

Л. Б. ЖОРНЯК, О. І. АФАНАСЬЄВ, В. М. ЩУСЬ

## АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ТА СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ЗОВНІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ АПАРАТІВ

В статті авторами було проведено аналіз конструктивних та структурних особливостей різних матеріалів зовнішньої ізоляції високовольтних апаратів, а саме високовольтного обладнання станцій та підстанцій. Експлуатаційна надійність зовнішньої ізоляції визначається переважно електричним навантаженням, яке характеризується місцевими значеннями напруженості поля. Напруженість поля вздовж ізоляційної покривки розподіляється дуже нерівномірно і має максимальне значення біля електроду з високою напругою. Електричні ізолятори використовуються в усіх високовольтних апаратах електричних кіл передачі та розподілу для відокремлення напруги від землі. Матеріали, які використовуються при розробці та виробництві електричних ізоляторів, мають певні унікальні характеристики. Ці матеріали перешкоджають вільному проходженню внутрішніх електричних зарядів у матеріалі, що робить практично неможливим проведення електричного струму. Здатність матеріалу запобігати електропровідності характеризується його діелектричною міцністю. Полімерні ізолятори дозволяють поєднувати високу механічну міцність з задовільними електричними характеристиками. У таких комбінованих конструкціях в якості елемента, що витримує механічне навантаження, використовуються склопластикові стрижні або циліндри. Також конструкція внутрішньої ізоляції конденсаторного типу, що просочена і наповнена затверділою епоксидною смолою, дозволяє особливо точно намотувати синтетичний матеріал і розміщувати алюмінієві фольги, які забезпечують електричну ізоляцію від зовнішнього середовища. Головним елементом зовнішньої ізоляції є опорна ізоляційна покривка, в середині якої розміщуються елементи активної частини певного електричного апарату. Її основою є звичайний скло-епоксидний циліндр (це забезпечує механічну стійкість конструкції), на якому розміщуються ребра з кремнійорганічної гуми, що в свою чергу забезпечує електричну міцність зовнішньої ізоляції.

**Ключові слова:** ізоляційна конструкція, зовнішня ізоляція, високовольтне обладнання, трансформатор струму, напруженість поля, ізоляційна покривка, кремнійорганічна гума, опорна ізоляційна покривка, роботоспроможність, довговічність, експлуатаційна надійність.

L. B. ZHORNIAK, A. I. AFANASIEV, V. M. SCHUS

## ANALYSIS OF DESIGN AND STRUCTURAL FEATURES OF THE EXTERNAL INSULATION MATERIALS OF HIGH-VOLTAGE DEVICES

In the article, the authors have analysed the design and structural features of various materials for external insulation of high-voltage apparatuses, namely, high-voltage equipment of stations and substations. The operational reliability of the external insulation is determined mainly by the electrical load, which is characterized by the local values of the field strength. The field strength along the insulating cover is distributed very unevenly and has a maximum value near the electrode with high voltage. Electrical isolators are used in all high-voltage apparatus of electrical transmission and distribution circuits to separate the voltage from the ground. The materials used in the development and production of electrical insulators have certain unique characteristics. These materials prevent the free passage of internal electric charges in the material, which makes it practically impossible to conduct an electric current. The ability of a material to prevent electrical conductivity is characterized by its dielectric strength. Polymer insulators allow you to combine high mechanical strength with satisfactory electrical characteristics. In such combined structures, fiberglass rods or cylinders are used as an element that withstands mechanical load. Also, the design of the internal insulation of the capacitor type, impregnated and filled with hardened epoxy resin, allows for particularly precise winding of the synthetic material and the placement of aluminium foils, which provide the capacitive levelling of the gradation and are necessary for the control and formation of the electric field. Such a field is controlled in such a way as to optimize the dimensions, mass and electrical characteristics of the high-voltage apparatus depending on the voltage class and other parameters. The protective polymer coating provides high electrical characteristics of insulators under operating conditions. It is known that during the operation of the high-voltage device, the aging rate of the external insulation is additionally enhanced due to the complex and heterogeneous structure of the insulating cover itself, as well as the influence of the surrounding environment and weather conditions. The main element of external insulation is the supporting insulating cover, in the middle of which the elements of the active part of a certain electrical device are placed. Its basis is usually a glass-epoxy cylinder (this ensures the mechanical stability of the structure), on which ribs made of organosilicon rubber are placed, which in turn ensures the electrical strength of the external insulation.

**Keywords:** insulating structure, external insulation, high-voltage equipment, current transformer, field strength, insulating cover, organic silicon rubber, supporting insulating cover, operability, durability, operational reliability.

**Вступ.** Обладнання енергосистем має бути здатним успішно працювати в періоди максимумів споживання, щоб надійно забезпечувати електроенергією промислових та соціальних споживачів саме тоді, коли вона найбільш потрібна. Високовольтне обладнання із зовнішньою ізоляцією в повітрі з цієї причини також має витримувати різні впливи навколишнього середовища, включаючи екстремальні температури повітря, вологість, забруднення повітря (наприклад, природні забруднення, сіль або промислові забруднення), суворі погодні умови (наприклад, циклони, урагани), і навіть землетрусу. Відбір, розробка та використання кращих матеріалів, здатних протистояти операційним наванта-

женням та умовам навколишнього середовища, що використовуються для високовольтного обладнання з такою зовнішньою ізоляцією, мають основне значення для забезпечення надійної експлуатації високовольтних систем.

Значна кількість електричного обладнання відкритих розподільних пристроїв (ВРП), а також електричних станцій та підстанцій розташовується на відкритому просторі, тому при розробці схем та конструктивного виконання головних знижувальних та розподільчих підстанцій необхідно враховувати електричні властивості пробою цього обладнання в повітряному середовищі. А отже, через те, що мінімальні ізоляційні від-

стані в повітрі для обладнання ВРП та закритих розподільних пристроїв (ЗРП) з напругою від 3 кВ до 220 кВ, які забезпечують умови безпеки та зручність обслуговування (мінімальні відстані від струмопровідних частин до заземлених конструкцій, а також між струмопровідними частинами різних фаз тощо), регламентовані ПУЕ, то це може призвести до збільшення площі при розміщенні та встановленні такої апаратури [1, 2, 3, 5].

Будь-яке високовольтне обладнання ЗРП або ВРП (масляних та елегазових трансформаторів струму (ТС) та напруги (ТН), вводи силових трансформаторів, елегазових колонкових та бакових вимикачів, елегазових комплектних розподільних пристроїв (КРПЕ), обмежувачів перенапруги тощо) має ізоляційну конструкцію, яка є важливою складовою частиною конструкцій пристроїв високої напруги і, зазвичай, крім ізоляційних завдань, виконує ще й інші функції, зокрема, сприйняття або передачу механічних сил, відведення тепла або герметизацію від навколишнього середовища. Через це забезпечення вимог, що висуваються до ізоляції, визначає концепцію її виконання, конструкцію та форму конкретного ізоляційного пристрою, а також ізоляційний матеріал, з якої вона виготовляється [1, 2, 3]. При технічній реалізації ізоляції треба пам'ятати, що не завжди вдається знайти оптимальне з усіх точок зору рішення. Тому часто необхідно домагатися компромісів, які забезпечують нормальне функціонування та необхідний термін експлуатації за умови найбільш економічного вирішення.

При несприятливих умовах довкілля, а також за умови високовартісних площ станцій та підстанцій або їх малого розміру при розміщенні нового обладнання або його модернізації, необхідно домагатися, щоб воно мало значно менші габарити. Підстанції, розташовані всередині гребель гідроелектростанцій, у житлових районах або на чутливих до перешкод промислових підприємствах, в суворих кліматичних умовах, таких як пустелі, високогір'я або нафтові морські платформи, якісна зовнішня ізоляція також підвищує ефективність мережі, оскільки допускає передачу енергії за більш високих напруг.

Як вже було зазначено в роботах [3, 6] в умовах промислової експлуатації електричних апаратів високої напруги найважливішими властивостями, що забезпечують високу ефективність їх використання, є роботоспроможність, довговічність та експлуатаційна надійність їх ізоляційної конструкції. Конструктивні особливості таких апаратів є причиною утворення різко неоднорідного електричного поля, викривлення (спотворення) якого, в свою чергу, призводить до нерівномірного розподілу електричного навантаження на ізоляційну конструкцію [3, 5, 6]. Ця конструкція в залежності від впливу на неї факторів оточуючого середовища прийнято розподіляти на внутрішню та зовнішню. Головним елементом зовнішньої ізоляції є опорна ізоляційна покривка, в середині якої розміщуються елементи активної частини певного електричного апарату. Наприклад, у трансформаторах струму це є заземлені виводи вторинних обмоток, у трансформаторів напруги – виводи первинної обмотки, у каска-

дних трансформаторів напруги – активна частина трансформатора. Загальний вигляд опорно-ізоляційної покривки показано на рис. 1.

Відомо, що в процесі експлуатації високовольтного апарату швидкість старіння зовнішньої ізоляції додатково підсилюється через складну та неоднорідну структуру самої ізоляційної покривки, а також впливу оточуючого середовища та погодних умов (рис. 2).



Рис. 1. Вид загальний опорно-ізоляційної силіконової та порцелянової покривки зі спіральною ребренню [6, 9, 10]

Її основою є зазвичай скло-епоксидний циліндр (це забезпечує механічну стійкість конструкції), на якому розміщуються ребра з кремнійорганічної гуми, що в свою чергу забезпечує електричну міцність зовнішньої ізоляції. Також було зазначено, що експлуатаційна надійність зовнішньої ізоляції визначається переважно електричним навантаженням, яке характеризується місцевими значеннями напруженості поля. Напруженість поля вздовж ізоляційної покривки (див. рис. 1) розподіляється дуже нерівномірно і має максимальне значення біля електроду з високою напругою [1, 3].

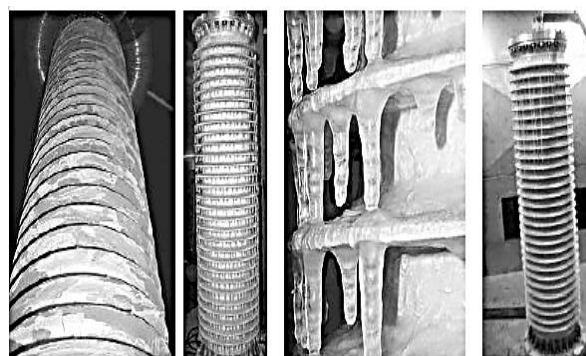


Рис. 2. Зовнішня ізоляція при заledenні ребер

Оскільки ізоляційна покривка має осьову симетрію, то для вирівнювання розподілу напруженості, тобто зниження її у верхній частині ізоляційної покривки, на класи номінальної напруги більшої за 110 кВ застосовуються вбудовані екрани. Їх використання дає можливість мінімізувати масо-габаритні розміри системи екранування [1, 8, 9]. Для вирівнювання розподілу напруженості в конструкції трансформатора пе-

редбачений вбудований просторовий екран циліндричної форми та розміщений у верхній частині ізоляційної покритишки.

На ізоляторах, уражених забрудненням, утворюється такий мокрий та твердий шари забруднення, через які утворюються струми витоку, спалахи забруднення, і як наслідок – відключення електроенергії для споживачів (рис. 3).

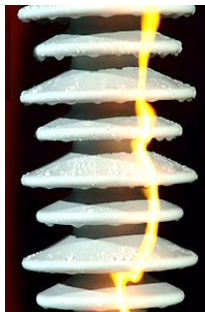


Рис. 3. Пробій зовнішньої ізоляції за наявності шару забруднення, вологості або дощових крапель [1, 3]

**Мета роботи.** Метою цієї роботи є дослідження технологічних методів можливості підвищення ефективності роботи та зниження матеріалоємності високовольтного обладнання за рахунок удосконалення конструкції зовнішньої ізоляції на прикладі трансформаторів струму та високовольтних ввідів.

Електричні ізолятори використовуються в усіх високовольтних апаратах електричних кіл передачі та розподілу для відокремлення напруги від землі. Матеріали, які використовуються при розробці та виробництві електричних ізоляторів, мають певні унікальні характеристики. Ці матеріали перешкоджають вільному проходженню внутрішніх електричних зарядів у матеріалі, що робить практично неможливим проведення електричного струму. Однак не всі ізоляційні матеріали однакові. Деякі виконують завдання ізоляції електричного струму краще, ніж інші. Насправді, здатність матеріалу запобігати електропровідності характеризується його діелектричною міцністю.

Відомо, що діелектрична міцність – це максимальне електричне поле, яке може витримати матеріал без втрати своїх ізоляційних властивостей та вимірюється в мегавольтах на метр (МВ/м). Чим вища діелектрична міцність, тим краще матеріал запобігає електропровідності. Відомо, що ідеальний вакуум насправді є найкращим електричним ізолятором, тому що має найвищу діелектричну міцність, оцінену в  $1 \times 10^{12}$  МВ/м (таблиця 1). Ідеальний вакуум не містить матеріалу для пробою і, отже, є ідеальним електричним ізолятором. Насправді ідеального вакууму майже неможливо досягнути, але високий вакуум також є чудовим ізолятором, розрахованим на 30 МВ/м. Високий вакуум використовується як метод ізоляції в такому обладнанні, як вакуумні вимикачі. Нижче наведено частковий перелік діелектричної міцності різних матеріалів, у тому числі тих, що використовуються в системах передачі та розподілу.

Для вирішення проблеми, пов'язаної з впливом зовнішнього середовища та погоди, багато компаній-розробників запропонували використовувати кремнійорганічну гуму на напруги більші за 110 кВ.

Відомо, що силіконові порожнисті ізолятори HIVOLT [10, 11, 12, 14] виготовлені з високоміцної скловолоконної трубки з формованою силіконовою гумою. На обох кінцях ізоляторів зібрані металеві фланці з алюмінієвого сплаву, порожнисті ізолятори з силіконової гуми HIVOLT мають необхідні як механічні, так і електричні характеристики. Продукція широко використовується для автоматичних вимикачів, ввідів силових та розподільних трансформаторів, вимірювальних трансформаторів, кабельних виводів, розрядників перенапруги тощо. Порожнисті композитні ізолятори в діапазоні напруг від 36 кВ до 500 кВ змінного струму протестовані та сертифіковані відповідно до ІЕС 61462.

Смоли поліетилену високої щільності (HDPE), забезпечуючи баланс міцності, жорсткості, стійкості до розтріскування під впливом навколишнього середовища (ESCR) і технологічності, добре підходить для ряду жорстких застосувань, саме таких як зовнішня ізоляція.

Таблиця 1 – Діелектрична міцність матеріалу

Діелектрична міцність матеріалу	МВ/м
Ідеальний вакуум	$1 \times 10^{12}$
Слюда	118
Тефлон	60
Високий вакуум	30
Масло трансформаторне	24
Ізолятор HDPE	20
Кремнієвий ізолятор	20
Скляний ізолятор	14
Нейлон	14
Гума	12
Ізолятор порцеляновий	12
Повітря	3

Перевагами полімерних ізоляторів, згідно з ГОСТ 56737-2015 [4], є більш високий електричний опір при забрудненні порівняно з аналогічними порцеляновими ізоляторами з однаковою шляхом витоку. Ця перевага ще більш очевидна завдяки використанню гідрофобності матеріалу. Іншими важливими перевагами полімерних ізоляторів є: гнучкість (що дозволяє встановлювати, наприклад, оптичні трансформатори у вертикальному, горизонтальному положенні та при нахилі, при цьому не змінюється точність вимірювань); компактність (що дозволяє встановлювати їх в умовах, неприйнятних для трансформаторів з порцеляновою покритишкою); менша вага тощо. Відповідно до «Інструкції по вибору ізоляції електроустановок» [3, 4], надавши полімерному ізолятору ребристу форму, можливо зменшити струм витоку (на 1-2 порядки нижче, ніж у фарфорових ізоляторів) до необхідного рівня над поверхнею ізолятора в умовах забруднення та вологи. В залежності від зростання забруднення ізолятори з однакою висотою ребер вимагають збільшення довжини (висоти конструкції), щоб отримати збільшену довжину шляху витоку струму. Таке рішення не можна використовувати постійно через певну неекономічність і необхідність розробки нового електрообладнання, особливо при його експлуатації за умови підвищеного за-

бруднення навколишнього середовища. Рішенням даної проблеми є конструкція ізоляторів зі змінним виступом ребер (рис. 4). Їх профіль також є важливою складовою полімерного ізолятора, оскільки цей різновид ізолятора дозволяє покриття, що самоочищається.



Рис. 4. Ізолятор зі змінним виступом ребер [10, 14]

Наприклад, компанія RHM International пропонує використовувати в якості ізоляції осердя HV DryShield RIF – ізоляцію (запатентовану тонкосортову ізоляцію конденсаторного типу з композитних матеріалів, таких як ПТФЕ (політетрафторетилен), а також високоякісну силіконову гуму в якості зовнішньої ізоляції, що забезпечує значну стійкість до забруднення та клімату завдяки рівномірно контрольованому профілю електричного поля (рис. 5 та 6).

Подвійний ТС забезпечує як аналоговий, так і цифровий сигнал одночасно. Ця унікальна конструкція забезпечує надзвичайну гнучкість у впровадженні діджиталізації в роботу трансформатора струму за мінімальних витрат.



Рис. 5. GDGL виробництва RHM International [13]

Конструкція ТС з рівномірно розподіленим електричним полем усуває точки напруги та доповнюється зовнішньою силіконовою ізоляцією. Унікальне поєднання дизайну, матеріалів і виробничого ноу-хау забезпечує дуже міцну ізоляцію з мінімальним ризиком спалаху та дуже низькими значеннями часткового розряду та  $\tan \delta$ . Все це забезпечує необхідні електричні, механічні та термічні робочі запаси.

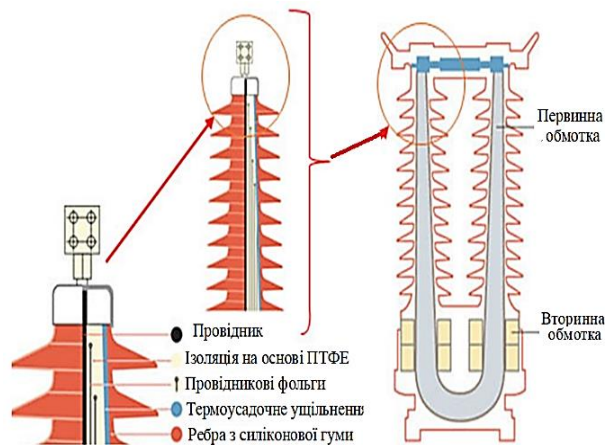


Рис. 6. Ізоляція HV DryShield у трансформаторі струму [13]

Термічна напруга під час роботи обладнання також може призвести до пошкодження компонентів через нерівномірне теплове розширення та стиснення. Крім того, процес затвердіння епоксидної смоли може бути сильно екзотермічним, і деталі можуть бути пошкоджені теплом, що виділяється під час затвердіння. До того ж епоксидні модулі ремонту не підлягають, тому при поломці збірку потрібно викинути. Інший висновок полягає в тому, що аналіз несправностей є дуже обмеженим, а тому це ускладнює вивчення будь-яких проблем, що виникають.

Разом з тим двокомпонентний кремній, як і епоксидна смола, широко використовується у високовольтній промисловості, але погана адгезія, як зазначають дослідники, мабуть, найбільший недолік силіконів, який може бути усунений правильною підготовкою поверхні (рис. 7). На деякі силікони несприятливо впливають певні компоненти матеріалів. У присутності цих матеріалів процес затвердіння гальмується, а силікон може ніколи не затвердіти. Однокомпонентні силікони доступні в самовирівнювальній та тиксотропній формах, тобто самонівелюючій здатності та здатності зменшувати в'язкість (розріджуватися) від механічного впливу та збільшувати в'язкість (згущуватися) у стані спокою.



Рис. 7. Ізоляція з двокомпонентного кремнію [12, 14]

Тиксотропні матеріали не течуть і залишаються в тій формі, як вони виходять з технологічної труби. Щодо цього він чимось схожий на крем для гоління. Перед затвердінням тиксотропного силікону можна надати бажаної форми. Бульбашки повітря можуть затримуватися тиксотропними силіконами в стані затвердіння, тому їх застосування також є обмеженим.



Рис. 8. Ізолятори з покриттям Wacker's powertsil [12]

Певною альтернативою для вирішення проблем, пов'язаних з погодними умовами, є покриття Wacker's powertsil ізоляторних покришок, перевагами якого є гідрофобність та передача гідрофобності, захист від спалаху, не потрібність чистки та відмінна стійкість до атмосферних впливів та УФ-променів.

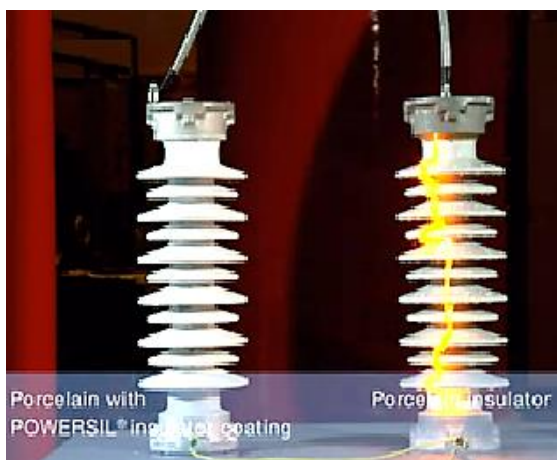


Рис. 8. Випробування ізоляторів з покриттям Wacker's powertsil та без нього за однакових умов [10, 11]

Компанія АББ виробляє сухі високовольтні вводи з внутрішньою ізоляцією конденсаторного типу по технології O Plus Dry™ [10, 13].

Ці вводи O Plus Dry розроблені та виготовлені з новітніх матеріалів, техніки та процесів. У вводах O Plus Dry використовується технологія просоченої синтетичної смоли (RIS), в результаті чого вони не містять ні масла, ні паперу або порцеляни. Конденсаторного типу внутрішня RIS-ізоляція відливається в тверде тіло, яке містить систему епоксидної смоли з фольгою. Силіконовий шар покришки потім накладається на повітряну частину конденсаторної ізоляції. Результатом цього підвищується безпека та надійність, а також має наступні переваги:

- покращену доступність;
- зменшені потреби в обслуговуванні;
- без олії та порцеляни;
- вибухостійкість;
- гідрофобність/самоочищення;
- зручне зберігання.

Вводи за технологією O Plus Dry призначені для використання в мінеральному маслі у трансформаторах змінного струму та відповідають усім вимогам відповідного IEEE електричних та розмірних стандартів, а також напругам, що мають бути витримані для звичайних рівнів випробувань, які вимагаються стандартами ІЕС.

Ця технологія дозволяє отримати такі переваги як:

- вводи мають захисні погодні покриття, які утворюються з використанням наповненої високотемпературної вулканізації (НТВ) силіконової гуми, яка спірално видавлена на повітряній частині вводу (рис. 9);
- вводи мають перевірочний вивід напруги для перевірки коефіцієнта потужності без відключення виводів обмотки;
- вводи не містять паперу;
- вводи не містять жодної ізоляційної рідини для відокремлення ізоляційної рідини з трансформатором;
- часткові розряди для вводів нижче 5 pC при дворазовому збільшенні максимальної напруги лінія-земля (L-G);
- коефіцієнт потужності C1 для вводів не перевищує 0,50 відсотка при 20 °C.

Покришку, що захищає від впливу погодних умов, було ретельно розроблено, щоб оптимізувати її роботу як погодну покришку. Цей профіль має чергування малих і більших ребер для самоочищення (рис. 9 та 10). Така конструкція була спроектована як безперервна неглибока спіраль з крапельним краєм і крутістю схилу, щоб забезпечити стікання води по краю сараю. Нижня поверхня так само, як і верхня поверхня кожного ребра нахилена під кутом вниз. Цей прийом оптимізує захищені зони від погодних опадів, в результаті чого забезпечено мінімально можливі струми витоку навіть у важких умовах. Кінець кожного ребра добре закруглений завдяки чому забезпечується мінімізація величини діелектричної напруги та зменшення ризику ерозії.



Рис. 9. Зовнішня спіральна антипогодна ізоляція високовольтного вводу O Plus Dry™ [10]

Покришку, що захищає від впливу погодних умов, було ретельно розроблено, щоб оптимізувати її роботу як погодну покришку. Цей профіль має чергування малих і більших ребер для самоочищення (рис. 9 та 10). Така конструкція була спроектована як безперервна неглибока спіраль з крапельним краєм і крутістю схилу, щоб забезпечити стікання води по краю ребра. Нижня поверхня так само, як і верхня поверхня кожного ребра нахилена під кутом вниз. Цей прийом оптимізує захищені зони від погодних опадів, в результаті чого забезпечено мінімально можливі струми витоку навіть у важких умовах. Кінець кожного ребра добре закруглений завдяки чому забезпечено мінімізацію величини діелектричної напруги та зменшення ризику ерозії [10, 12, 13].

Спеціально розроблена силіконова гума НТВ, що захищає від впливу погодних умов, наноситься за допомогою процесу спіральної екструзії без порожот на корпус епоксидної покритишки. АББ розробив запатентований метод екструзування ребер з гвинтовим рисунком. Цей метод екструзії дозволяє застосовувати погодне оребрення незалежно від довжини повітряної сторони вводу. Звуження на початку і в кінці покритишки ретельно формується вручну. Покритишки з силіконової гуми повністю герметичні завдяки хімічному з'єднанню, яке забезпечує найкраще з можливих поєднань між силіконом і корпусом ізолятора. Результатом є безшовне силіконове покриття без формувальні лінії з'єднання. Це зменшує ймовірність розривів, оскільки немає неоднорідного матеріалу злиття лінії, на якій можуть накопичуватися забруднюючі речовини.

Використання силіконової гуми НТВ забезпечує найвищу можливу довговічність покритишок, а також стійкість до розтріскувань та стійкість до ерозії. Цей матеріал стабільний навіть за температурних умов відповідно до вимог стандартів IEEE. Силіконова гума НТВ має властивість бути високо гідрофобною. Ця властивість сприяє розриву плівок води на поверхні в окремі краплі. Це явище значно зменшує струм витoku вздовж поверхні, допомагає запобігти спалаху та підвищує рівень здатності витримувати напругу під час вологих і сильно забруднених умов. Низький струм витoku мінімізує активність розряду на поверхні та мінімізує ерозію. По суті, гідрофобність діє як властивість до самоочищення, через що значно продовжується термін служби та знижується потреба в обслуговуванні задля очищення ізолятора.

Механізм гідрофобної властивості силіконової гуми НТВ має низьку дифузію молекулярної маси (LMW) силікону з тіла матеріалу на поверхню. Низькомолекулярний силікон утворює шар на поверхні ізолятора, який є гідрофобним і має тенденцію до інкапсулювання забруднення. Цей шар надзвичайно тонкий, тобто товщиною лише кілька молекул, і розподіляється по всій поверхні оребрення. LMW силікон в гумі дифундує на поверхню впродовж всього терміну служби вводу. Кількість втраченого силікону через цей процес є незначною і не впливає на очікуваний термін служби вводу.

Другою властивістю силіконової гуми НТВ є її здатність швидко відновлюватися після забруднення. При сильному і тривалому забрудненні гідрофобні характеристики можуть бути знижені тимчасово, але швидко відновлюються, як тільки умови нормалізуються. Тестування, проведене компанією АББ, показує, що втрату гідрофобності під час екстремуму умови 1000-годинного випробування соляним туманом можна відновити протягом кількох днів, якщо дати йому висохнути, і навіть швидше під впливом ультрафіолетового світла та високої температури.



Рис. 10. Покритишка, що захищає від впливу погодних умов [10]

Варто зазначити, що у нашій країні також велися інтенсивні розробки полімерних ізоляторів. Так, наприклад, ще наприкінці минулого сторіччя науковцями ВЕІ було проведено дослідження ізоляції електрообладнання високої напруги та вентиляльних розрядників, результати яких було опубліковано в [8]. Було перевірено основну вимогу до матеріалу покриття – це його трекінгостійкість, тобто стійкість до утворення поверхневих доріжок, що проводять, через термічне розкладання матеріалу, викликаного електричними розрядами по його поверхні. У цій роботі як основний метод випробувань був прийнятий американський стандарт ASTM-2303 – метод випробування електроізоляційних матеріалів на стійкість до утворення провідного шару та ерозії під дією рідкого забруднювача за допомогою нахиленої площини. Ця методика передбачає досить жорсткі умови випробувань зразків матеріалів за рахунок інтенсивної сцинтиляції на поверхні випробуваного зразка. При використанні цієї методики спостерігається трекінг навіть у тих матеріалів, у яких він не виявляється при випробуваннях крапельним методом (публікація 112 МЕК) або методом камери пилу та туману (ASTM 2132). Для аналізу матеріалу покриття ізоляторів було випробувано понад 25 зразків силіконових еластомеру у вигляді пластин 50 мм×150 мм завтовшки від 1 мм до 2 мм, що відрізняються один від одного хімічним складом. Випробування проводилися при напрузі 5 кВ, міжелектродна відстань складала 50 мм. Обраний для виготовлення ребер ізоляторів матеріал витримав випробування на нахилений площині протягом 200 год. З метою перевірки працездатності ізоляційних конструкцій на базі силіконових еластомеру були виготовлені ізолятори з ребристою поверхнею на напругу 10 кВ, 35 кВ та 110 кВ.

Основні технічні дані ізоляторів наведено у таблицях 2 та 3 [8].

Таблиця 2

Ізолятор	Клас напруги, кВ	Висота ізоляційної частини, мм	Кількість ребер, шт.	Діаметр ребра, мм	Діаметр тіла ізолятора, мм	Довжина шляху витоку, мм
КСП-10	10	110	3	108	28	300
КСО-35	35	605	5	125	46	850
КСП-110	110	880	14	108	28	1910

Примітка: К – комбінований, С – силосановий, П – підвісний. О – опорний.

Розрядна напруга ізоляторів у сухому стані в основному визначається висотою ізоляційної частини ізоляторів і близька до розрядної напруги фарфорових ізоляторів аналогічної висоти. Розрядні характеристики полімерних ізоляторів під дощем виявилися вищими, ніж у фарфорових, приблизно на 10%. Збільшення напруги ізоляторів під дощем пояснюється, хорошими водовідштовхувальними властивостями полімерів.

Таблиця 3

Ізолятор	Діаметр стрижня, мм	Маса ізолятора, кг	Розрядні напруги, кВ		
			В сухому стані, 50 Гц	Імпульс 1,2/50 мкс	При плавній піддощем $f=50$ Гц
КСП-10	16	1,1	74	110	38
КСО-35	36	3,9	180	320	92
КСП-110	16	3,8	328	555	286

Таким чином, проведені дослідження зразків силосанового еластомеру та ізоляційних конструкцій для зовнішньої установки з покриттям із силосанового еластомеру показали, що розроблений Всесоюзним науково-дослідним інститутом матеріал синтетичного каучуку міг бути використаний для виготовлення синтетичних ізоляторів. Технологічні можливості силосанового еластомеру дозволяли сконструювати як підвісні стрижневі ізолятори, так і апаратні ізолятори з оптимальними конструктивними розмірами. При впровадженні такої технології це б дозволило підвищити електричну міцність ізоляційних конструкцій високої та надвисокої напруги.

**Висновки.** Аналіз публікацій авторів різних вітчизняних та зарубіжних публікацій показав, що найкращі результати за електричними та механічними характеристиками дає таке поєднання осердя і покриття обладнання, коли його матеріал має хорошу адгезію до осердя, хорошу еластичність, а його властивості майже не залежать від температури. Полімерні ізолятори дозволяють поєднувати високу механічну міцність із кращими електричними характеристиками. У таких комбінованих конструкціях в якості елемента, що витримує механічне навантаження, використовуються склопластикові стрижні або циліндри. Також конструкція внутрішньої ізоляції конденсаторного типу, що просочена і наповнена епоксидною смолою, а потім затверділа, дозволяє особливо точно намотувати синтетичний матеріал і розміщати алюмінієві фольги, які забез-

печують ємнісні вирівнювання градування і необхідні для контролю та формування електричного поля. Таке поле контролюється таким чином, щоб оптимізувати розміри, масу та електричні характеристики високоевольтного апарату залежно від класу напруги та інших параметрів.

Захисне полімерне покриття забезпечує високі електричні характеристики ізоляторів за умов експлуатації.

Зарубіжний та вітчизняний досвід експлуатації синтетичних ізоляторів із кремній-органічним покриттям, показують, що даний матеріал може бути використаний для виготовлення надійних ізоляційних конструкцій високої напруги.

#### Список літератури:

1. Александров, Г. Н. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения: учебник для вузов [Текст] / Г.Н. Александров, В. Л. Иванов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. – 208 с.
2. Афанасьев, В. В. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения [Текст] / Под ред. В. В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 544 с.
3. Базуткин, В. В. Техника высоких напряжений вузов [Текст] / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 446 с.
4. ГОСТ Р 56737-2015 (IEC/TS 60815-3:2008) Изоляторы высокого напряжения для работы в загрязненных условиях. Выбор и определение размеров. Часть 3. – 19 с.
5. Дмитриевский, В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции: учеб. [Текст] / В. С. Дмитриевский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
6. Жорняк, Л.Б. Особливості регулювання напруженості електричного поля уздовж зовнішньої ізоляції газонаповнених трансформаторів напруги [Текст] / Л.Б. Жорняк, О.І. Афанасьєв, В. М. Щусь // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – №2, 2019. – С. 13–17. – ISSN 2079-3944.
7. ТОВ «ЕЛІЗ» Запорізький трансформаторний завод [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ua.eliz.zp.ua>.
8. Трифонов, В. З. Изоляция электрооборудования высокого напряжения и вентиляльные разрядники [Текст]/В. З. Трифонов – М. : Труды ВЭИ, 1982, вып. 91. – С. 80–83.
9. Ушаков, В. Я. Изоляция установок высокого напряжения [Текст] / В. Я. Ушаков. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
10. <https://abb.com/electricalcomponents>
11. <https://www.hitachienergy.com/ru/ru/offering/product-and-system/transformer-insulation-and-components/bushings/vysokovoltnye-vvody/>
12. New diagnostic tools for high voltage bushings. Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, 2009 SAIEE, Innes House, Johannesburg.
13. Optical/Electronic GDGL Series Current Transformers <https://rhmintl.com/products/2>
14. <http://www.hivoltinsulators.com/detaile.php?id=45>

#### References (transliterated):

1. Aleksandrov, G. N. Izolyatsiya elektricheskikh 1. Aleksandrov, H. N. Izolyatsiya elektricheskikh apparatov vysokogo zv'yazku: navchal'nyy posibnyk dlya vuziv [Tekst] / H. N. Aleksandrov, V. L. Ivanov. – L. : Enerhoatomizdat, Leninh. vidd-nye, 1984. – 208 s.
2. Afanas'yev, V. V. Dovidnyk z vysokovol'tnykh elektricheskikh pryladiv [Tekst] / Za red. V. V. Afanas'yev. - L. : Enerhoatomizdat, Leninh. vidd-nye, 1987. – 544 s.
3. Bazutkin, V. V. Tekhnika vysokoykh napruh vuziv [Tekst] / V. V. Bazutkin, V. P. Larionov, U. S. Pinal'. – M.: Enerhoatomizdat, 1986. – 446 s.
4. GOST R 56737-2015 (IEC/TS 60815-3:2008) Izolyatory vysokogo napryazheniya dlya raboty v zagryaznennykh usloviyakh. Vybory i opredeleniye razmerov. Chast' 3. – 19 v.
5. Dmytrevs'kyy V. S. Rozrakhunok i proektuvannya elektrichnoyi izolyatsiyi : navch. [Tekst] / V. S. Dmytrevs'kyy. - M. : Enerhoizdat, 1981. – 392 s.

6. Zhornyak, L.B. Osoblyvosti rehulyuvannya napruhy elektrychnoho polya vzdovzh zovnishn'oyi izolyatsiyi hazonapovnenykh transformatoriv napruhy [Tekst] / L. B. Zhornyak, O. I. Afanas'yev, V. M. Shchus // Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHP». Seriya: Problemy vdoskonalennya elektrychnykh mashyn i prykladiv. Teoriya i praktyka. – KH.: NTU «KHP», 2019. – №2"2019 – S. 13–17. - ISSN 2079-3944.
7. TOV «ELIZ» Zaporiz'kyi transformatornyy zavod [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: <http://ua.eliz.zp.ua>.
8. Trifonov, V. S. Izolyatsiya elektrooborudovaniya vysokogo napryazheniya i ventil'nykh razryadnikov [Tekst]/V. S. Trifonov – M.: Trudy VEI, 1982, vyp. 91. – S. 80-83.
9. Ushakov V.YA. Izolyatsiya vysokovol'tnykh ustanovok [Tekst] V.YA. Ushakov. – M.: Enerhoatomizdat, 1994. – 496 s.
10. <https://abb.com/electricalcomponents>
11. <https://www.hitachienergy.com/ru/ru/offering/product-and-system/transformer-insulation-and-components/bushings/vysokovoltnye-vvody/>
12. New diagnostic tools for high voltage bushings. Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, 2009 SAIEE, Innes House, Johannesburg.
13. Optical/Electronic GDGL Series Current Transformers <https://rhmintl.com › products 2>
14. <http://www.hivoltinsulators.com/detaile.php?id=45>

*Надійшла (received) 27.10.2022*

#### *Відомості про авторів / About the Authors*

**Жорняк Людмила Борисівна (Zhorniak Liudmyla Borisivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1417-4859>; e-mail: [zporoton@zntu.edu.ua](mailto:zporoton@zntu.edu.ua)

**Афанасьєв Олексій Іванович (Afanasiev Alexej Ivanovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна, e-mail: [lxafanasyev@gmail.com](mailto:lxafanasyev@gmail.com)

**Щусь Віталій Миколайович (Schus Vitaliy Mikolaievich)** – технічний директор, ТОВ Науковий інноваційно-технологічний трансформаційний завод (ТОВ «НІТТЗ»); м. Запоріжжя, Україна; e-mail: [Nittz.ltd@gmail.com](mailto:Nittz.ltd@gmail.com)