювання, наявність тонкої електропровідної плівки на поверхні діелектрика обумовлює неперервні слабкі іонізаційні процеси в зоні закладання стержня і протікання малих струмів втрат (1-5 мА) з превалюючою додатковою полярністю.

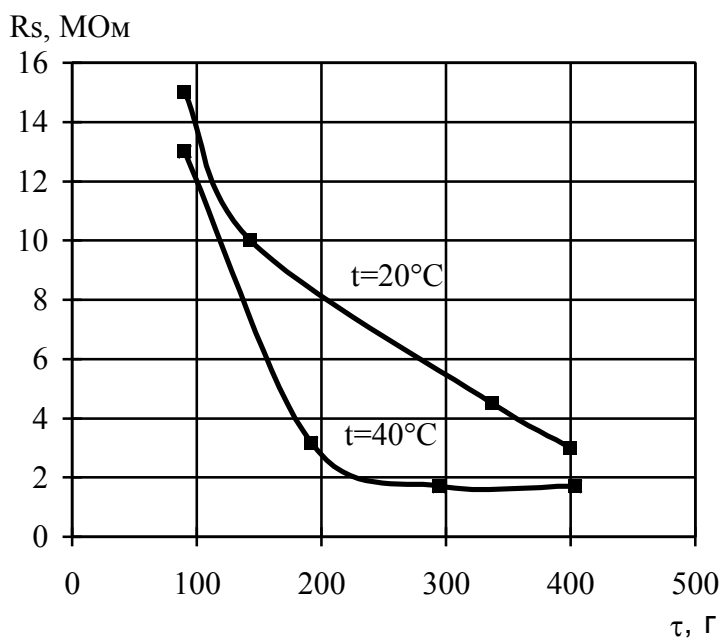


Рис. 6. Зміна поверхневого опору ізоляторів в камері соляного туману

Остання обставина пов'язана з ефектом полярності електричних розрядів в різко неоднорідному полі і є причиною електрокорозії металевих елементів в мережах змінного струму.

Виявлені особливості в поведінці ізоляторів зумовили суть методів випробувань, які полягали у визначенні мінімальних вологорозрядних характеристик і прогнозованого терміну служби антикорозійних покриттів металевих елементів шляхом тривалого експонування об'єктів, що випробовувались, під високою напругою в умовах підвищеної вологості, температури та сольового забруднення, а також вибір параметрів, причому в межах, прийнятих діючими стандартами.

**Четвертий розділ** присвячений реалізації на практиці розробці методичних основ вказаних вище положень.

Відомо, що скляні ізолятори відрізняються **високою внутрішньою електричною міцністю**, яка обумовлюється високим ступенем однорідності матеріалу. Разом з тим часто мають місце випадки вибраковки ізоляторів за причини недостатньої міцності при їх випробуваннях на пробій, а в експлуатації відмічались випадки масового ушкодження ізоляторів під час грозових перенапруг.

Важливим етапом в дослідженні було з'ясування механізму ушкодження ізоляторів. На основі рівноймовірної стійкості ізоляторів щодо дії імпульсної ( $\tau \leq 200$  нс) напруги і напруги промислової частоти, ідентичності характеру і місця розташування епіцентру руйнування, зроблено висновок про електричний початок пробою, а не гідродинамічний або тепловий. Епіцентр руйнування характеризувався наявністю чітко вираженої дзеркальної зони, де вперше були відкриті сліди каналу пробою в загартованому склі.

Розуміння механізму пробою ізоляторів дозволило вести ціленаправлений пошук причин, що приводять до руйнування при перенапругах. Першими розглядалися ті фактори, які могли привести до суттєвого перерозподілу або локального підвищення напруженості електричного поля в ізоляторі.

Відомо, що електрична провідність цементно-пісчаної зв'язки в основному визначається наявністю вільної вологи. В нормальних умовах електропровідність зв'язки коливається в межах питомого опору  $I g \rho_{св.} = 3-4$  (Ом·м). Однак, при тривалому перебуванні ізоляторів в сухих кліматичних умовах або у випадку порушення технологічного регламенту термовологої обробки ізоляторів, питомий опір може зростати на порядок і більше. Експериментально, а потім шляхом розрахунків, встановлено, що при  $I g \rho_{св.} = 5,5$  (Ом·м) відбувається помітне зниження електричної міцності ізолятора і це обумовлено різким збільшенням напруженості поля в зв'язці: пробій ізолятора відбувається в два етапи: спочатку пробивається зв'язка і виникають локальні точки підвищеної напруженості на поверхні скла; далі з отих точок розвиваються процеси пробою ізоляційної деталі.

Другим, більш значним, фактором, що викликає небезпеку для ізолятора, є наявність чужорідних мікрровключень в склі. Як впливає з результатів розрахунків електричного поля, чужорідні вкраплення з електропровідним показником ( $\rho_{св.} \leq 10^8$  Ом·м) в залежності від їх конфігурації та орієнтації у просторі можуть підсилювати вихідне поле в десятки разів.

Найбільше підсилення ( $K_E$ ) поля досягається при  $\rho_{св.} < 10^4$  Ом·м, для оцінки якого запропоновано апроксимуючий вираз:

$$K_E = 1 + h^{0,85} \cdot r^{-0,9}, \quad (14)$$

де  $h$  і  $r$  - довжина та радіус вкраплення в мм.

Тому, навіть при помірних діючих напругах максимальна напруженість поля у склі могла перевищувати критичне значення для твердих діелектриків,  $E_{кр.} \approx 10^6$  В/см.

Електронно-спектрометричні дослідження вкраплень і поверхні скла в епіцентрі руйнування засвідчили підвищену місткість окислів заліза (до 30% проти 0,2 %). За даними вимірювань діелектричних властивостей зразків, виготовлених по співвідношенням окислів, отриманих при спектрометричному аналізі, питомий опір чужорідної маси міг бути значно нижче величини

$\rho_{\text{вкл.}} \leq 10^8$  Ом·м, починаючи з якої стає можливим ефект підсилення електричного поля у склі. Різке збільшення електричної провідності було зафіксовано при місткості  $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 25\%$ , що пояснюється переходом провідності від іонної до електронної.

Причиною-наслідковий зв'язок між чужорідними вкрапленнями і внутрішньою електричною міцністю був підтверджений шляхом проведення експериментів по вилученню вкраплень за допомогою водяного розчину плавикової кислоти і подальших випробувань підвищеною напругою. Вилучення вкраплень призводило до повного відновлення електричної міцності ізоляторів. Встановлено, що найбільшу небезпеку для ізолятора завдають вкраплення, які мають відносно високу провідність ( $\rho_{\text{вкл.}} \leq 10^8$  Ом·м), і розташовані в головній частині ізолятора в приповерхневому шарі скла де має місце найбільша напруженість електричного поля. Природа виникнення такого роду чужорідних вкраплень поки що не з'ясована і може бути предметом окремого дослідження.

Таким чином, напіввідкриті повітряні вкраплення, “глибокі” мікросцилини на поверхні скла, які здатні сорбувати вологу і бруд з контактного середовища, являють собою потенційну небезпеку для ізолятора, якщо вони знаходяться в області найбільшої напруженості поля.

За результатами досліджень сформульовано додаткові вимоги, що ставляться до якості ізоляційних деталей ізоляторів для їх включення у відповідні стандарти. Зокрема рекомендовані багатоімпульсні випробування, при яких на досліджуваній об'єкт прикладається напруга на рівні 250-300 кВ пікового значення.

**Зниження рівня радіозавад.** Оптичні дослідження, виконані за допомогою ЕОП, дозволили виявити кореляцію між фотопроцесами на ізоляторі і рівнем радіозавад. Перші точки, що світяться, виникали з боку стержня на межі зв'язки диелектрик-повітря та з боку шапки, вздовж її торця. При цьому відмічалось виникнення стрибкоподібних нестійких завад, рівні яких коливались у широкому діапазоні: від 10-15 до 25-30 дБ.

Розрахунки електричного поля ізолятора показали, що точки максимумів напруженості поля знаходяться саме в приелектродних областях, де відмічались фотоявища. Тому задача звелась до пошуку найбільш ефективних і разом з тим, легко втілюваних рішень вирівнювання напруженості поля в області закладення стержня і на краю шапки ізолятора.

Для придушення коронування з боку шапки запропоноване шунтування повітряного зазору між торцем шапки і поверхнею ізоляційної деталі самою цементно-піщаною зв'язкою. Найбільш ефективним і припустимим рішенням щодо зниження  $E$  з боку стержня виявилось потовщення ізоляційної деталі у вигляді кільцевого ребра, яке максимально прилягає до головки ізоляційної деталі. Реалізація такого рішення дозволила зменшити максимальні напруже-

ності поля з боку шапки в 3 рази, з боку стержня на 30-40 % в залежності від глибини закладки.

Виявлено відчутній вплив діелектричних характеристик гідроізолюючого покриття, що наноситься на поверхню цементно-піщаної зв'язки в зоні закладки стержня. Найбільше зниження напруженості поля і, відповідно, рівня завад, досягається при  $\rho_{\text{пок.}} \geq 10^8$  Ом·м. Важливе значення здобуває і культура монтажу ізолятора. Скривлена поверхня зв'язки з боку стержня, гострі кромки зв'язки вздовж межі зі склом можуть підсилювати іонізаційні процеси на ізоляторі.

Приведені рекомендації по модернізації конструкції знайшли застосування на всіх типах ізоляторів, що виробляються заводами СНД. Це позитивно впливає на якість ізоляторів і на їх конкурентоспроможність.

**Оптимізація аеродинамічних характеристик гладких ізоляторів.** За розробленою методикою було випробувано на аеродинамічній установці зразкові конічні ізолятори класу 70 кН з різними кутами нахилу тарілки і сферичний ізолятор того ж класу. В ідентичних умовах випробовувались дерев'яні дреновані копії їх ізоляторів. Таким чином, забезпечувалась можливість співставлення результатів досліджень поля статичного тиску на поверхню ізоляційної деталі з характером осідання забруднення.

Встановлені дві характерні зони забруднення: верхня частина тарілки з боку набігаючого потоку і нижня частина - з протилежного боку.

Порівняльний аналіз результатів випробувань ізоляторів та дренованих моделей дав можливість з'ясувати умову відкладання забруднень на поверхні діелектрика:

$$\frac{dD_{\text{в}}}{d\psi} < 0, \quad (15)$$

де  $D_{\text{в}}$  - коефіцієнт статичного надмірного тиску на верхній частині поверхні;  $\psi \in 0-180^\circ$  - кут набігання потоку.

Це пояснюється тим, що виконання умови (15) обумовлює зниження швидкості повітряного потоку, що забезпечує випадання часток з потоку і осідання на верхній поверхні ізоляційної деталі.

Для нижньої поверхні ізоляційної деталі при додержанні умови:

$$D_{\text{н}}(\lambda) < 0, \quad (16)$$

відмічалась кореляція між зоною забруднення і коефіцієнтом статичного тиску на нижній поверхні  $D_{\text{н}}$ : частки здобували прискорення, направлене вертикально вгору, тим самим забезпечувався процес їх налипання на нижню пове-

рхню діелектрика. Таким чином, задача оптимізації конфігурації тарілки ізоляційної деталі зводилась до мінімізації зон, в яких виконувались умови (15) і (16):

$$\psi = \min \text{ и } \lambda = \min, \quad (17)$$

де  $\lambda$  - криволінійна координата, що проходить по нижній поверхні, починаючи з краю тарілки з підвітряного боку.

Було встановлено, що умова  $\lambda = \min$  особливо поблизу стержня найкращим чином задовольняється, коли кут нахилу тарілки  $\alpha \approx 15^\circ$ , а умова  $\psi = \min$  - при  $\alpha \geq 25^\circ$ .

З урахуванням важливості забезпечення зони слабого забруднення в приелектродній області і технологічної особливості виготовлення ізоляційних деталей зроблено висновок про те, що тарілка ізоляційної деталі повинна мати комбіновану форму: сферичну - в приелектродній частині з середнім кутом нахилу  $\alpha = 15^\circ$ , яка плавно переходить в конічну форму з  $\alpha \approx 25^\circ - 35^\circ$ .

На основі отриманих рекомендацій були розроблені і виготовлені зразкові ізолятори класу 70 і 120 кН, тарілки ізоляційних деталей яких мали комбіновану форму (сферичну і конічну).

Натурні випробування ізоляторів, що виконувались на протязі 2-х років в екстремальних умовах по забрудненню атмосфери, показали високі аеродинамічні властивості зразкових ізоляторів. На ізоляторах сфера-конус відмічались кільцеві чисті зони навколо стержня, що вплинуло не тільки на розрядні характеристики ізоляторів, але й на стійкість їх до термічної дії поверхневих часткових розрядів (таблиця 2). Останні обставини мають велике значення в забезпеченні надійної роботи поверхневих ліній в важких умовах забруднення.

Модернізовані ізолятори успішно експлуатуються на лініях Запорізького підприємства електричних мереж (ПЕМ) в районі металургійного заводу, Дніпропетровського ПЕМ в зонах підвищених відказів ізоляції, Краматорського ПЕМ поблизу хімпідприємства.

Дослідження **стійкості скляних ізоляторів щодо тропічних і субтропічних кліматичних умов** були виконані на зразках та ізоляторах з малолужного складу 13в та лужного складу 7 скла, що використовуються в сучасному ізоляторобудівництві.

Зразки в термостатичній камері підлягали впливу водяного розчину кухонної солі при різних температурних режимах. Вони періодично вилучались і після промивки та просушки зважувались на аналітичних терезах. Таким чином оцінювалась кінетика руйнування поверхні скла.

Результати натурних випробувань ізоляторів з різною формою тарілки ізоляційної деталі

Конфігурація ізоляційної деталі	Склад скла	Ізолятори, шт.	
		Випробувані	Ушкоджені
Конус ( $\alpha=36^\circ$ )	лужне	33	15
Конус ( $\alpha=7^\circ$ )	лужне	33	30
Двохкрилий брудостійкий	малолужне	33	12
Витягнуте ребро, брудостійкий	малолужне	33	3
Конус-сфера	лужне	33	0

Як згадувалось раніше, механізм гідролітичного корозійного руйнування скла (на основі оксидів типу:  $R_2O$  у кількості 14% (мас долей) у склі рецептури 7; або 2,5% у скла рецептури 13в) полягає у взаємодії іонів гідроксилу  $OH^-$ , при якому розриваються міцні зв'язки  $-Si-O-Si-$  і виникають слабкі:  $Si-O-Na$ ,  $Si-O-H$ . Процес корозії скла на початковому етапі протікає тим інтенсивніше, чим більше міститься в ньому  $R_2O$ . З ростом товщини гелеподібних продуктів розпаду скла швидкість реакції спадає і при температурі 20-40°C кількісні характеристики інтенсивності корозії скла 7 і 13в недостатньо чітко корелюють з вмістом  $R_2O$  (рис. 7).

Ізолятори експонувались в камері соляного туману при  $t=40^\circ C$  на протязі 1000 годин, причому одні знаходились під високою напругою ( $\lambda_3=3,1$  см/кВ), інші - без напруги. Після закінчення випробувань в камері поверхні діелектрика ретельно промивалися і очищувалися від сольових забруднень. Після просихання за допомогою мікроскопу визначалась глибина руйнувань скла на різних ділянках поверхні ізоляційної деталі.

На основі результатів виконаних досліджень зроблено важливі для практики висновки:

– в умовах підвищеної вологості, соляного забруднення і високої температури (до 40°C) інтенсивність руйнування поверхні скла визначається гідролітичною корозією; вплив малих струмів втрат (до 1-5 мА) незначний;

– скляні ізолятори складу 7 можуть поряд з ізоляторами складу 13в успішно експлуатуватись в країнах з тропічними і субтропічними умовами.

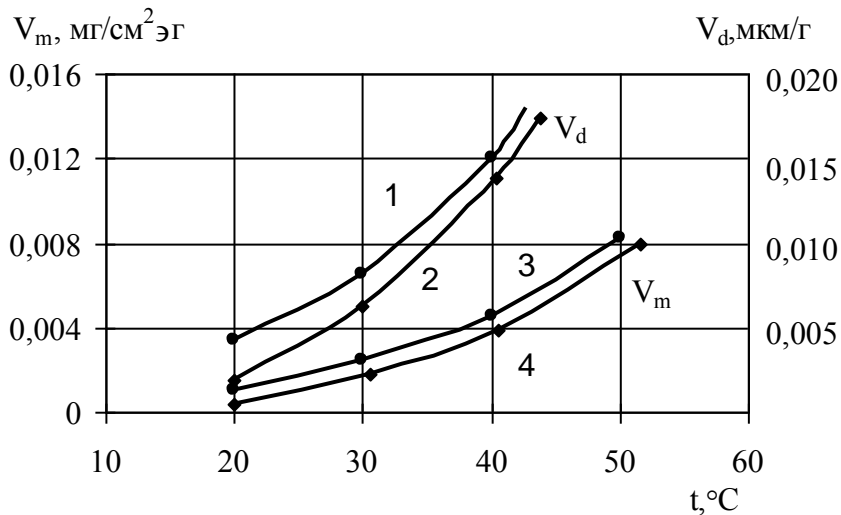


Рис. 7. Середні швидкості гідролітичної корозії скла по втраті маси  $V_m$ , і по глибині руйнування  $V_d$ .

1, 3 - склад 7; 2, 4 - склад 13в.

Запропоновано й інші способи підвищення надійності ізоляторів, що ґрунтуються на блокуванні необхідних передумов, які викликають корозію. До них відносяться: зниження ймовірності виникнення поверхневих розрядів і зменшення сталої складової струму втрат шляхом нанесення на діелектрик гідрофобного покриття з кремнійорганічних компаундів холодного затвердіння; механічне застерігання безпосереднього контакту стержня із зволожувальною частиною цементної зв'язки шляхом постановки втулки з кремнійорганічної резини замість цинково-алюмінієвої з метою продавлення електролітичних явищ на межі стержень-зв'язка. Полімерні матеріали, які рекомендується використовувати, відомі як високостійкі до експлуатаційних дій. Вони знайшли широке застосування у виготовленні високовольтних ізоляційних конструкцій для різних по забрудненню атмосфери районів.

Ефективність запропонованих способів показана рис. 8. За проміжок часу, коли повністю зруйнувалося цинкове покриття товщиною 60-80 мкм стержнів в гідрофобізованих ізоляторах, в ізоляторах с захисною втулкою з кремній-полімеру корозію на стержнях виявити не вдалось.

У п'ятому розділі запропоновано нову механізовану технологію відновлення і підсилення високовольтної ізоляції, що включає операції зняття забрудненого шару та нанесення гідрофобного покриття.

**Серед різноманітних засобів чистки** вибрано спосіб механічної дії, який застосовується при чищенні особливо міцних металевих конструкцій. Суть засобу полягає в направленій подачі під високим тиском на поверхню

В останні роки для підвищення стійкості **електрохімічної корозії металевих елементів** ізолятори, призначені для експлуатації на ПЛ тропічних і приморських регіонів, а також на ПЛ сталого струму виготовляються зі стержнями, спорядженими цинково-алюмінієвими втулками. Товщина втулок вибирається з таким розрахунком, щоб сама втулка, підлягаючи руйнуванню, застерігала стержень від корозії до закінчення терміну служби ізолятора.



виробу аерозольного струменя водяної суспензії, яка містить дрібноабразивні частки.

Кількість витрат, %

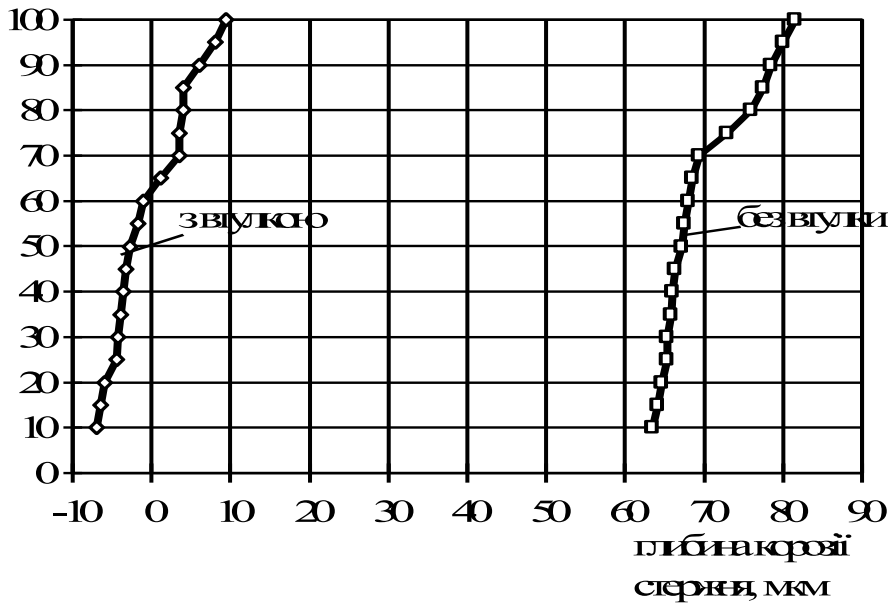


Рис. 8. Інтегральні функції розподілу глибини корозії стержнів ізоляторів після випробувань в камері туману на протязі 400 годин.

глину і глинозем. Для них характерні висока однорідність і дрібнодисперсність абразивних часток (менше 10 мкм).

Дослідження показали ефективність застосування водяної суспензії з двох компонентів: з глини та глинозему. Незначна добавка глини у водяну суспензію з глинозему суттєво підвищувала абсорбційні властивості рідинної фази, що перешкоджувало осіданню робочих часток. При цьому з'ясувалося, що оптимальне співвідношення між глиною і глиноземом цілком визначається їх дисперсним складом і не залежить від інших технологічних параметрів: кількості води в суспензії, тиску стисненого повітря. Так, для композиції цегляна глина+глинозем найбільша продуктивність очищення досягалась при співвідношенні 1:6.

Продуктивність очищення знаходилась в прямій залежності від концентрації твердої фракції в воді, але при їх співвідношенні менше 1:5 спостерігались перебої в системі подачі робочої суспензії. Були встановлені залежності між швидкістю очищення  $V_{ч}$  і тиском  $P_{в}$  стиснутого повітря (рис.9).

Наявність оптимальних умов очищення обумовлена тим, що при  $P_{в} < 3$  атм. не всі абразивні частки мали достатню кінетичну енергію для видалення забруднень з поверхні діелектрика, а при  $P_{в} > 4$  атм. через велику швидкість не всі частки встигали ввійти у взаємодію з забрудненням.

Вибір робочої речовини здійснювався за такими критеріями: висока місткість абразивних часток, розміри яких сумірні з мікронерівностями поверхні ізолятора, що обробляється, низька вартість і доступність, екологічна безпека. Були розглянуті різноманітні глинисті матеріали і за результатами електронномікроскопічного аналізу для подальших випробувань відібрали цегляну

Особливу проблему складає видалення відпрацьованого гідрофобного покриття у вигляді кремнійорганічних паст та вазелинів. В процесі експлуатації пасти (вазелини), наповнюючись твердими частками, не тільки втрачають свої захисні властивості, але й створюють умови для пробую ізоляції. Тому на практиці використання цього виду гідрофобізатора передбачає повне вилучення і повторне нанесення (причому ручним способом) принаймні один раз на рік. Додавання 15-20 % нетоксичного розчинника - нафтового сольвенту в глино-глиноземну суспензію дозволило механізувати очищення ізоляції від забрудненої пасти.

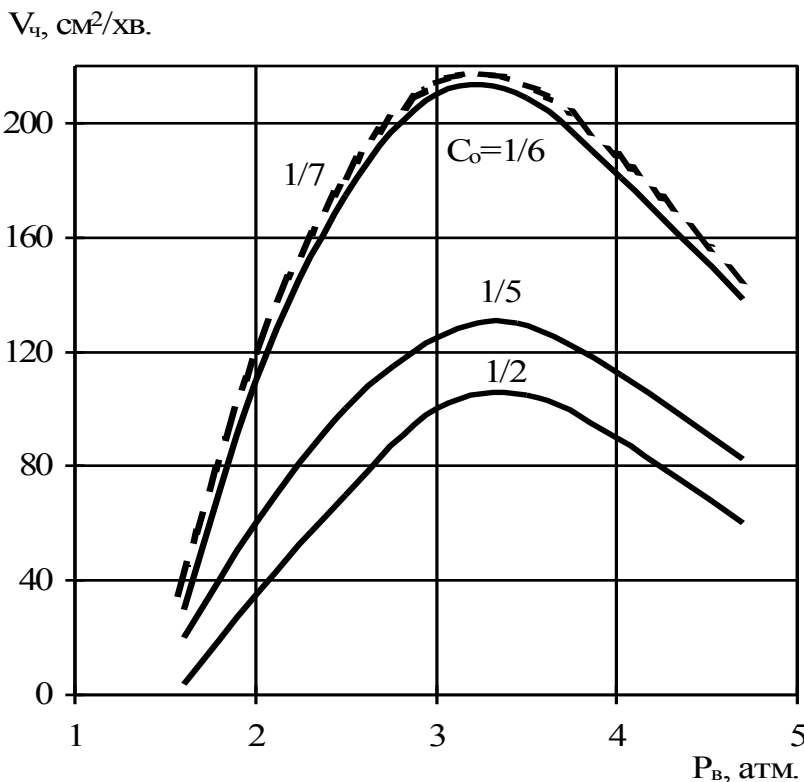


Рис. 9. Залежність швидкості очищення ізолятора від тиску повітря  
 $C_o$  - співвідношення глина / глинозем.

До головних позитивних якостей розробленого способу слід віднести високу якість і можливість очищення важкодоступних поверхонь, де, як правило, осідає більше забруднень.

Незважаючи на ефективність запропонованої технології механізованого очищення забрудненої ізоляції, відновлення ізоляції на більш тривалий період можна досягти шляхом послідуєчого **нанесення гідрофобного покриття**.

В світовій практиці проведення профілактики високовольтної ізоляції відмічається чітко визначена тенденція використання і розробки нових гідрофобних покриттів на основі кремнійорганічних каучуків холодної вулканізації. Однією з останніх таких розробок, що знайшла широке використання в ряді західних країн, є компаунд типу "Силгард" виробництва США.

Найбільш близьким по фізико-механічним і електрофізичним параметрам до "Силгарду" є компаунд КЛТ-30А. Для нього були підібрані розчинники: рідина поліметилсилоксонова типу ПМС, бензин і сольвент нафто-

ють свої захисні властивості, але й створюють умови для пробую ізоляції. Тому на практиці використання цього виду гідрофобізатора передбачає повне вилучення і повторне нанесення (причому ручним способом) принаймні один раз на рік. Додавання 15-20 % нетоксичного розчинника - нафтового сольвенту в глино-глиноземну суспензію дозволило механізувати очищення ізоляції від забрудненої пасти. До головних позитивних якостей розробленого способу слід віднести високу якість і можливість очищення важкодоступних поверхонь, де, як правило, осідає більше забруднень.

вий. У розчиненому стані покриття наносилось на фарфорові та скляні зразки, а також на ізолятори.

Прискорені випробування зразків і ізоляторів з гідрофобним покриттям на дію експлуатаційних факторів (поверхневих струмів витрат в електричному середовищі, високої напруги, температури і вологості; поверхневих часткових розрядів в умовах соляного туману) показали по сукупності характеристик відчутну перевагу композиції КЛТ-30А+сольвент нафтовий. Позитивний 20-річний досвід експлуатації покриттів з кремнійорганічних компаундів, подібних до "Силгард" дає можливість зробити висновок про можливості широкого використання квазанної композиції.

Нині на підстанціях і на повітряних лініях в зонах з інтенсивним забрудненням від хімічних, металургійних, цементних та інших заводів термін експлуатації ізоляторів з новим покриттям складає 2-3 роки і більше. Слід зауважити, що за цей час спостерігалось не погіршення, але навіть деяке підвищення гідрофобності покриттів, пов'язане, напевне, з поступовою орієнтацією гідрофобних радикалів в бік поверхні покриття.

## ВИСНОВКИ

1. В дисертації викладені нові шляхи вирішення наукової проблеми розробки та вдосконалення високовольтних лінійних ізоляторів, що полягають в розробці та удосконаленні методологічних основ конструювання, досліджень та випробувань ізоляторів, підвищення їх якості та надійності. Це дозволило створити ізолятори нового покоління, конкурентоспроможні на світовому ринку, відновлювати та підсилювати працездатність ізоляції на діючих, застарілих об'єктах.

2. Розроблені методи механічного і електричного розрахунків для конструювання високовольтних підвісних ізоляторів, що дозволяють визначити основні геометричні параметри силового вузла і конфігурації тарілки по заданим механічним і електричним характеристикам ізолятора.

3. Розроблена і реалізована на ПЕОМ математична модель для дослідження стаціонарного і нестаціонарного електричного поля з комплексною провідністю досліджуваного об'єкта і довкілля, яка враховує наявність шару забруднення на поверхні ізолятора.

4. Встановлені причини низької відтворюваності методики результатів випробувань ізоляторів на пробій в слабководному рідинному середовищі напругою промислової частоти по методиці МЕК-383. Обґрунтовані рекомендації по коригуванню методики, які полягають в зниженні верхньої межі допустимого питомого об'ємного опору та в урахуванні вимог по електричній міцності середовища. Рекомендації ввійшли в ДСТУ 2203-93 (ГОСТ 6490-93) і ДСТУ 2202-93 (ГОСТ 1232-93).

5. Встановлений вплив кліматичних умов на рівень радіозадів ізоляторів при випробуваннях у відповідності з МЕК 437. Встановлена природа існу-

вання тісної кореляції між рівнем радіозавад і відносною вологістю повітря. Запропонована функція корегування результатів випробувань по відносній вологості повітря. Результати досліджень використані при розробці ГОСТ 26196-84.

6. Досліджені особливості поведінки скляних ізоляторів при тривалому перебуванні в умовах приморських районів в країн тропічного та субтропічного клімату, які полягають в суттєвому зниженні електричної міцності ізолятора і інтенсивній корозії стержня. Розроблені методики випробувань ізоляторів на визначення мінімальних розрядних напруг і прогнозування стійкості стержня щодо електричної корозії.

7. Розроблена методика експериментального дослідження аеродинамічних характеристик ізоляторів та запропонована альтернативна методика визначення вологорозрядних напруг.

8. Запропоновані і удосконалені методи розрахунків, досліджень і випробувань були використані при:

- розробці та створенні вперше в СНД ізоляторів із загартованого скла всіх класів по механічному навантаженню, зі зменшеними на 30-40 % масогабаритними параметрами силового вузла з циліндричною формою;

- модернізації конструкцій тарілки ізоляційної деталі ізоляторів з метою підвищення електричних характеристик до вимог стандартів найбільш розвинутих країн;

- дослідженні динаміки осідання забруднень на поверхні ізолятора і обґрунтуванні критеріїв оптимізації конструкцій аеродинамічних ізоляторів; при розробці і створенні ізоляторів з покращеними аеродинамічними характеристиками;

- дослідженні впливу геометричних факторів і діелектричних властивостей матеріалів складових елементів ізолятора на інтенсивність іонізаційних процесів, які є джерелами високочастотних завад, розробці рекомендацій по зниженню рівня радіозавад і їх реалізації на всіх типах ізоляторів;

- розробці нового слабопровідного середовища для випробування ізоляторів на пробій напругою промислової частоти на основі використання кремнійорганічної рідини та трансформаторного масла, яке характеризується високим ступенем однорідності і стабільності електрофізичних параметрів (5<sup>ти</sup>-річний позитивний досвід використання в Державному випробувальному центрі при НДІВН);

- дослідженні механізму ушкодження ізоляторів із загартованого скла при дії підвищеної напруги, обґрунтуванні причин, що обумовлюють зниження внутрішньої електричної міцності ізоляторів і рекомендацій по вибракуванню ізоляційних деталей з дефектами в склі, які впливають на електричну міцність ізолятора. Рекомендації внесені в галузевий стандарт, регламентуючий вимоги до якості ізоляційних деталей скляних ізоляторів (ДСТУ 3407-96 на заміну ГОСТ 18328-73);

- дослідженні стійкості скляних ізоляторів щодо умов тропічного та субтропічного клімату і дії соляного забруднення, обґрунтуванні можливості

застосування ізоляторів з лужного скла складу 7 в цих умовах (в ДСТУ 3407-96 немає обмеження по використанню ізоляторів із лужного скла в умовах тропіків), а також при вивченні природи електрохімічної корозії стержнів ізоляторів в мережах змінного струму і розробці ефективних засобів збільшення терміну служби стержнів.

9. Розроблені основи механізованої технології відновлення і підсилення ізоляції, що включає повний комплекс профілактичних заходів: очищення від забруднень аерозольногідродинамічним способом, миття водою, гідрофобізація кремнійорганічним компаундом холодного затвердіння. Нова технологія пройшла апробацію на різних підприємствах електричних мереж, і в теперішній час, завдяки високій ефективності в порівнянні з відомою, знаходить широке застосування на високовольтних повітряних лініях та підстанціях.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ким Ен Дар. Исследование устойчивости стеклянных изоляторов к воздействию высокого напряжения // Энергетика и электрификация.- 1996. - №3. - С. 40-42.

2. Ким Ен Дар. Коррозия металлических элементов подвесных изоляторов и способы их защиты // Энергетика и электрификация.-1997. - №6. - С. 19-21.

3. Ким Ен Дар. Состояние фарфоровых изоляторов и методы их контроля // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та.- Харьков: ХГПУ, 1998. - Вып. 13. - С. 101-106.

4. Ким Ен Дар. Влияние влажности воздуха на электрическое поле высоковольтного изолятора //Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. -Харків: ХГПУ, 1998.- Вып. 13.- С. 96-100.

5. Ким Ен Дар. Методика определения разрядных напряжений изоляторов при солевых загрязнениях в условиях высокой влажности и температуры // Энергетика и электрификация. - 1998. - №2-3. - С. 39-41.

6. Ким Ен Дар. Технология восстановления и усиления внешней изоляции // Энергетика и электрификация.-1998.- №2-3. - С. 25-28.

7. Ким Ен Дар. Расчет сухоразрядных характеристик высоковольтных изоляторов тарельчатого типа // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та.- Харьков: ХГПУ, 2000. - Вып. 127. - С. 57-68.

8. Покровский С.Ф., Ким Ен Дар, Хлыстов В.Г., Штерн А.В. Повышение надежности силового узла изоляторов ВЛ // Энергетическое строительство. - 1983. - №8. - С. 45-47.

9. Покровский С.Ф., Ким Ен Дар, Новиков А.А., Кукс С.В. Особенности эксплуатации стеклянных изоляторов в районах с интенсивным промышленным загрязнением // Электрические станции. - 1983. - №6. - С. 53-55.

10. Покровский С.Ф., Ким Ен Дар, Кукс С.В. Исследование устойчивости загрязненных изоляторов к поверхностным разрядам // Информэнерго. Энергетика и электрификация. Сер. Строительство сельских электросетей. - 1983. - Вып.10. - С. 11-13.

11. Покровский С.Ф., Ким Ен Дар, Тарасова Н.Ф. О снижении уровня радиопомех от высоковольтных подвесных изоляторов // Электрические станции. - 1985. - №1. - С. 55-56.

12. Ким Ен Дар, Кукс С.В. Повышение надежности стеклянных изоляторов в районах с интенсивными промышленными загрязнениями // Электрические станции. - 1985. - №4. - С. 54-56.

13. Ким Ен Дар, Тарасова Н.Ф. Влияние атмосферных условий на уровень радиопомех от изоляторов // Электрические станции. - 1985. - №8. - С. 73-75.

14. Ким Ен Дар, Кукс С. В., Гриднев А.Г., Новиков А.А., Савченко В.И., Лазарев О.В. Сравнительные испытания линейной изоляции в аэродинамической трубе // Электрические станции. - 1987. - №7. - С. 47-49.

15. Ким Ен Дар, Тарасова Н.Ф., Кукс С.В. Влияние повышенного напряжения на стеклянные изоляторы // Электрические станции. - 1988. - №11. - С. 69-72.

16. Ким Ен Дар, Кукс С.В. Изолятор с улучшенными аэродинамическими характеристиками // Энергетика и электрификация. - 1994. - №1. - С. 44-47.

17. Ким Ен Дар, Шумилов Ю.Н. Корректировка методики испытаний изоляторов на пробой напряжением промышленной частоты // Энергетика и электрификация. - 1994. - №5. - С. 30-34.

18. Ким Ен Дар, Кукс С.В., Пономарев П.Е. Способы восстановления и усиления высоковольтной изоляции // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. - Харків: ХГПУ, 1998. - Вып. 13. - С. 122-127.

19. Ким Ен Дар, Кукс С.В., Пономарев П.Е. Увеличение стойкости кремнийорганического гидрофобного покрытия // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. - Харків: ХГПУ, 1998. - Вып. 13. - С. 116-118.

20. Ким Ен Дар, Таран В.Н. Методика прогнозирования показателей надежности подвесных линейных изоляторов // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. - Харків: ХГПУ, 1999. - Вып.69. - С. 75-81.

21. Ким Ен Дар, Пономарев П.Е., Козуб Б.В. Влияние поверхностного загрязнения на электрическое поле высоковольтного ввода // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. - Харків: ХГПУ, 1999. - Вып. 88. - С. 32-37.

22. Ким Ен Дар, Таран В.Н. Разрушение высоковольтных стеклянных изоляторов при воздействии сильного электрического поля // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. - Харків: ХГПУ, 2000. - Вып. 127. - С. 69-76.

23. Kim En Dar, Y. Shumilov, Y. Yashin, I. Gutman, R. Hartings. Windborne pollution application and test methods and their use for the optimal desing and insulator selection in different environments. // Seminar on experience and

application of composite insulators (CIGRE SC 33.99).-Ludvika (Sweden) - 1999. - P. 1-2.

24. Высоковольтный изолятор: А.с. 584342 СССР, МКИ Н 01 В 17/02/ Ким Ен Дар, В. Г. Хлыстов, С.Ф. Покровский (СССР). - №2183102/24-07; Заявлено 20.10.75; Оpubл. 15.12.77, Бюл. №46. - 3 с.

25. Высоковольтный изолятор: А.с. 626441 СССР, МКИ Н 01 В 17/02/ Ким Ен Дар, В. Г. Хлыстов, С.Ф. Покровский (СССР). - №2064085/24-07; Заявлено 26.09.74; Оpubл. 30.09.78, Бюл. №36. - 3 с.

26. Полимерный изолятор: А.с. 1365143 СССР, МКИ Н 01 В 17/20/ Ким Ен Дар, В. Н. Соломатов, Ю. Н. Яшин (СССР). -№3662245/24-07; Заявлено 29.08.83; Оpubл. 07.01.88, Бюл. №1. - 3 с.

27. Высоковольтный подвесной изолятор: А.с. 1379804 СССР, МКИ Н 01 В 17/02/ Ким Ен Дар, С. В. Кукс, О. В. Лазарев, В. И. Савченко (СССР). - №3914271/24-07; Заявлено 08.11.87; Оpubл. 07.03.88, Бюл. № 9.-2 с.

28. Высоковольтный подвесной изолятор: А.с. 1475399 СССР, МКИ Н 01 В 17/02/ Ким Ен Дар, Н.Ф.Тарасова, В.А.Константинов, А. Б. Злаказов (СССР). - №4256680/24-07; Заявлено 03.06.87; Оpubл. 23.04.89, Бюл. №15.-2 с.

29. Полимерный изолятор: А.с. 1697121 СССР, МКИ Н 01 В 17/00/ Ким Ен Дар, В. Н. Соломатов, Ю. Н. Яшин, В. А. Аксенов, Н. С. Шупик (СССР). - №4690861/01; Заявлено 11.05.89; Оpubл. 07.12.91, Бюл. №45. - 3 с.

30. Высоковольтный изолятор: А.с. 1711240 СССР, МКИ Н 01 В 17/02/ Ким Ен Дар, В. А. Аксенов, А.Б. Злаказов, С. Б. Сидоренко (СССР). - №4800354/07; Заявлено 8.10.91; Оpubл. 07.02.92, Бюл. №5. - 2 с.

31. Высоковольтный изолятор: А.с. 1798818 СССР, МКИ Н 01 В 17/02/ Ким Ен Дар, В. А. Аксенов, А.Б. Злаказов, Н.Ф. Тарасова, С. Ю. Ганпанцурова (СССР). - №4749075/07; Заявлено 16.10.89; Оpubл. 28.02.93, Бюл. №8. - 3 с.

32. Пат. 28339 А Україна. Спосіб очищення забрудненої високовольтної ізоляції / Кім Єн Дар, С. В. Кукс, В. В. Хилюк (Україна); Заявлено 25. 07. 96; Оpubл. 30. 06. 98, Бюл. №3.- 1 с.

33. Пат. 28296А Україна. Випробувальне середовище для електричного пробою високовольтних ізоляторів / Кім Єн Дар, Ю. М. Шумілов (Україна); Заявлено 12. 05. 96; Оpubл. 30. 06. 98, Бюл. №3.- 1 с.

## АНОТАЦІЇ

**Кім Єн Дар. Методологічні основи удосконалення високовольтних лінійних ізоляторів та методів їх випробувань. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.13 - техніка сильних електричних та магнітних полів.- Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2003.

Дисертацію присвячено проблемам розробки методологічних основ конструювання високовольтних ізоляторів, випробувань та досліджень. В роботі розвинено методи розрахунку механічних і електричних характеристик ізоляційних конструкцій. Скореговані діючі, розроблені альтернативні методи визначення стійкості ізоляторів до дії високих напруг, до забруднень при підвищеній вологості та температурі, досліджені електрофізикохімічні процеси в об'ємі та на поверхні ізоляторів, зумовлені цими діями. Надані рекомендації для оптимального конструювання, шляхи підвищення технічних та експлуатаційних характеристик ізоляторів. Результати роботи використовуються для створення та вдосконалення параметричного ряду ізоляторів, вони знайшли відображення в ДСТУ з методів випробувань та широко застосовуються під час профілактики ізоляції в електричних мережах.

*Ключові слова:* високовольтний ізолятор, методи моделювання і досліджень, електричне поле, електричний розряд, радіозавади.

**Ким Ен Дар. Методологические основы совершенствования высоковольтных линейных изоляторов и методов их испытаний.- Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.13 - техника сильных электрических и магнитных полей.- Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, 2003.

Диссертация посвящена проблемам разработки методологических основ конструирования высоковольтных изоляторов, испытаний и исследований. В работе развиты методы расчета механических и электрических характеристик изоляционных конструкций, в т.ч., электрических полей с комплексной проводимостью среды и загрязненной поверхностью. Получены математические соотношения между конструктивными параметрами силового узла изолятора и механической прочностью, конфигурацией тарелки изоляционной детали и электрическими характеристиками: импульсных и периодических напряжений в сухом состоянии и под дождем.

Проведены исследования электрофизических и электрохимических процессов в объеме и на поверхности изоляционной конструкции при воздействии критических эксплуатационных факторов, по результатам которых были усовершенствованы существующие и разработаны новые методы испытаний и исследований изоляторов. На основе изучения природы низкой воспро-



изводимости скорректирован метод испытания изоляторов на пробой в жидкой среде (МЭК 383); обоснована необходимость учета относительной влажности воздуха при испытании изоляторов на уровень радиопомех по МЭК 437, получена функция приведения результатов измерений к требуемой влажности. Основные положения корректировки нашли отражение в соответствующих ДСТУ в части методов испытания. Предложены альтернативные методы оценки влагоразрядных характеристик в условиях промышленных загрязнений и устойчивости изоляторов к солевым загрязнениям при повышенной влажности и температуре, учитывающие, в первом случае, аэродинамические свойства изоляторов, во втором - фактор времени, оказывающий значительное воздействие на процессы микроразрушения поверхности диэлектрика и, как следствие, на отложение загрязнений.

Развитие методологических основ позволило выявить новые закономерности в поведении изоляторов в тяжелых условиях эксплуатации, решить практические задачи по повышению их качества и надежности. Установлен двухстадийный механизм разрушения изоляторов из закаленного стекла под воздействием высокого напряжения: полному разрушению диэлектрика предшествует образование ионизированных каналов частичного пробоя стекла от точек расположения инородных включений. Наиболее опасными для изоляторов являются инородные включения с удельной проводимостью  $10^8$  мкС и более, расположенные в поверхностном слое стекла головки изоляционной детали. Разрушение стеклянных изоляторов может быть также инициировано частичным пробоем в цементно-песчаной связке, вероятность которого существенно возрастает в случае, если удельное сопротивление связки становится больше  $10^5$ - $10^6$ . Даны рекомендации по отбраковке изоляционных деталей с дефектами в стекле, оказывающими влияние на электрическую прочность изолятора. Эти рекомендации нашли свое отражение в отраслевом стандарте, регламентирующем требования к качеству изоляционных деталей стеклянных изоляторов (ДСТУ 3407-96).

Установлены влияния геометрических факторов и диэлектрических свойств материалов составных элементов изоляторов на интенсивность ионизационных процессов, являющихся источниками высокочастотных помех от изоляторов. Исследована устойчивость стеклянных изоляторов к условиям тропического и субтропического климата и воздействию солевого загрязнения и обоснована возможность применения в этих условиях изоляторов из щелочного стекла состава 7; изучена природа электрохимической коррозии металлических элементов изоляторов в сетях переменного тока, особенность которой связана с эффектом полярности протекания поверхностных частичных разрядов при солевых загрязнениях.

Предложена эффективная технология проведения профилактических работ по восстановлению и усилению внешней изоляции, суть которой заключается в использовании аэрозольно-гидродинамического способа очистки

загрязненной поверхности и в нанесении гидрофобного покрытия на основе кремнийорганического компаунда холодного отверждения.

Разработанные и усовершенствованные методы расчетов, исследований и испытаний были использованы при разработке и создании впервые в СНГ изоляторов из закаленного стекла всех классов по механической нагрузке с уменьшенными на 30-40% массогабаритными параметрами силового узла; при модернизации конструкций тарелки изоляторов с целью повышения электрических характеристик до требований стандартов наиболее развитых стран, в том числе, по уровню радиопомех; при разработке и создании изоляторов с улучшенными аэродинамическими характеристиками для работ в районах с интенсивными промышленными и природными загрязнениями; при разработке новой слабопроводящей среды для испытания изоляторов на пробой напряжением промышленной частоты, характеризующейся высокой степенью однородности и стабильности электрофизических параметров. Новая технология восстановления и усиления изоляции нашла широкое применение в различных электрических сетях (в частности, в открытых распределительных устройствах предприятий Донецкоблэнерго, Запорожьеобэнерго; Зуевской, Углегорской, Трипольской тепловых электростанциях).

*Ключевые слова:* высоковольтный изолятор, методы моделирования и исследований, прочность, электрическое поле, электрический разряд, радиопомехи.

**Kim Yen Dar. Methodological principles of high-voltage line insulators and their test methods up-dating.-Manuscript.**

The thesis for doctor's degree of technical sciences, specialty 05.09.13 - Strong Electrical and Magnetic Field Technique. - National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Kharkov, 2003.

The thesis deals with the problems of developing methodological principles of high-voltage insulator design, testing and investigation. The methods of calculation of insulating structures mechanical and electrical performance are developed in this work. The current methods of determining insulator resistance to high-voltage and pollution stresses under high humidity and high temperature conditions are adjusted and the alternative ones are developed. Electrophysical processes inside insulators and on their surface, depending on those stresses, are investigated. The work includes guidance on optimum design and the way of improving insulators technical and operating characteristics. The results of the thesis are used in creation and improvement of insulators parametrical series, they found an application in DSTU on test methods and are widely used in electrical systems preventive treatment.

*Key words:* high-voltage insulator, methods of simulation and researches, electrical field, electrical discharge, radio interference.